

Capítulo sexto

Recursos minerales y energéticos y su industria

*Paula Adánez Sanjuán
Egidio Marino*

Resumen

Los recursos del Ártico son muy variados, comprendiendo tanto grandes depósitos de yacimientos petrolíferos en explotación como posibles reservas de depósitos todavía no descubiertos. Por otro lado, la minería también tiene y ha tenido un rol fundamental en la historia de muchos de los países árticos, como puede ser el caso de la fiebre del oro en Alaska o los grandes yacimientos de Siberia y Canadá. El descubrimiento de nuevos depósitos en áreas como Groenlandia o los fondos marinos seguro que influenciará el futuro geopolítico de estos países.

En este capítulo se hará hincapié tanto en la riqueza de recursos presentes como en la potencialidad de reservas para el futuro. El Ártico se ha convertido ahora en una zona estratégica para la exploración de recursos. Esto se debe en parte a los cambios climáticos que están provocando una disminución de la capa de hielo, permitiendo el acceso a zonas hasta ahora inexploradas como los fondos oceánicos. A esto hay que sumarle la disminución de nuevos descubrimientos de recursos en tierra y del paulatino descenso de la calidad de los yacimientos explotados hasta ahora. Todo esto, junto con el aumento de la demanda de

recursos en una sociedad en continuo crecimiento, hace necesario encontrar un equilibrio en el marco geopolítico, social y ambiental.

Palabras clave

Recursos energéticos, Recursos minerales, Materias primas críticas, Minerales marinos.

Industry, mineral resources, and energy in the Arctic

Abstract

The resources of the Arctic are very varied, including both large deposits of exploited oilfields and possible reserves of deposits not yet discovered. On the other hand, mining also has and has had a fundamental role in the history of many of the Arctic countries, as in the case of the gold rush in Alaska or the large deposits in Siberia and Canada. The discovery of new deposits in areas such as Greenland or the deep sea surely could influence the geopolitical future of these countries.

This chapter will emphasize both the richness of present resources and the potentiality of the reserves for the future. The Arctic has now become a strategic area for resource exploration. This is partly due to climatic changes that are causing a decrease in the ice cover, allowing access to hitherto unexplored areas such as the ocean floor. To this it must be added the decrease in new discoveries of land resources and the gradual decline in the quality of the deposits under exploitation. All this together with the increase in the demand for resources in a society in continuous growth, makes it necessary to find a balance in the geopolitical, social, and environmental framework.

Keywords

Energetic resources, Mineral resources, Critical raw materials, Marine minerals.

1. Introducción

Según las Naciones Unidas, «la población mundial alcanzó los 8.000 millones a mediados de noviembre de 2022, y se estima que aumentará casi 2.000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de los 8.000 millones actuales a los 9.700 millones en 2050».

Existe un cada vez más acelerado aumento de la demanda de materias primas y energía como consecuencia no solo del crecimiento demográfico global, sino también de la necesidad de satisfacer un estilo de vida basado en el consumo de bienes. Esta situación ha provocado que además de aumentar el consumo de materias primas «clásicas» como el hierro o el cobre, entre otras, se ha aumentado la diversidad de sustancias utilizadas en una industria mucho más avanzada tecnológicamente. Por ejemplo, hay que destacar que la lista de Materias Primas Críticas para 2020 (Critical Raw Materials, CRM) que elabora la Comisión Europea, refleja la creciente demanda de una cantidad cada vez mayor de elementos y minerales que abastecen a los sectores de la energía y la tecnología verdes¹. Se hace necesario, por tanto, buscar nuevas opciones en cuanto a exploración de recursos naturales en general, tanto de materias primas como energéticos.

La aceleración de la exploración minera y la innovación de sus tecnologías más sensibles hace que se estén buscando nuevas alternativas a los recursos convencionales, donde la degradación de sus riquezas y calidades es cada vez más acusada. Estas alternativas parecen estar más accesibles con dicho avance en la tecnología. Por ejemplo, lugares como los polos, los fondos marinos o incluso el espacio se convierten en potenciales lugares de exploración y explotación minera. Esto conlleva unas consideraciones científicas y éticas que deben tenerse en cuenta.

Desde hace décadas se ha dirigido la mirada hacia los polos norte y sur, no solo por cuestiones geopolíticas, sino también por el potencial de sus recursos, con grandes áreas aún sin explorar.

Se sabe que la Antártida alberga numerosos indicios de sustancias como hierro, cobre, molibdeno, cromo, níquel o cobalto,

¹ European Commission. (2020). Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. Disponible en: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42849>

entre otros. Sin embargo, el Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente², firmado en Madrid el 4 de octubre de 1991 y que entró en vigor en 1998, en su artículo 2, designa a la Antártida como una «reserva natural dedicada a la paz y a la ciencia», y en su artículo 7 se prohíben todas las actividades relacionadas con los recursos minerales, salvo aquellas relacionadas con la investigación científica.

La región ártica es, por tanto, a escala global, una de las pocas grandes regiones que quedan para la geología prospectiva en donde el conocimiento del potencial minero es todavía limitado. Además, el calentamiento global y el deshielo de grandes superficies podrían hacer más accesible esta región y permitir la explotación en el futuro de recursos minerales ahora impracticables tanto en territorios continentales como en el fondo marino.

El Ártico ha atraído la atención de los exploradores al menos desde los viajes que realizó Willem Barents a finales del siglo XVI. Las expediciones para caza de ballenas provocaron el descubrimiento de carbón en Spitsbergen, la principal isla del archipiélago Svalbard, en 1610, usando ese carbón para sus barcos. Este descubrimiento parece ser la primera explotación de cualquier tipo de recurso mineral en el Ártico Alto. Una exploración más seria y explotaciones a largo plazo empezaron aproximadamente un siglo después.

En las últimas décadas, se han puesto en marcha numerosos proyectos a escala nacional y transnacional que han dado lugar a valiosa información sobre el posible potencial de zonas concretas del Ártico, se han descubierto nuevos depósitos, algunos en conocidas provincias metalogenéticas y otros en regiones que no se habían reconocido previamente como un gran potencial mineral. Gracias a los estudios recientes, se sabe, además, que el Ártico alberga algunos minerales críticos, lo que lo hace más atractivo aún para la industria minera actual (véase figura 1).

El interés aumenta, más si cabe, cuando se habla de los fondos marinos del Ártico. Estudios recientes han identificado indicios prometedores de sulfuros masivos, costras y nódulos de ferromanganeso y fosforitas, que albergan sustancias críticas para la tecnología y la transición energética.

Los océanos cubren más del 70% del planeta y representan una nueva frontera prometedora para la exploración de recursos

² Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente. Madrid, 1991.

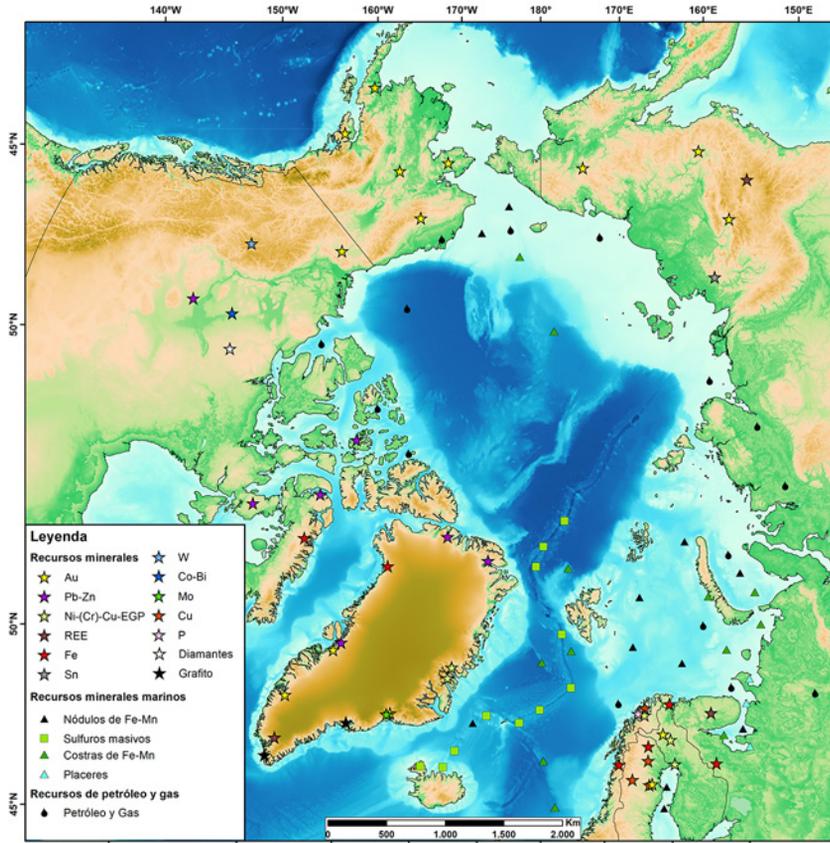


Figura 1. Mapa resumen de los recursos conocidos que albergan los países árticos, así como su fondo marino

minerales. La Comisión Europea en los últimos años ha fomentado la seguridad del suministro de minerales y elementos críticos, especialmente de aquellos cuya exportación procede de un único país. La demanda mundial de muchas de estas materias críticas incluidas en la lista de 2020, como cobalto, fósforo, elementos de tierras raras, telurio, níquel, litio, cobre, junto con la rápida disminución de descubrimientos y calidad de los yacimientos mineros terrestres, ha hecho que el interés de las empresas mineras se dirija a los fondos marinos como una nueva frontera para la exploración de recursos minerales.

La jurisdicción a nivel mundial sobre las aguas lindantes a los estados ribereños se ratificó legalmente en 1982, cuando 114 países firmaron uno de los tratados multilaterales más impor-

tantes de la historia, conocido como Ley del Mar (United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS). Con esta ley se amplió la jurisdicción de las aguas y lechos marinos hasta las 200 millas náuticas conformando la Zona Económica Exclusiva (ZEE), a partir de entonces los mares y sus recursos más allá de la ZEE son parte de la llamada «Zona». Todos los recursos tanto vivos como inorgánicos presente en la «Zona» se consideran patrimonio de la humanidad y su exploración y explotación dependen de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (International Seabed Authority, ISA)³, que se creó en 1994 para cumplir estas funciones.

Los Estados ribereños pueden ampliar su soberanía más allá de las 200 millas solo para los recursos presentes en el fondo marino o debajo de ello. Esta ampliación se llama ampliación de la plataforma continental y se rige por reglas muy estrictas basadas en la geología y permite ampliar la soberanía hasta máximo las 350 millas. La primera regla tiene en cuenta el punto de inflexión del pie del talud y a partir de este punto ampliar de 100 millas, la segunda tiene en cuenta el espesor de sedimentos. En este caso, se puede ampliar la plataforma a una distancia tal que en su punto más externo el espesor de sedimentos tiene que ser al menos el 1% de la longitud ampliada. Los Estados ribereños pueden usar en cada caso la regla que le convenga y luego someter esta ampliación a las Naciones Unidas que deciden si conceder esta ampliación o si se necesitan aclaraciones. La ampliación de la plataforma continental es muy importante porque en los mares profundos podemos encontrar diferentes depósitos minerales y energéticos (véase figura 2).

Los depósitos en este tipo de regiones más inaccesibles tanto en tierra como en los fondos marinos del Ártico, suponen retos logísticos. Esto implica que los potenciales yacimientos a explotar deben ser de mayores leyes o tamaños para así atraer inversores dispuestos a arriesgar su capital sin la garantía de otras operaciones más seguras en minas convencionales, con una mayor probabilidad de un retorno de su inversión. En este capítulo se realiza una revisión de los recursos naturales que ofrece el Ártico, poniendo en valor la singularidad de esta región del planeta que, por otra parte, debe ser tratada con especial diligencia, precisamente debido a esa misma singularidad.

³ International Seabed Authority (2023). Disponible en: <http://www.isa.org.jm>

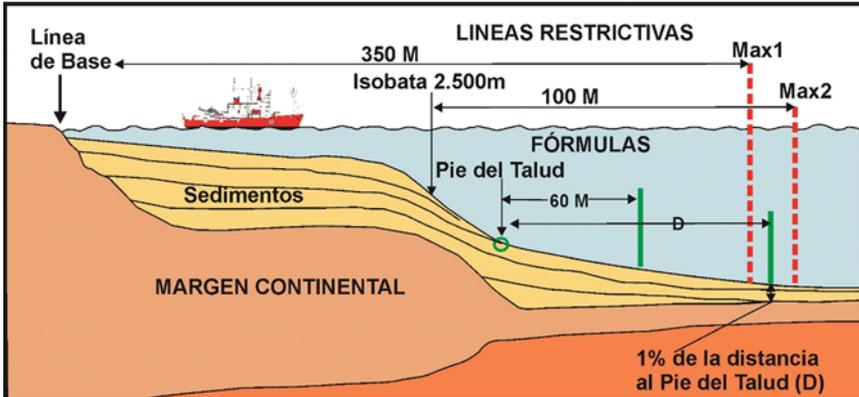


Figura 2. Formulas y restricciones para la ampliación de la plataforma continental con base en datos geológicos

2. Recursos minerales en el Ártico y la industria minera

2.1. Los depósitos de oro y campos de petróleo de Alaska

Alaska es un Estado en el que su historia está íntimamente relacionada con los descubrimientos sucesivos de recursos llevados a cabo, sobre todo, a partir del siglo XIX. Este Estado contiene numerosos depósitos de minerales metálicos *World Class*, o de clase mundial, es decir, se encuentran dentro del 10% de los depósitos con mayor contenido en metal del mundo. Así mismo, sus reservas de petróleo y gas, de enorme importancia mundial, también han jugado un importante papel en la historia y evolución de este Estado.

2.1.1. Historia de la minería en Alaska

La historia de la minería en Alaska es corta respecto a otras regiones árticas y al resto del mundo en general. El primer descubrimiento se hizo sobre placeres de oro y tuvo lugar en 1834, en la península de Kenai. Más tarde, en la década de los 80 y 90 del siglo XIX, tuvo lugar una fiebre del oro en esa parte del mundo que fomentó el desarrollo de la minería. Buscadores de oro cruzaron el Paso de Chilkoot hacia los campos de oro de Klondike (Canadá), y más tarde al interior de Alaska. Otra gran fiebre del oro ocurrió tras el anuncio en 1898 de un descubrimiento significativo en las playas de Nome, en la península de Seward. El distrito minero de Nome es el segundo yacimiento tipo placer más importante de Alaska, donde se han producido más de 155 toneladas de Au, esencialmente extraídos de depósitos aluviales complejos o depósitos de playa enterrados. Otros descubrimientos

en esta época incluyen Fairbanks (257 t), Circle (23 t), Fortymile (15 t), Hot Springs (14 t) y Tolovana (16 t), en el este de Alaska y Iditarod-Flat (45 t) e Innoko (23 t) en el suroeste.

Sin duda, el descubrimiento de este metal precioso, además de multiplicar la población, contribuyó a que EE. UU. prestase más atención a este estado, adquirido a Rusia a mediados del siglo XIX convirtiéndose entonces en un distrito con representación en el Congreso.

Además del oro, ya en la década de los sesenta del siglo XX se descubrieron otros metales base. Los primeros en detectarse fueron óxidos de hierro, en la parte oeste de la Cordillera de Brooks. Esto tuvo como consecuencia uno de los descubrimientos más importantes de metales base, Red Dog Creek, un yacimiento rico en plomo (10%) y zinc (48%), clasificado como uno de los mayores depósitos de Pb-Zn de tipo sedimentario (SEDEX). Es de destacar también el modelo de éxito actual de este distrito⁴, con inclusión de nativos alasqueños en toda la cadena de actividad.

Se han reconocido otros muchos depósitos de sulfuros metálicos durante la segunda mitad del siglo XX, pero permanecen sin desarrollar.

Al margen del oro y de los recursos minerales metálicos, tanto descubiertos como por descubrir, la economía de Alaska ha dependido y depende en gran parte de sus reservas de petróleo. Los primeros indicios de usos de petróleo en la región parecen remontarse al siglo XIX, cuando los inuit ya obtenían esta sustancia, que quemaban para calentarse y cocinar. Sin embargo, no fue hasta 1957 cuando se descubre la primera reserva rentable de petróleo que, junto con la importancia estratégica de esta región durante la Guerra Fría, hizo que en 1959 Alaska se elevara a estado. Este descubrimiento se hizo en el río Swanson, en la llamada Ensenada de Cook, en el sur de Alaska. Con un total de diez campos de petróleo y 34 de gas descubiertos antes de 1985, todavía sigue siendo un territorio prácticamente inexplorado existiendo actualmente programas para el desarrollo del conocimiento del subsuelo en esta zona⁵.

Pero el mayor descubrimiento, que cambiaría el futuro de Alaska, fue el descubrimiento del uno de los mayores yacimientos de

⁴ About Red Dog. Disponible en: <https://www.teck.com/operations/united-states/operations/red-dog/>

⁵ Cook Inlet. Department of Natural Resources. Geological & Geophysical Surveys. The Great State of Alaska. Disponible en: <https://dggs.alaska.gov/energy/cook-inlet.html>

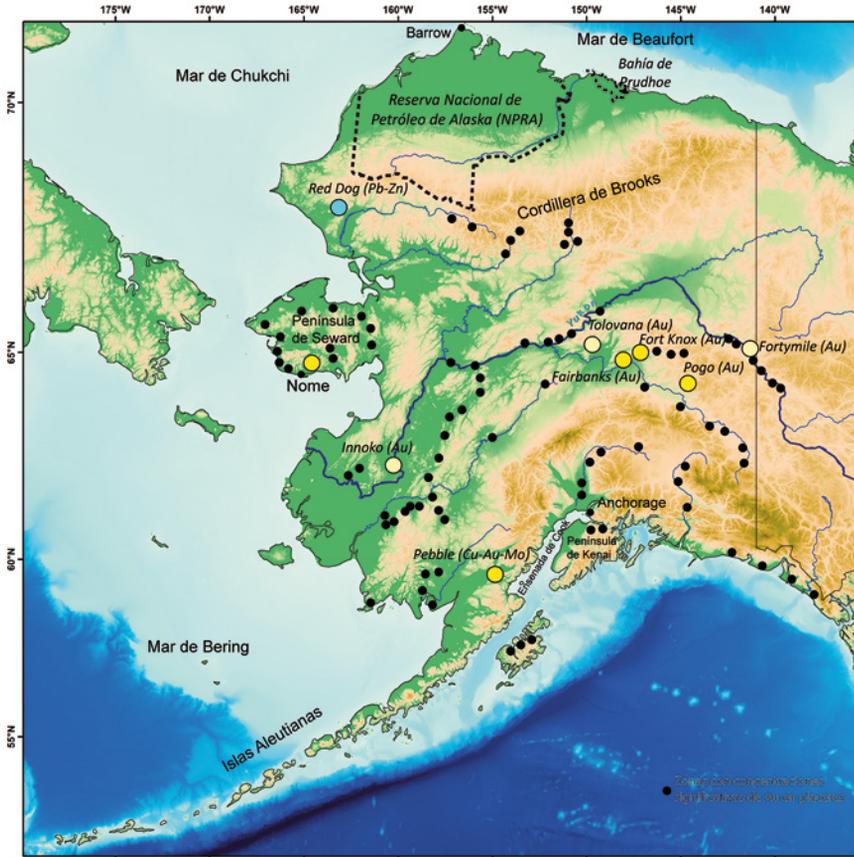


Figura 3. Principales depósitos minerales en Alaska, junto con las zonas donde se concentran los yacimientos petrolíferos

petróleo del mundo, la Ladera Norte (*North Slope* en inglés). El oro negro apareció en 1968 concretamente en la bahía de Prudhoe (figura 3). Una década más tarde, en 1977, se construye el oleoducto Trans-Alaska a Valdez, en el océano Pacífico, por donde se transfiere el petróleo de norte a sur.

2.1.2. Los grandes depósitos de oro⁶

Con respecto a los minerales metálicos, existen varias regiones en donde se concentran de forma prioritaria. Dividiendo Alaska

⁶ La mayor parte de la información procede de: Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. y Schiellerup, H. (2016). *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction*. Geological Survey of Norway (NGU), 88 pp. (Capítulo: Mineral Deposits and Metallogeny of Alaska. Larry Meinert. US Geological Survey).

en dos mitades por el río Yukón, en la mitad norte, se encuentra la Cordillera de Brooks, que se extiende del oeste al este hasta el territorio del Yukón, en Canadá. Esta cordillera ocupa el 25% de la superficie de Alaska y consiste en una variedad de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que contienen principalmente sulfuros masivos volcanogénicos y depósitos de metales base sedimentarios. La Península de Seward, en el oeste, alberga depósitos orogénicos de oro, así como depósitos de tipo placer, es decir, producto de la desintegración y meteorización de los primeros, y económicamente rentables.

La mitad sur de Alaska se compone de varias formaciones separadas por grandes fallas. La parte norte de esta mitad alberga los grandes depósitos de oro de Fort Knox y Pogo, mientras que la parte más meridional alberga uno de los depósitos de oro más grandes del mundo, el yacimiento de Pebble.

Los yacimientos de oro de Alaska se encuentran en depósitos orogénicos en forma de venas o filones de cuarzo, como en la península de Seward, Fairbanks, Pogo y Fort Knox. Así mismo, y como ya se ha comentado, son y han sido de gran importancia económica los placeres de oro, concretamente, en el área de Nome.

Se debe mencionar aparte el depósito gigante de Pebble. Se trata de un yacimiento de cobre-oro-molibdeno porfídico, que contiene la mayor concentración de oro en yacimientos de este tipo.

Los depósitos gigantes de Alaska han sido descubiertos recientemente y en el caso de Fort Knox representa un tipo nuevo de yacimiento no esperado en una zona minera con una antigüedad de casi 100 años. En este caso, una buena infraestructura y el apoyo de la población fueron imprescindibles para su éxito.

Como es evidente, la minería en Alaska dependerá de las infraestructuras, los precios de los metales y/o el potencial impacto al medio ambiente en el futuro. Quedan todavía grandes áreas poco exploradas, donde debe todavía entenderse la geología y las estructuras geológicas e identificar las zonas más favorables para el descubrimiento de posibles recursos con potencialidad económica.

2.1.3. Importancia del petróleo y gas en Alaska

Existen importantes depósitos de petróleo en Alaska. Concretamente, la Ladera Norte o *North Slope* es una región situada en la vertiente norte de la Cordillera de Brooks, entre el mar de Beaufort y el mar de Chukchi. Esta región incluye la Reserva

Nacional de Petróleo de Alaska (NPRA por sus siglas en inglés) que contenía la mayor parte del petróleo conocido de Alaska hasta que fue descubierto el campo de la Bahía de Prudhoe.

Desde el punto de vista geológico, la Ladera Norte es una cuenca sedimentaria formada desde el Carbonífero hasta el Jurásico, cuando se acumuló material carbonatado. Esta plataforma se fisuró y rotó durante el Cretácico, lo que provocó la formación del Arco de Barrow, que la separa de la cuenca canadiense. Al seguir rotando, chocó el arco de islas iniciando la orogenia de la Cordillera de Brooks. Estas formaciones se fueron elevando, mientras las formaciones carbonatadas se hundían, creándose un mar anóxico durante el Cretácico-Terciario. Los sedimentos de este mar, junto con los depósitos carbonatados y marinos forman la fuente y roca almacén de petróleo⁷.

El descubrimiento de la Bahía de Prudhoe sumado a la construcción del oleoducto, convirtieron a Alaska en una gran potencia petrolera, que provee una décima parte de todo el petróleo consumido en EE. UU.

Este estado ocupa la quinta posición en reservas de petróleo en EE. UU. (incluyendo el Golfo de México), con unas reservas probadas de petróleo de 2.425 millones de barriles⁸ y es el cuarto estado productor aportando un 3,9% del petróleo producido en EE. UU.⁹

Según un informe del USGS de 2020¹⁰, la zona central de la Ladera Norte de Alaska continúa siendo muy rica en petróleo, con unas reservas estimadas de petróleo técnicamente recuperable de 3.600 millones de barriles y $0,25 \cdot 10^{12}$ m³ de gas natural en acumulaciones convencionales en las capas de edad carbonífero inferior al paleógeno. Así mismo, en 2017 el USGS¹¹ estimó una media de recursos no descubiertos y técnicamente recuperables

⁷ Kenneth J. Bird y Cornelius M. Molenaar. (1992). The North Slope Foreland Basin, Alaska: Chapter 13. *Foreland Basins and Fold Belts*, pp. 363-393.

⁸ Statista. Proved reserves of crude oil in the United States as of 2020, by state. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/790790/us-oil-reserves-by-state/>

⁹ U. S. Energy Information Administration. *Oil and petroleum products explained*. Disponible en: <https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/where-our-oil-comes-from.php>

¹⁰ USGS. (2020). Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources in the Central North Slope of Alaska, 2020. National and Global Petroleum Assessment. Fact Sheet 2020-3001. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/fs20203001>

¹¹ USGS. (2017). Assessment of Undiscovered Oil and Gas Resources in the Cretaceous Nanushuk and Torok Formations, Alaska North Slope, and Summary of Resource Potential of the National Petroleum Reserve in Alaska, 2017. National and Global Petroleum Assessment. Fact Sheet 2017-3088. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/fs20173088>

de 8.700 millones de barriles de crudo y $0,7 \cdot 10^{12}$ m³ de gas natural en acumulaciones convencionales en las formaciones cretácicas de Nanushuk y Torok, en la Reserva Nacional de Petróleo de Alaska. Son significativamente más altas que las estimaciones anteriores, debido principalmente a descubrimientos recientes más grandes de lo previsto.

Existen además estimaciones de reservas en recursos no convencionales, como de petróleo y gas en roca¹². En un informe de 2012 el USGS¹³ estimó un potencial técnicamente recuperable de recursos de petróleo y gas en las rocas madre de la Ladera Norte que podían llegar a 2.000 millones de barriles de petróleo y hasta casi $2,26 \cdot 10^{12}$ m³ de gas.

También se estimaron las reservas en hidratos de gas¹⁴. El USGS estimó en un informe de 2018¹⁵, unos recursos medios de $1,53 \cdot 10^{12}$ m³ de recursos de gas en la Ladera Norte de Alaska.

Sin embargo, la producción de Alaska fue de apenas de 448.000 barriles por día en 2020, frente a los más de dos millones de barriles que llegó a producir a finales de los 80¹⁶, lo que supone un 75% menos. En la situación actual de crisis energética esta tendencia podría volver a cambiar.

Las posibles reservas de recursos energéticos *offshore* de Alaska se localizan esencialmente en la cuenca de Hope y en el mar de Chukchi. En estas dos áreas se han estimado respectivamente tres millones de barriles de petróleo equivalentes y $18,5 \cdot 10^{12}$ m³ de gas natural y más de cincuenta millones de barriles de petróleo¹⁷.

¹² Se trata del petróleo y gas que no han migrado y se encuentran en la roca madre, impermeable, por lo que necesitan de una estimulación adicional para ser extraídos.

¹³ USGS. (2012). Assessment of Potential Oil and Gas Resources in Source Rocks of the Alaska North Slope, 2012. National Oil and Gas Assessment Project. Fact Sheet 2012-2013.

¹⁴ El gas natural se encuentra en forma de sólidos cristalinos, que consisten en moléculas de metano densamente empaquetadas rodeadas por moléculas de agua.

¹⁵ USGS. (2018). Assessment of Undiscovered Gas Hydrate Resources in the North Slope of Alaska, 2018. National and Global Petroleum Assessment. Fact Sheet 2019-3037. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/fs20193037>

¹⁶ Alaska Field Production of Crude Oil. Datos disponibles en: <https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=MCRFPAK2&f=A>

¹⁷ Moore, T. E. y Gautier, D. L. (eds.) (2017). The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824. USGS. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/pp1824>.

2.2. Depósitos minerales en Canadá

2.2.1. La historia minera en el norte de Canadá

La historia de la minería en esta parte de Canadá es muy parecida a la ya comentada en Alaska, con su origen en la búsqueda de placeres de oro en el Yukón. En 1833 tuvieron lugar las primeras prospecciones que revelaron oro a lo largo del río Yukón. Esto dio paso a una sucesión de descubrimientos que tuvo su máximo esplendor en 1897, cuando ocurrió la mayor migración por el oro en el Klondike (véase figura 4).

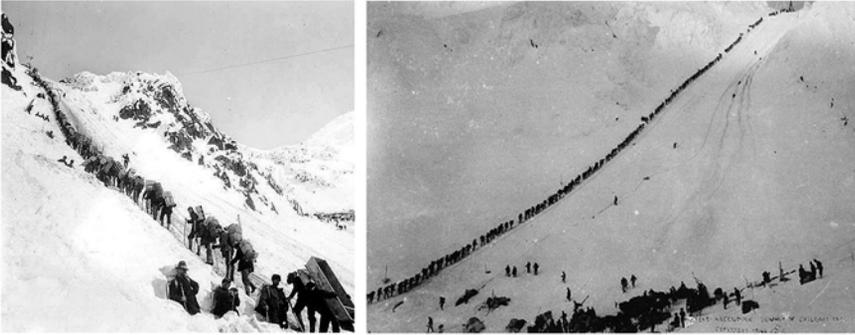


Figura 4. Fotos antiguas que documentan la migración de miles de personas en busca de oro en el río Klondike

Las exploraciones de oro tuvieron como consecuencia descubrimientos en otros tipos de yacimientos (cobre, plata, plomo, zinc, uranio, cobalto). Una mayor sofisticación en las técnicas de prospección, con acceso a zonas más remotas, dio lugar a descubrimientos como Eldorado, un yacimiento de pechblenda (uranio) y plata, cuya producción empezó en 1933 y continuó hasta 1982, y otros como los de los depósitos de oro de Gigante y Con.

En los años cincuenta, tras la Segunda Guerra Mundial, se descubrieron los depósitos de níquel de Nunavik, Raglan, Nickel King y se descubrieron depósitos de cobre y de wolframio en skarn (depósito formado en ambiente de metamorfismo de contacto). En la década de los sesenta continuaron los descubrimientos de nuevos yacimientos de cobre, molibdeno o zinc-plomo. El último gran descubrimiento en la minería de la Canadá Ártica fue el de las kimberlitas, rocas donde se forman los diamantes. La primera perforación en las kimberlitas para obtener diamantes tuvo lugar en 1991. Este anuncio también provocó otro de los mayores

movimientos migratorios en la historia de Canadá. Además del primer yacimiento, Ekati, fueron descubiertos otros en Diavik, Snap Lake, Qilalugaq y Chidliak.

Por otro lado, la explotación de recursos energéticos en Canadá se localiza históricamente en la Cuenca Sedimentaria del Oeste de Canadá, en la provincia de Alberta, que se sitúa por debajo del círculo polar. El primer descubrimiento de valor comercial se realizó en 1851, en la provincia de Ontario y Canadá se convirtió en un gigante de la producción petrolífera en la década de 1950.

2.2.2. El oro y otros recursos minerales en Canadá¹⁸

La parte ártica de Canadá es muy rica en sustancias minerales de interés muy variadas. Los depósitos minerales de esta parte de Canadá se reparten en dos grandes formaciones. Por un lado, se encuentran los cratones, rocas graníticas y metamórficas consideradas el núcleo del Escudo Canadiense, también denominado Escudo Laurentino, y que contiene numerosos depósitos de oro, cobre, níquel, hierro, uranio, elementos de tierras raras y diamantes. Por otro lado, se encuentran las plataformas mesoproterozoicas y fanerozoicas de la Cordillera Canadiense, que también contienen depósitos de zinc, plomo, oro, plata, cobre, molibdeno y wolframio. La Canadá ártica cuenta con alrededor de cuarenta yacimientos minerales calificados como grandes, de los cuales tres son gigantes (Casino, Crest, Hackett). En la tabla 1 se hace un resumen de los mismos y en la figura 5, se han representado en el mapa del norte de Canadá.

Yacimiento	Tonelaje	Leyes medias
Mary River	631 Mt	66,5% Fe
Roche Bay	362 Mt	65,9% Fe
Crest	3200 Mt	43% de Fe
Izok	14,6 Mt	13,1% Zn, 1,4% Pb, 0,2 ppm Au y 73 ppm Ag
Hackett River	82 Mt	3,8% Zn, 0,5% Pb, 0,4% Cu, 0,2 ppm Au y 144 ppm de Ag
High Lake	14 Mt	3,8% Zn, 2,5% Cu, 0,4% Pb, 0,2 ppm Au y 84 ppm Ag

¹⁸ La mayor parte de la información procede de: Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B., Schiellerup, H. (2016). *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction*. Geological Survey of Norway (NGU), 88 pp. (Capítulo: Mineral Deposits of Arctic Canada, pp. 21-26. J. C. Harrison. Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada (GSC).

Yacimiento	Tonelaje	Leyes medias
Gigante	15,5 Mt	15,8 ppm Au
Con	10 Mt	17,1 ppm Au
Meadowbank	27,5 Mt	3,3 ppm Au
Meliadine	48,3 Mt	6,5 ppm Au
Nechalacho	304,6 Mt	2.335 ppm Nb, 196 ppm Ta, 1,2% de REE, 1,8% Zr
Raglan	48,6 Mt	0,9% de Cu, 3,2% de Ni
Eldorado	1,82 Mt	0,12% Cu, 0,01% Pb, 137 ppm de Ag, 0,01% Ni, 0,1% Co, 0,34% U
NICO	30,9 Mt	1,12 ppm Au y 0,12% Co
Minto	110 Mt	1,65 Cu, 0,58 ppm Au y 5,0 ppm Ag
Polaris	20,1 Mt	13,4% Zn, 3,6% Pb
Nanisivik	17,5 Mt	9% Zn, 0,7% Pb y 41 ppm Ag
Pine Point	101 Mt	5,6% Zn, 2,4% Pb
Gayna River	50 Mt	4,7% Zn, 0,3% Pb
Faro	53,2 Mt	5% Zn, 3,4% Pb, 0,3 ppm Au y 33 ppm Ag
Wolverine	6,2 Mt	1,2% Cu, 12,2% Zn, 1,6% Pb, 1,7 pp de Au y 363 ppm de Ag
Hasselberg	4,1 Mt	6,2% Zn, 1,8% Pb, 84 ppm de Ag
Wellgreen	461 Mt	0,3% Cu, 0,2 ppm Au, 0,3% Ni, 0,02% Co, 0,4 ppm Pt, 0,34 ppm Pd
Keno Hill	7,2 Mt	4,4% Zn, 5,3% Pb y 1107 ppm Ag
Golden Revenue	232 Mt	0,02% Mo, 0,08% Cu, 0,43 ppm Au y 2,0 ppm Ag
Casino	2753 Mt	0,16% Cu, 0,02% Mo, 0,2 ppm Au y 1,5 ppm Ag
Cantung	11 Mt	0,8% W

Tabla1. Yacimientos más importantes de Canadá, tonelajes y leyes medias

Los depósitos de hierro más importantes son, por una parte, dos grandes depósitos de hierro neoarcaico, ubicados en el cratón Rae, en el noreste de Nunavut, el depósito Mary River y Roche Bay. Es un grupo de rocas metasedimentarias en las que los cuerpos mineralizados tienen un espesor de 52-195m y forma lenticular. Depósitos de hierro neoproterozoicos y más jóvenes se encuentran en el yacimiento gigante de hierro estratiforme de Crest, en los montes Mackenzie, en la parte norte del Yukón. Fue descubierto en 1961 y se trata de una formación de hematites especular de grano fino alternada con bandas ricas en jaspe.

El oro se encuentra en forma de oro orogénico neoarcaico, en el noroeste del cratón Slave. Uno de los yacimientos más importantes es el del cinturón volcánico de Yellowknife, donde se encuentran la mina Gigante (explotada entre 1948 y 2004) y la mina de Con, los mayores depósitos del cratón. El oro se encuentra en filones y lentes de cuarzo-oro en zonas de cizalla localizadas en un cinturón de rocas verdes. También se encuentra oro orogénico paleoproterozoico en los cratones de Rae (depósito Meadowbank) y Hearne (gran depósito de Meliadine) en el suroeste de Nunavut. El oro epitermal cretácico se encuentra situado a 200 km de Whitehorse, fue descubierto en las montañas de Freegold en 1930 provocando una gran migración. Se explotó intermitentemente hasta los cincuenta. En los sesenta fue descubierto el yacimiento de Golden Revenue, no explotado. La mineralización típica es en venas porfídicas, stockwork y sulfuros diseminados. Por último, se encuentran los placeres de oro del plioceno y holoceno de Klondike, en el centro-oeste del Yukón. Actualmente sigue considerándose como uno de los yacimientos de tipo placer más productivos del mundo. Esta región ha sido productiva más o menos durante más de 120 años.

Metales base se encuentran en sulfuros masivos volcanosedimentarios neoarcaicos localizados al norte del cratón Slave en la parte oeste de Nunavut, en el yacimiento de Izok Lake, el depósito de Hackett River y el depósito de High Lake. También se encuentran depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos del devónico-mississippiense en el Yukón central. El más grande y desarrollado como mina subterránea es Wolverine, seguido de Hasselberg.

El Zn y Pb se encuentran preferentemente en depósitos en carbonatos, que se localizan en las islas árticas canadienses, como los yacimientos de Polaris y Nanisivik, en el borde norte de la cuenca sedimentaria del oeste de Canadá, como Pine Point, o en los montes Mackenzie, como el gran depósito Gayna River, sin explotar. También se encuentran en depósitos en metasedimentos (sedimentarios-exhalativo), entre los que se incluyen los del área de Anvil, con el yacimiento de Faro como el más significativo. Por otro lado, el gran distrito de Keno Hill, alberga Ag-Pb-Zn polimetálicos del Mississipiense, encajados en roca cuarcita y filita grafitosa, con una mineralogía complicada.

Depósitos clásicos porfídicos se encuentran en la Cordillera en el Yukón y contienen calcopirita, molibdenita, oro y wolframio y, entre ellos, se incluye el depósito calificado como gigante de Casino.

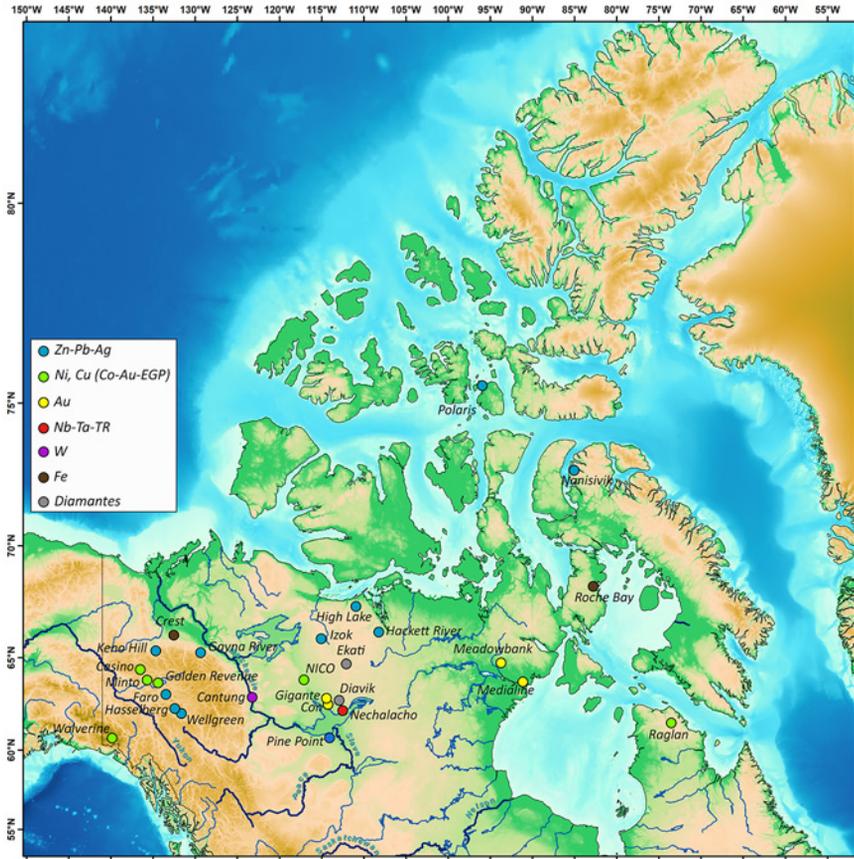


Figura 5. Situación de los principales yacimientos minerales en los territorios árticos de Canadá

Skarns de cobre y wolframio se han desarrollado adyacentes a las rocas intrusivas del Cretácico a lo largo del borde noroeste de los territorios del Yukón. En esta área se encuentra la mina de wolframio de Cantung.

Ni-Cu-EGP contenidos en rocas ultramáficas del Paleoproterozoico fueron descubiertos en 1950 en Ferguson Lake. A partir de ahí se siguió explorando la zona, dando lugar al descubrimiento de recursos significativos en profundidad. Estas formaciones dan lugar a yacimientos de importancia económica, como el depósito de Raglan, que alberga leyes y tonelajes muy similares a otros depósitos como el de Nunavik (Quebec). También se encuentran depósitos de Ni-Cu-EGP en rocas ultramáficas de edad triásica, como el gran depósito de Wellgreen, explotado como mina a cielo abierto y localizado al NW de Whitehorse en el suroeste del Yukón.

Niobio y tántalo fueron descubiertos, junto con ytrio y elementos de tierras raras, en 1976, en el gran depósito de Nechalacho localizado en el complejo de Bratchford Lake, que es intrusivo al cratón Slave.

Como depósitos tipo IOCG (*iron oxide copper gold*) se incluyen los yacimientos de NICO, en el batolito de Great Bear, y Carmacks y Minto, en el Yukón central. El depósito de NICO fue descubierto en los años treinta. Las primeras muestras de existencia de arseniuros de Co-Bi-Cu se encontraron en las minas de Anthona, a finales de los sesenta. Más tarde se pusieron de manifiesto ocurrencias de oro. En 1994 las exploraciones demostraron grandes similitudes con el yacimiento de Olympic-Dam en Australia. Mientras, el depósito de Minto, se ubica en los terrenos de Yukón Tanana (Cordillera Canadiense) y alberga el Cinturón de Cobre Carmacks y otros sistemas hidrotermales de Cu-Au.

Canadá es el tercer país productor de uranio del mundo, detrás de Kazakhsan y Namibia, aportando un 10% del uranio mundial¹⁹. El uranio se encuentra en las venas metálicas paleoproterozoicas del Batolito de Great Bear, junto con arseniuros de plata. En esta categoría se incluyen las minas de Eldorado y Echo, ambas cerca de Port Radium. También se ha encontrado uranio en los depósitos no explotados de Kiggavik en la región de Kivalliq en Nunavut, descubiertos en 1974.

Por último, cientos de pipas de kimberlitas han sido descubiertas en el cratón arcaico Slave y en las porciones de los cratones de Rae y Hearne, pero casi todas están aisladas y son pequeñas o improductivas. Las minas de Ekati y Diavik, en los territorios del noroeste y parte del cratón Slave sí son económicamente viables. Ekati está compuesta por 150 kimberlitas, de las cuales 17 contienen macrodiamantes, y cuatro pipas explotadas. La mayoría tienen formas muy empinadas, más estrechas hacia el fondo. El contenido en diamantes está directamente relacionado con el contenido en olivino y otros minerales como granates o cromitas (minerales indicadores). El depósito de Diavik está formado por cuatro pipas de kimberlitas diamantíferas situadas al este de la zona Lac de Gras. La exploración, que tuvo lugar entre 1990 y 1995, identificó 52 pipas de kimberlitas, de las cuales cuatro eran comercialmente significativas.

¹⁹ Natural Resources Canada. *Energy Fact Book 2022-2023*. ISSN 2370-3105.

2.2.3. Recursos energéticos en Canadá

Con respecto a los recursos energéticos, según el informe del Departamento de Recursos Naturales del Gobierno de Canadá²⁰, este país es el cuarto mayor productor del petróleo del mundo (2021), con un 7% de la producción mundial. También ocupa el cuarto puesto mundial en reservas probadas, con el 10% de las reservas mundiales, de las cuales, el 97% son arenas petrolíferas, ubicadas en la provincia de Alberta. Sin embargo, la parte ártica de Canadá no juega un papel importante en este tipo de recursos. En esta zona, el interés radica en las reservas *offshore*.

En cuanto a gas natural, Canadá ocupa el quinto puesto de los países con mayor producción del mundo, aportando un 5%. Ocupa el puesto número diecisiete en lo que se refiere a reservas convencionales, con un 1% del total mundial. Las reservas de gas lutita ocupan el quinto puesto mundial, con el 8% de las reservas mundiales. Por último, ocupa el puesto número 16 en reservas de carbón, con un 1% de las reservas mundiales.

La producción de gas en el norte de Canadá fue en 2021 de 6.000 barriles de petróleo convencional producidos al día en los Territorios y 0,17 millones de metros cúbicos al día de gas natural, también para el año 2021²¹.

En el USGS estudiaron los recursos en el interior de Canadá. Se conocen dos sistemas petrolíferos en la región de los Territorios del Noroeste, uno de edad cámbrica y otro devónica. En el segundo se encuentra el campo de Norman Wells, donde se ha probado la presencia de 25 millones de barriles de petróleo. En el estudio se estimaron, una media de 23 millones de barriles de petróleo y 8.700 m³ de gas para el primero de los sistemas, mientras que para el segundo no se dan datos estimados²².

Según estas investigaciones del USGS también hay varias cuencas petrolíferas *offshore* sin descubrir localizadas en la cuenca de Amerasia. En la parte de la cuenca *offshore* localizada entre el este de

²⁰ Natural Resources Canada. *Energy Fact Book 2022-2023*. ISSN 2370-3105.

²¹ Canada Oil and Natural Gas Production. Disponible en: www.capp.ca/economy/canadas-oil-and-natural-gas-production

²² Tennyson, M. E. y Pitman, J. K. (2019). *Geology and assessment of undiscovered oil and gas resources of the Northwest Canada Interior Basins Province, Arctic Canada*, 2008. En: Moore, T. E. y Gautier, D. L., (eds.) *The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824*, 18 p. USGS. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/pp1824G>

Canadá y el oeste de Groenlandia también se han hecho estimaciones de recursos energéticos ligados a diferentes unidades potencialmente ricas. Los cálculos realizados proponen unas reservas en esta área de 10.700 barriles de petróleo, $2 \cdot 10^{12}$ m³ de gas natural y 1700 millones de barriles de gas natural líquido. Estimaciones de reservas se han hecho también en la provincia de la cuenca de Sverdrup donde se han estimado hasta alrededor de una decena de acumulaciones con una reserva de alrededor de 80 millones de barriles de petróleo cada una con una media de 427 millones de barriles equivalentes y 140 millones de m³ de gas natural²³.

También hay que tener en cuenta la presencia de varios campos petrolíferos situados en el delta del río Mackenzie y los localizados en el archipiélago Ártico Canadiense²⁴.

2.3. Groenlandia y sus depósitos gigantes^{25 26}

Groenlandia es, de todas las regiones árticas, la más aislada, con una capa de hielo que cubre todo el centro de la isla. Las materias primas en la isla jugaron un papel fundamental en los primeros asentamientos. Las primeras tribus asentadas en el oeste (2500-800 a. C.) utilizaban sílice y negociaban con este material. Más tarde se utilizó el hierro procedente de los meteoritos descubiertos en los glaciares.

2.3.1. Historia minera de Groenlandia

La colonización moderna comenzó en el siglo XVIII y poco después fue descubierto un yacimiento de criolita (Na₃AlF₆) de Ivigtut. Este mineral se utilizaba en un principio como mena de aluminio y más tarde, como fundente en el proceso electrolítico de obtención de aluminio a partir de la bauxita. Este depósito fue explotado durante 130 años desde 1854 a 1987. Ha sido

²³ Moore, T. E. y Gautier, D. L. (eds.) (2017). *The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824*. USGS. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/pp1824>

²⁴ The Arctic. Disponible en: <https://arctic.ru/resources/>

²⁵ Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. y Schiellerup, H. (2016). *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction*. Geological Survey of Norway (NGU), 88 pp. (Capítulo: Greenland, pp. 36-40. Jochen Kolb. Geological Survey of Denmark and Greenland.

²⁶ Bo Møller Stensgaard y Lars Lund Sørensen. (2013). Mineral Potential in Greenland. Geology and Ore. Exploration and Mining in Greenland. N.º 23. *GEUS*. Geological Survey of Denmark and Greenland.

la única mina de criolita natural en el mundo, hasta que en la década de los sesenta empezó a ser reemplazada por criolita sintética.

En el siglo.XIX, tuvieron lugar varias campañas importantes de exploración de grafito, ya explotado en el siglo anterior en Langø, al oeste de la isla. Se investigaron un gran número de indicios y depósitos, pero la primera y única mina real de grafito fue la de Amitsoq, cerca de Naortalik, en el sur. Estuvo en operación entre 1914 y 1924 y se extrajeron 6.000 toneladas con una ley media de 21% de grafito en carbón. El grafito se encuentra en esquistos grafitosos embebidos en gneises. En exploraciones actuales se han encontrado indicios de grafito también en el este y en el oeste de la isla²⁷.

Otras explotaciones antiguas, de principios del siglo XX, aunque menos exitosas fueron la mina de Josva, de cobre o la mina de carbón de Auillissat. En los años setenta, el descubrimiento del yacimiento *World Class* de Zn-Pb denominado Black Angel supuso la continuación de la minería en Groenlandia hasta 1990.

Ya en la década de los 2000 y gracias a la exploración por parte de compañías y servicios geológicos estatales se descubre el yacimiento de oro de Nalunaq, en el sur de la isla, explotado entre 2003 y 2013, y el yacimiento de olivino de Seqi, al norte de Nuuk y explotado entre 2005 y 2010. Tras el cierre de ambas minas hubo un paréntesis en la minería groenlandesa.

Sin embargo, no se detuvieron las exploraciones y en los años posteriores se volvieron a conceder nuevas licencias de explotación para obtener Zn-Pb, molibdeno, feldespatos cálcicos, rubíes, o corindón.

El caso de la industria energética en Groenlandia es muy particular. Los primeros estudios que condujeron a pensar que Groenlandia albergaba recursos de petróleo en los fondos marinos que la rodean se llevaron a cabo en los años setenta. La subida del precio del petróleo puso en el punto de mira regiones que, como Groenlandia, no habían sido exploradas anteriormente. Sin embargo, los primeros pozos de exploración no tuvieron éxito. Tampoco tuvieron éxito las exploraciones llevadas a cabo en los noventa.

²⁷ Kristine Thrane, Per Kalvig. (2019). Graphite Potential in Greenland. *Geology and Ore. Exploration and Mining in Greenland*. N.º 23. *GEUS*. Geological Survey of Denmark and Greenland.

2.3.2. Recursos minerales en Groenlandia y su formación

Los recursos que alberga Groenlandia en la parte explorada son de muy diversas sustancias. Algunos de ellos son muy interesantes desde el punto de vista de sustancias críticas. En la tabla 2 se hace un resumen de los más importantes y en la figura 6 se han representado en un mapa. La isla está compuesta en su mayor parte por rocas del eón arcaico, formadas hace más de 2.500 millones de años. Estas rocas, que han sufrido metamorfismo y deformación, albergan depósitos de oro, níquel, cromo y elementos del grupo del platino. Otras rocas menos metamorfizadas, aunque más raras, albergan depósitos de hierro bandeado (*BIF-banded iron formation*), como el depósito de Isua, descubierto en 1965.

Yacimiento	Tonelaje (Mt)	Leyes medias
Isua	1.107	32,6% Fe
Black Angel	13,6	12,3% Zn, 4,0% Pb, 29 g/t Ag
Citronen	132	4,0% Zn, 0,4% Pb
Kvanefeld	673	1,08% óxidos de tierras raras, 273 g/t óxido de uranio, 0,24% Zn
Kringlerne	4.300	0,65% óxidos de tierras raras, 0,2% óxido de niobio, 1,8% óxido de zirconio
Motzfeldt	340	0,26% óxidos de tierras raras, 0,19% óxido de niobio, 0,012% óxido de tántalo, 0,46% óxido de zirconio
Sarfartoq	14	1,5% óxidos de tierras raras, 3,89% niobio
Skaergaard	202	1,33 g/t paladio, 0,88 g/t oro, 0,11 g/t platino
Flammefjeld	200	0,2-0,3% óxido de molibdeno
Malmbjerg	329	0,1% molibdeno

Tabla 2. Yacimientos más importantes de Groenlandia²⁸

El cratón de Rae y el cratón Noratlántico, en el margen oeste de la isla, se diferencian por su evolución geológica. Los már-

²⁸ Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. y Schiellerup, H. (2016). *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction. Geological Survey of Norway (NGU)*, 88 pp. (Capítulo: Greenland), pp. 36-40. Jochen Kolb, Geological Survey of Denmark and Greenland.

genes de ambos están formados por rocas sedimentarias y volcánicas. Colisionaron en la era paleoproterozoica, lo que tuvo como consecuencia la formación del cinturón montañoso central Nagssugtoqidian-Rinkian y otras cadenas montañosas en el norte (Inglefield) y sur (Ketilidian). El depósito de Black Angel²⁹, en Maarmorilik, formado durante el Paleo-proterozoico, se sitúa en el cinturón central, donde la mineralización de zinc, plomo y plata se aloja en rocas sedimentarias carbonatadas.

El continente recién formado se empezó a fracturar hace entre 1400 y 1100 millones de años. En la provincia de Gardar, el adelgazamiento de la corteza provocó la intrusión de nuevos fundidos magmáticos. Estas rocas ígneas plutónicas alcalinas y peralcalinas que intruyeron, hoy en día albergan algunos de los depósitos más grandes del mundo de tierras raras. Concretamente, los depósitos de Kvanefjeld (U-REE-Zn), Kringlerne (Ta-Nb-REE-Zr) y Motzfeldt (Nb-Ta), situados en el sur de la isla³⁰. El depósito de criolita de Ivigtut, ya comentado, también se formó en esta época.

Hace alrededor de 565 millones de años, una fractura en el suroeste de la isla dio como consecuencia intrusiones de carbonatitas. Estos diques contienen localmente kimberlitas ricas en diamantes, como el Complejo de Sarfartoq.

En el norte de Groenlandia se desarrolló la cuenca sedimentaria de Franklin Basin. Esta cuenca está formada por rocas sedimentarias que se depositaron en un ambiente marino de somero a profundo hacia el norte. Se trata de paquetes de rocas carbonatadas y de arenisca, depositadas hace entre 600 y 400 millones de años. Esta zona es muy rica en depósitos de sulfuros de Zn y Pb, incluyendo al yacimiento *World Class Citronen*. La mineralización está alojada en tres niveles, en una secuencia de 200m de espesor de pizarras negras y chert del Ordovícico³¹. Los minerales mena son esfalerita y galena formadas en el fondo marino, en

²⁹ Lars Lund Sørensen, Per Kalvig, Kristine Thrane y Diogo Rosa (2018). The zinc potential in Greenland. *Geology and Ore. Exploration and Mining in Greenland*. N.º 30. *GEUS*. Geological Survey of Denmark and Greenland.

³⁰ Lars Lund Sørensen, Per Kalvig y Diogo Rosa. (2018). The Rare Earth Element potential in Greenland. *Geology and Ore. Exploration and Mining in Greenland*. N.º 29. *GEUS*. Geological Survey of Denmark and Greenland.

³¹ Lars Lund Sørensen, Per Kalvig, Kristine Thrane y Diogo Rosa. (2018). The zinc potential in Greenland. *Geology and Ore. Exploration and Mining in Greenland*. N.º 30. *GEUS*. Geological Survey of Denmark and Greenland.

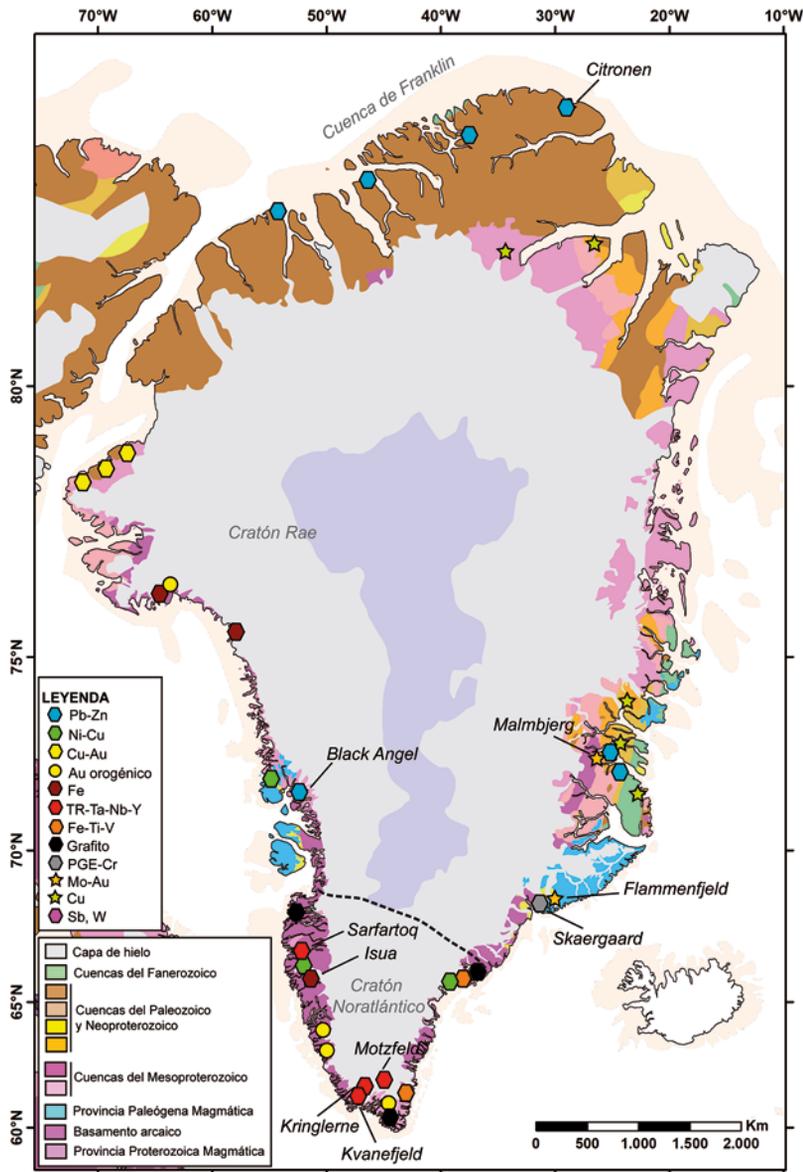


Figura 6. Esquema geológico de Groenlandia y situación de los principales yacimientos minerales (Modificado de GEUS)³²

un ambiente reductor, a partir de los fluidos hidrotermales que brotan a través de conductos submarinos.

³² GEUS. (2018). Greenland Geology and selected Mineral Occurrences.

Cuando los dos continentes Laurentia y Báltica se empezaron a separar, dieron lugar a numerosas intrusiones, así como a la creación del fondo marino del océano Atlántico. Este proceso, hace 63 millones de años, dio lugar a la provincia ígnea noratlántica, que se extiende desde la isla Baffin, a Groenlandia, Islandia e Islas Feroe hasta Escocia e Irlanda. Se acumularon flujos de lava basáltica hasta hace 13 millones de años. La intrusión de gabro-diorita de Skaergaard alberga la mayor mineralización de EGP-Au. Las intrusiones de sienitas-monzogranitos albergan intrusiones de molibdeno porfídico, así como filones de Au y de Zn-Pb, como en los depósitos de Flammefjeld y Malmbjerg.

Toda esta compleja historia geológica de Groenlandia sugiere un gran potencial para la exploración minera. El conocimiento geológico de la isla es todavía muy básico. La densidad de yacimientos descubiertos es síntoma del gran potencial que puede estar todavía escondido en el subsuelo.

2.3.3. Recursos energéticos en Groenlandia y la incertidumbre de su futuro

El trabajo publicado por el USGS sobre los recursos en el Ártico indicaba que Groenlandia contenía aproximadamente 17.000 millones de barriles de petróleo y $39 \cdot 10^{12}$ de metros cúbicos de gas natural. Ya un par de años antes había comenzado de nuevo el interés por explorar esa región por parte de las compañías petrolíferas.

La actualidad en Groenlandia está íntimamente relacionada con el manejo de los recursos naturales. El desacuerdo sobre el proyecto de Kvanefjeld, que como se ha visto es uno de los mayores depósitos de tierras raras del mundo, llevó al colapso del Gobierno a principios de 2021, por lo que se convocaron elecciones anticipadas. Tras ganar las elecciones el partido indígena, con un fuerte enfoque ambiental y oposición a estos proyectos mineros, a mediados de ese mismo año, definitivamente se puso fin a 50 años de exploración petrolífera poco fructífera (a excepción del pico experimentado entre 2002 y 2014). Así mismo, parece que, de momento, se han paralizado los planes de explotación del proyecto de tierras raras, como consecuencia de la prohibición de exploración y explotación de yacimientos con una concentración en uranio de más de 100 ppm.

2.4. Noruega, minería y recursos energéticos

2.4.1. Historia minera en Noruega

La minería más antigua de la que se tiene constancia en Noruega data de finales del siglo XII, en el depósito de plata de Akersberg, en Oslo. Otros pequeños trabajos de explotación de cobre y plata tuvieron lugar en el siglo XVI. La mina de Kongsverg abrió en 1623 y estuvo en operación hasta 1958. Otros proyectos mineros a largo plazo fueron teniendo lugar en Kvikne, Roros y Lokken, donde se explotaban sulfuros masivos.

Durante los siglos XVIII y XIX se sucedieron explotaciones de otras sustancias como arseniuros de cobalto, que supuso el establecimiento de Blaafarveværket como una compañía real para la producción de azul cobalto. Abrieron otras minas de níquel y pirita. A finales del siglo XIX también se descubrieron depósitos de molibdeno (se piensa que el depósito de Nordli actualmente podría ser el más grande de Europa), así como grandes depósitos de hierro (Dunderlandsdalen).

En los últimos doscientos años, la minería metálica se ha centrado, primero en tres grandes depósitos de hierro bandeado. A principios del XX Noruega llegó a ser un productor de importancia mundial de óxido de titanio. Poco después se abrió la explotación del depósito de Tellnes, uno de los mayores depósitos de ilmenita del mundo.

Cuando en el siglo XIX se encontró carbón en las islas Svalbard por primera vez, se desarrolló una fiebre minera, con expediciones de decenas de estados reclamando terrenos, haciendo necesaria la creación de un Estado en las islas. A principios del siglo XX fue cuando se firmó el Tratado de Svalbard, gracias al cual, Noruega tiene garantizada la soberanía del archipiélago, pero todos los firmantes (42) del tratado tienen los mismos derechos de propiedad, incluidos derechos mineros. Tras esto, se fundaron varias ciudades-empresas mineras, donde todos los servicios corrían a cargo de la empresa explotadora. Una compañía noruega y una rusa se instalaron en las islas con la apertura de varias minas de carbón, llegando a ser la actividad económica más importante en Spitsbergen durante el siglo XX.

Después de la II Guerra Mundial se abrieron en Noruega numerosas minas de sulfuros masivos caledónicos, donde se explotó Cu, Zn, Pb, pirita. Otros fueron explotados en el cinturón de rocas

verdes, o en carbonatitas, donde se explotó niobio entre 1953 y 1965, pero todas estas minas fueron abandonándose poco a poco.

Pero sin duda, la historia más reciente de Noruega está estrechamente ligada a los descubrimientos de campos petrolíferos en la segunda mitad del siglo XX. En los años 50 la idea de que Noruega tuviera recursos energéticos en su plataforma continental estaba totalmente descartada. Sin embargo, con el descubrimiento del campo de gas de Groningen en los Países Bajos en 1959, se empezó a considerar más en serio la posibilidad de que existieran hidrocarburos en el mar del Norte³³, donde se desarrollaron los primeros campos petrolíferos.

Resumiendo el trabajo de Wirch³⁴, fue en la década de los sesenta cuando se empezó a mostrar interés por el petróleo de la plataforma continental de Noruega. Una vez delimitadas las fronteras se llegó a un acuerdo sobre el reparto del subsuelo marino del mar del Norte con Reino Unido y Dinamarca. Las condiciones de aquel acuerdo fueron bastante ventajosas para Noruega.

El gran descubrimiento tuvo lugar en 1969, por la compañía Phillips, el yacimiento Ekofisk, que resultó ser uno de los campos petroleros más grandes nunca descubiertos. A partir de ahí, las autoridades prestaron más interés y se involucraron en favorecer la exploración. Otros grandes descubrimientos se sucedieron en los años siguientes, como Statfjord, Oseberg, Gullfaks y Troll.

En los años setenta se empieza a involucrar más la participación noruega, con la entrada en juego de Norsk Hydro. En 1972 se establece Saga Petroleum, una empresa privada, y se crea la empresa petrolera estatal «Statoil» (actualmente Equinor), con el Estado de Noruega como único dueño. También se crea el Directorio del Petróleo, como institución reguladora. En estos años, con una subida vertiginosa de precios del crudo y nacionalizaciones en Oriente Medio, Noruega puso en marcha medidas para incrementar la renta petrolera (impuesto extraordinario, promoción de las empresas nacionales, etc.).

A finales de los 70 fue cuando se empezó a explorar por encima del círculo polar ártico, en el mar de Noruega y en el mar de

³³ Norway's petroleum history. *Norwegian Petroleum*. Disponible en: <https://www.norskpetroleum.no/en/framework/norways-petroleum-history/>

³⁴ Wirth, E. (2014). *Breve historia y organización de la industria petrolera noruega*. Seminario Desarrollo y Energía. Departamento de Economía Aplicada I (UCM).

Barents, pero no fue hasta 1993, cuando comenzó la producción en el mar de Noruega, y en 2007, en el mar de Barents.

En los años ochenta, este sistema fue reorganizado, el 50% de Statoil pasó a propiedad directa del Estado, perdiendo además otros privilegios. Además, el Estado asumió competencias, lo que, por otro lado, en ese periodo de caída de precios, les fue favorable.

En los años noventa, Noruega se vio obligada a llevar a cabo otras numerosas reformas en este sector, con su integración en el EEE. En el año 2000 se privatizó parte de la Statoil y sus acciones empezaron a cotizar en bolsa. Tras esto se creó Petoro, una empresa 100% estatal, y Statoil se fusionó con la parte de petróleo y gas de Norsk Hydro.

Las actividades petroleras han jugado un papel fundamental para el desarrollo del estado de bienestar actual de Noruega. Estas actividades van a continuar siendo vitales para la economía noruega. Todavía hay una gran cantidad de recursos por explotar y grandes proyectos están aún en desarrollo.

2.4.2. Recursos minerales en el norte de Noruega

La geología de Noruega está dominada por el cinturón montañoso del Caledónico, que atraviesa el país desde el suroeste hasta el norte. Se formó hace 400 millones de años y ha sufrido una gran erosión, así como elevación. Las rocas que afloran en el norte y en la frontera con Suecia, Finlandia y Rusia, mucho más antiguas, pertenecen al cratón Fenoescandinavo. Este escudo se creó a partir de un núcleo del Arcaico (hace 2.500 años) y contiene formaciones de hierro bandeado, además de concentraciones de oro y de cobre-níquel-EGP. Concretamente, por encima del círculo polar ártico se encuentran varios yacimientos a destacar.

El yacimiento de Bjørnevatn es un depósito situado en una formación de hierro bandeado ubicada en gneis. Se localiza próximo a la frontera con Rusia. Las mineralizaciones que lo forman son normalmente entre 1-15m de ancho en forma lentejona y puede extenderse varios cientos de metros. Fue descubierto en 1865 y se explotó entre 1910 y 1997. La explotación fue reabierto en 2009 y actualmente sigue en operación³⁵. Se han calculado unas reservas probables de 154 Mt que contienen 30,4% de hierro.

³⁵ *Sydvaranger*. (2022). Disponible en: <https://www.sydvaranger.com/>

Los yacimientos de hierro de Rana en Ørtfjell, también son depósitos de hierro bandeado, situados en el valle de Dunderlandsdal. Es considerado un supergrupo de depósitos de hierro depositado en una cuenca submarina, hace probablemente 1000 millones de años. Rana Gruber explota actualmente cinco depósitos. Se han estimado unos recursos y reservas de 388 Mt con un 34% de hierro³⁶.

El yacimiento de Nussir, de cobre y plata está formado por varios depósitos sedimentarios asociados a rocas volcano-sedimentarias expuestas en una ventana tectónica. Es el yacimiento más septentrional. Tiene unas reservas indicadas e inferidas de 66Mt con una ley media de 1,15% de cobre e importantes cantidades de plata y oro. Actualmente está en operación, junto con el cercano depósito de Ulveryggen y presume de ser la primera mina 100% eléctrica del mundo³⁷.

Los depósitos de Gallujavri (Ni, Cu, Co, PGE) y Raitavarri (Cu, Au) se sitúan en el cinturón de rocas verdes del Paleoproterozoico de Karasjok, que se extiende a lo largo de una meseta cubierta por tundra ártica. La intrusión ultramáfica de Gallujavri ha sido explorada por varias compañías mineras y se estima que las leyes medias de Ni y Cu sean de 0,42% Ni y 0,42% Cu, en cuatro áreas mineralizadas. Se han encontrado también concentraciones de metales nobles (Pt+Pd+Au) de 2,45 g/t.

Pese a no encontrarse por encima del círculo polar, se debe destacar el yacimiento de Engebø, en el suroeste del país, se trata de un yacimiento con dos tipos de depósitos, uno magmático de ilmenita-magnetita y uno de rutilo contenido en eclogitas. Este depósito, junto con el de Tellnes son los responsables de que Noruega produzca actualmente el 5,5% de concentrados de titanio mineral del mundo³⁸.

Por último, se debe destacar la importancia de la producción de apatito, como fuente de fosfato en Noruega. Se han contabilizado al menos 16 depósitos de importancia, de los cuales el de Lillebukt, se encuentra en la Noruega ártica. Se trata de un complejo fosfo-alcalino, donde el apatito, que se encuentra en cli-

³⁶ *Rana Gruber*. Resources and mines. Disponible en: <https://ranagruber.no/about-us/resources-and-mines/>

³⁷ *Nussir*. (2023). Ore, Reserves and Production. Disponible en: <https://nussir.no/>

³⁸ U.S. Geological Survey. (2022). *Mineral Commodity Summaries*. Enero. Titanium Mineral Concentrates.

nopiroxenita y carbonatita tiene una ley media de 3% de P₂O₅. (Ihlen *et al.*, 2014).

Por otro lado, la metalogenia de Svalbard es bastante desconocida. Se encuentran sulfuros metálicos, sobre todo en Spitsbergen, en la zona de St. Jonsfjorden, en un área mineralizada con pirita y arsenopirita con 55g/t de oro, y más al sur, Kapp Mineral y Sinkholmen.

2.4.3. Recursos energéticos offshore noruegos

En 2022 Noruega produjo 232 millones de metros cúbicos equivalentes de petróleo vendible. Esto supone que la producción fue un 12% más baja que en 2004, pero ligeramente más alta que en 2021 y se prevé un aumento anual en la producción al menos hasta 2025³⁹. Las reservas *offshore* se localizarían esencialmente en la cuenca de Jan Mayen con una acumulación de más de 50 millones de barriles equivalentes. La presencia de gran actividad magmática, por otro lado, hace que la probabilidad de reservas sea muy baja y estudios cuantitativos más precisos no se han llegado a realizar⁴⁰.

2.5. Los recursos minerales en el norte de Suecia y Finlandia

No se puede dejar de mencionar el norte de dos países que también se sitúa por encima del círculo polar ártico, Suecia y Finlandia.

En Suecia⁴¹, los depósitos de Kirunavaara y Mamberget aportaron más del 50% de hierro producido en Suecia a principios del siglo XX y actualmente, estas dos minas, junto con la de Gruvberget y Leveäniemi, producen la mayor parte del hierro de Suecia y de la UE. La infraestructura del siglo XX, más moderna, dio paso a descubrimientos en el norte, como el depósito de cobre porfi-

³⁹ *Norwegian Petroleum*. (2023). Production Forecast. Disponible en: <https://www.norskpetroleum.no/en/production-and-exports/production-forecasts/>

⁴⁰ Moore, T.E. y Pitman, J.K. (2018). Geology and assessment of undiscovered oil and gas resources of the Jan Mayen Microcontinent Province, 2008, chap. L of Moore, T. E. y Gautier, D. L. (eds.). *The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824*, 18 p. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/pp1824>.

⁴¹ La mayor parte de la información procede de: Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. y Schiellerup, H. (2016). *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction*. Geological Survey of Norway (NGU), 88 pp. (Capítulo: *Sweden pp 56-60*. Anders Hallberg. Geological Survey of Sweden.

dico de Aitik, en 1930, actualmente en explotación, de donde se obtiene cobre, oro, plata y molibdeno y gracias al alto grado de automatización es capaz de ser rentable a bajas leyes⁴². En 1973 se descubrió el depósito de hierro de Viscaria, gracias a la «flor de cobre» cerca de Kiruna, que, con unas reservas calculadas de 30.000 toneladas de Cu al año, podría ser uno de los mayores productores de cobre del norte de Europa⁴³.

A fecha de diciembre de 2020 había en Suecia 12 minas en operación, todas metálicas, entre las que se encuentran Kiirunavaara, Kaunisvaara, Leveaniemi, Mamberget, de hierro y Aitik, de cobre. Más al sur, otras minas de metales base en operación son Kristineberg y Renström, y Kankberg y Björkdal, de oro⁴⁴.

En Finlandia⁴⁵, su basamento está compuesto casi completamente por rocas precámbricas que son parte del escudo fenoescandinavo. La evolución geológica se puede dividir en cuatro episodios principales, cada uno de los cuales han dado lugar a diferentes características y zonas metalogenéticas. Los distritos mineros más importantes del norte de Finlandia son el Cinturón de rocas verdes de Lapponia Central, el Cinturón de esquistos de Peräpohja y el Cinturón de esquistos de Kuusamo.

El primero de todos contiene varias áreas prospectivas con depósitos significativos de diferentes tipos. Entre ellos, el depósito de Suurikuusikko, es actualmente el mayor depósito de oro de Europa. Campañas de exploración actuales han calculado unos recursos medidos de 4,447 Mt con una ley media de 2,59 ppm de oro⁴⁶. Además de este, se puede mencionar el depósito de Ni-Cu-EGP de Kevitsa, definido como de gran tamaño para Ni y Cu⁴⁷, que se trata de una mineralización de sulfuros asociados a una intrusión máfica y cuya producción comenzó en 2012, o el depósito de Ni-Cu-EGP de Sakatti, descubierto en 2009⁴⁸.

⁴² Boliden Copper Mine, Aitik, Sweden. (2000). 27 de marzo . Disponible en: <https://www.mining-technology.com/projects/aitik/>

⁴³ *Copperstone*. Viscaria (Cu-Fe). Disponible en: <https://copperstone.se/en/viscaria/>

⁴⁴ SGU (Geological Survey of Sweden). (2022). *Statistics of the Swedish Mining Industry 2021*, 66 pp.

⁴⁵ La mayor parte de la información procede de: Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. y Schiellerup, H. (2016). *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction*. Geological Survey of Norway (NGU), 88 pp. Capítulo: Finland, pp. 61-66. Tero Niiranen y Pasi Eilu, Geological Survey of Finland (GTK).

⁴⁶ GTK (Geological Survey of Finland). (2022). Suurikuusikko. *Mineral Deposit Report*. 64 pp.

⁴⁷ GTK (Geological Survey of Finland). (2022). Kavitsa. *Mineral Deposit Report*. 31 pp.

⁴⁸ GTK (Geological Survey of Finland). (2021). Sakatti. *Mineral Deposit Report*. 64 pp.

El Cinturón de esquistos de Peräpohja alberga depósitos significativos de Cr, Ni-Cu-EGP y EGP, además de otros pequeños, pero también interesantes de Au, Cu, Mo o Fe. El depósito más destacable es el de Kemi, un yacimiento de Cr contenido en capas de rocas máficas. Las reservas probadas son de 50,1 Mt con una ley media de 26% de óxido de cromo y también contiene yacimientos de Ni-Cu-EGP.

Finalmente, el Cinturón de esquistos de Kuusamo es donde se ubica el único yacimiento económico de Fe-Ti-V, el de Mustavaara.

2.6. La exploración minera y la gestión energética de Islandia

Cabe mencionar a Islandia⁴⁹, que, aunque no está exactamente por encima del círculo polar ártico, es un interesante caso por su geología totalmente diferente a la corteza continental vista en el resto de los países árticos. En Islandia se ponen de manifiesto los procesos que tienen lugar en la corteza oceánica, pero en superficie, en vez de a grandes profundidades. Estos procesos son el motor de creación de muchos de los depósitos minerales. Islandia es uno de los pocos lugares en los que la dorsal mesoatlántica se manifiesta en superficie, en forma de lo que se conoce como punto caliente o *hotspot*.

En este país se ha dedicado una mayor atención a la exploración de oro, que comenzó a principios del siglo XX, por la influencia de la fiebre del oro en América. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos, no se llegó a explotar debido, sobre todo a las guerras mundiales. La exploración de oro se retomó cuando en los años ochenta se pudo establecer la relación entre los sistemas hidrotermales activos y los depósitos de oro y ha continuado hasta el presente. Se ha detectado un enriquecimiento de oro a lo largo de la península de Reykjanes. Las últimas noticias son que la minera canadiense St-Georges Eco-Mining Group pretende explotar oro exclusivamente con energías renovables.

En esta isla también se abrieron numerosas minas de carbón durante la primera y segunda Guerra Mundial. Desde los años setenta Islandia ha ido incrementando el uso de la energía geotérmica y la energía hidroeléctrica para autoabastecerse, en busca de recursos energéticos viables y económicos. Hoy en día,

⁴⁹ La mayor parte de la información procede de: Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. y Schiellerup, H. *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction*. Geological Survey of Norway (NGU), 88 pp. 2016. Capítulo: Prospecting for Gold in Iceland, pp. 41-42. Franzson, H., Robertsottir, B.G. y Hardardottir, V.

el 85% de la energía consumida procede de energía geotérmica (60%) e hidroeléctrica (20%)⁵⁰.

2.7. Los depósitos minerales en la Rusia ártica

2.7.1. Historia de la minería rusa

El zar Pedro el Grande (1672-1725) fue responsable de numerosas iniciativas de exploración y explotación de recursos minerales en Rusia. Una de las primeras explotaciones fue el depósito de plata de Nerchinsk, en el suroeste del lago Baikal, descubierto en 1702. Al este de los Urales se descubrieron en 1745 mineralizaciones primarias de oro, y en años posteriores se multiplicaron los descubrimientos en esta área, que llegó a su máximo en el siglo XIX. A partir de ahí Rusia ha sido uno de los principales productores de oro del mundo.

La industria minera evolucionó drásticamente a finales de ese siglo, introduciendo grandes producciones de Au, Ag, Pt, Cu y Fe en los Urales, Fe, Mn en el sur (ahora Ucrania), Pb-Zn, Ag y Cu en el Cáucaso y Au y Ag en Siberia.

Durante el siglo XX la industria minera continuó su expansión hasta la I Guerra Mundial y la Revolución, cuando se produce un drástico decaimiento de la actividad, llegando a niveles mínimos. En los años 30 vuelve a recuperarse y continúa haciéndolo décadas después de la II Guerra Mundial. Se hicieron grandes esfuerzos e inversiones en exploración que condujeron al descubrimiento de grandes depósitos de sustancias muy variadas. Muchos de los depósitos son considerados los mayores del mundo en su tipo. Hoy en día es un gran productor de diamantes, paladio, antimonio, oro, níquel, platino, wolframio y vanadio.

2.7.2. Los recursos minerales en el norte de Rusia⁵¹

La geología de la parte rusa por encima del círculo polar ártico es muy variada. En la figura 7 se han representado los depósitos más

⁵⁰ Government of Iceland. Energy. Disponible en: <https://www.government.is/topics/business-and-industry/energy/>

⁵¹ La mayor parte de la información procede de: Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. y Schiellerup, H. (2016). *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction*. Geological Survey of Norway (NGU), 88 pp. Capítulo: Russia pp. 68-83. Petrov, O. V., Morozov, A. F., Shatov, V. V., Molchanov, A. V., Terekhov, A. V., Lukyanova, L. I., Artem'ev, D. S., Belova, V. N. y Khalenev, V. O.

relevantes del país. La parte más al noroeste consiste en rocas arcaicas y proterozoicas, divididas en tres provincias: 1) Kola, que alberga rocas ígneas con cinturones volcánicos y rocas intrusivas, donde se incluye el grupo Pachenga, que alberga los yacimientos más importantes de níquel y cobre. Las rocas más jóvenes son complejos intrusivos devónicos, Khibiny y Lovozero, que contienen grandes recursos de metales especiales. 2) La provincia de Belomorian consiste en rocas verdes y gneises arcaicos y paleoproterozoicos. 3) La provincia de Carelia, que está compuesta por tres formaciones, entre las que destacan gneises y rocas verdes, que incluyen importantes yacimientos de hierro bandeado.



Figura 7. Principales yacimientos minerales en la zona ártica de Rusia

La Plataforma Este europea se extiende hasta los Urales y está formada por el orógeno de Timanide y formaciones sedimentarias en el sur. Los Montes Urales se extienden 2.500 km desde el mar de Aral hasta el mar de Barents, con continuación en el estrecho de Kara. Están rodeados al oeste por la plataforma europea y al este por la plataforma de Siberia Occidental, cubierta por sedimentos mesozoico-cenozoicos. Los principales recursos minerales que se encuentran en esta zona son, barita, cobre y zinc sedimentarios, titanomagnetita, cromita, oro, sulfuros volcano-sedimentarios, Mo-W, o elementos del grupo del platino.

La zona de Siberia está formada por varios terrenos tectónicos, como el cratón siberiano, las Tierras Bajas del Oeste, cinturones orogénicos al norte, al sur y al este del cratón y un cinturón volcánico que sobreimprime el cinturón orogénico del este. El Cratón Siberiano está formado por rocas máficas y ultramáficas, carbonatitas y kimberlitas. Los escudos de Anabar y Aldan son

los levantamientos más antiguos en el cratón. El cinturón orogénico del neoproterozoico-paleozoico de Taimyr-Novaya Zemlya, se junta con el cratón Siberiano por el noroeste mediante la depresión de Yenisei-Khatanga. El cinturón orogénico de Yana-Chukotka, del mesozoico, se extiende por el margen noreste del cratón hasta el océano Pacífico. Su formación comenzó en el Mesoproterozoico hasta el Jurásico con la deposición de secuencias de areniscas y lutitas. En el Jurásico fue deformado e intruido por batolitos graníticos.

Los terrenos siberianos han experimentado varios eventos anorogénicos intraplaca, incluyendo intrusiones de rocas ígneas como los Traps Siberianos, complejos alcalinos y ultramáficos, kimberlitas y lamproitas. Los depósitos gigantes de níquel- cobre y EGP de Noril'sk y Talnakh se localizan en las intrusiones máficas en forma de sills, asociadas con estos Traps. Esta tectónica intraplaca también resultó en el emplazamiento de kimberlitas en Yakutia, muchas de ellas diamantíferas.

Los depósitos minerales más importantes en la parte ártica de Rusia son de oro, plata, níquel y platino y elementos raros (véase tabla 3). Los yacimientos más importantes de oro se localizan en Siberia. En la península de Kola se produce níquel y cobre. Otras materias que se explotan son Pb-Zn, metales ferrosos, wolframio, tierras raras, titanio, Nb-Ta, y diamantes.

Yacimiento	Tonelaje	Leyes medias
Nezhdaninskoye(a)	47,5 Mt	3,3 g/t Au, 18,79 g/t Ag
Kupol(b)	776 kt	5,8 g/t Au, 75,1 g/t Ag
Dukat(a)	6,8 Mt	0,4 g/t Au, 210 g/t Ag
Prognoz(a)	8 Mt	481,31 g/t Ag
Norilsk 1(c)	18,66 Mt	0,35% Ni, 0,51%Cu, 3,87 g/t Pd, 1,58 g/t Pt, 0,17 g/t Au
Talnakh(c)	315,314 Mt	0,80% Ni, 1,51% Cu, 3,69 g/t Pd, 0,99 g/t Pt, 0,22 g/t Au
Kostomuksha(d)	1.300 Mt	26,45% Fe
Deputatsky(d)	25 Mt	1,15% Sn
Tomtor(e)	11.4 Mt	6,0% Nb ₂ O ₅ , 14,5% REO
Lovozero(f)	>1000 Mt	0.8-1,5% REO
Kolmozero(d)	74 Mt	1,14% Li ₂ O, 0,009% Ta ₂ O ₅ , 0,011% Nb ₂ O ₅ y 0,037% BeO

Tabla 3. Resumen de los principales yacimientos de minerales metálicos en Rusia

- a) Polymetal International: <https://www.polymetalinternational.com/en/assets/>
- b) Kinross (reservas probadas) <https://www.kinross.com/operations/default.aspx#exploration>
- c) Nornickel (reservas probadas) <https://ar2020.nornickel.com/>
- d) NGU⁵²
- e) Polymetal (reservas probables) <https://www.polymetalinternational.com/en/investors-and-media/news/press-releases/19-04-2021/>
- f) Lovozero. USGS (recursos estimados) https://mrdata.usgs.gov/ree/show-ree.php?rec_id=219

Rusia es el tercer productor de oro más importante del mundo, detrás de China y Australia⁵³. Tiene numerosos depósitos de diferentes tipos, de los cuales, el 80% se concentra en la región de Siberia, al igual que los depósitos de plata. Los yacimientos más importantes de estas sustancias en esta área incluyen, el yacimiento de Nezhdaninkoye (Au-Ag), cerca de Yakutsk, que está compuesto por 80 depósitos, de los cuales diez son gigantes, y en donde las mineralizaciones se encuentran en venas de cuarzo, con el oro en forma nativa o asociado a sulfuros y cuarzo. Otros yacimientos de Au-Ag de importancia son el de Kubaka, cerca de Magadan y Kupol, en Chukotka. Como yacimientos de Ag importantes se deben mencionar el de Dukat, también en la región de Magadan, y que se encuentra entre los más grandes del mundo, y el depósito de Prognoz, en Yakutia. También se deben mencionar los placeres de oro, que han llegado a suponer dos tercios de la producción de oro en Rusia.

Además, Rusia es el tercer país productor de níquel después de Indonesia y Filipinas⁵⁴ y es el primer país productor de paladio y segundo de platino, tras Sudáfrica⁵⁵. El yacimiento más importante es el de Norilsk 1 y 2 (Ni-Cu-EGP), en la ladera norte del monte Rudnaya. Los mayores depósitos comerciales del distrito se localizan a lo largo de la falla profunda de Norilsk-Khatanga.

⁵² Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. y Schiellerup, H. (2016). *Mineral Resources in the Arctic. An Introduction*. Geological Survey of Norway (NGU), 88, pp. Capítulo: Russia pp 68-83. Petrov, O. V., Morozov, A. F., Shatov, V. V., Molchanov, A. V., Terekhov, A. V., Lukyanova, L. I., Artem'ev D.S., Belova, V. N. y Khalenev V. O.

⁵³ U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. January 2022. Gold.

⁵⁴ U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. January 2022. Nickel.

⁵⁵ U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. January 2022. Platinum Group Metals.

Los grupos de Norilsk y Talnakh se componen de dos tipos de mineralización: mineralizaciones de platino-cobre-níquel-sulfuros y mineralizaciones de platino bajas en sulfuros (estos depósitos son los más ricos de su tipo en el mundo).

Otros yacimientos de metales que deben mencionarse son el Grupo Pechenga (Ni-Cu), cerca de la frontera con Noruega, el depósito estratiforme de Sardana (Pb-Zn), en el sureste de la región de Yakutia, el depósito bandeado de Pavlovsk (Pb-Zn) en Novaya Zemlya, y el depósito de Peschanka (Cu-Au-Mo) en la parte central de la península de Chukotka, formado por depósitos porfídicos, en relación con intrusiones graníticas.

Con respecto a los metales ferrosos se puede decir que Rusia también juega un papel importante a nivel mundial. Es el quinto productor de hierro⁵⁶ y el segundo productor de aluminio en el mundo⁵⁷. El depósito de bauxita (roca rica en minerales de aluminio) más importante es el de Vezhayu-Vorykva, en la región de Middle-Timan, descubierto en 1970. El depósito más interesante de cianita (silicato utilizado también como mena de aluminio) es el de Keiv. Se utilizaba antes de la II Guerra Mundial, a falta de depósitos de bauxita conocidos. Se localiza en el este de la península de Kola. Como fuente de hierro, el depósito más importante es el de Kostomuksha, descubierto en 1946, al norte de la ciudad del mismo nombre, que se construyó para dar servicio a la explotación. Se trata de una mineralización de cuarcita ferrosa, dividida en tres unidades, actualmente en explotación.

Por último, el mayor depósito de titanio de Rusia es el de Yarega, localizado en la República de Komi, en el campo petrolífero de Timan-Pechora. El depósito se localiza en areniscas del Devónico. La peculiaridad es que, aparte de grandes recursos de crudo, también contiene altas concentraciones de mineral leucoxeno, rico en titanio, producto de alteración del óxido de ilmenita. Se encuentra en forma de depósitos de placer.

Como depósitos ricos en elementos de tierras raras y metales especiales se deben mencionar, el depósito de Deputatsky, de estaño, ubicado en Yakutia, a 250 km de la costa del mar de Láptev. Este distrito contiene 150 cuerpos mineralizados, clasificados en tres tipos, venas, zonas de stockwork y zonas mineralizadas de cataclasis.

⁵⁶ U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. January 2022. Iron Ore.

⁵⁷ U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. January 2022. Aluminum.

El depósito de Tomtor, de elementos de tierras raras y niobio se trata de un cuerpo intrusivo de sienita-carbonatita en la parte noroeste de Yakutia y fue descubierto en 1959. El cuerpo tiene una superficie circular con un núcleo de carbonatita y una zona periférica de sienita. Al menos existen tres tipos de mineralización, la mineralización primaria se encuentra en la carbonatita, donde el material se ha meteorizado in situ, y los materiales se han redistribuido y acumulado en depresiones. En 2021 se confirmaba que este yacimiento es uno de los mayores en escala y concentración de niobio y tierras raras del mundo⁵⁸. La estimación inicial de reservas es de 0,7 Mt de óxido de niobio y 1,7 Mt de óxidos de tierras raras. Esto hace a este yacimiento el tercero más grande del mundo en reservas.

El yacimiento de Lovozero (Ta, Nb) también es de gran importancia a nivel mundial. Se trata de un macizo alcalino, en la parte central de la península de Kola. Contiene doce cuerpos mineralizados en explotación, en los que las reservas consisten en eudialita-loparita con altos contenidos en tántalo. La mina Lovozersky contiene alrededor de 6.000 toneladas de loparita (30-35% de óxidos de tierras raras, 8-12% de óxido de niobio y 0,6-0,8% de óxido de tántalo)⁵⁹. También se debe mencionar el yacimiento de Kolmozero (Li, Ta, Nb, Be) un depósito pegmatítico descubierto en 1947, que consiste en doce venas de pegmatita con espodumena-albita.

Rusia también contiene numerosos depósitos de diamantes albergados en pipas de kimberlitas en el este de Siberia, donde los cuerpos de kimberlita de diferentes edades forman campos extensos. Los depósitos de interés económico son los formados durante la actividad tectónica y magmática del Paleozoico. En 1954 se descubrió la primera pipa y en años posteriores se fueron descubriendo muchos más. Los más importantes son el depósito de Udachnaya, en la República de Sakha (Yakutia), la pipa de kimberlita de Mir y la provincia de kimberlita diamantífera de Lomonósov en el norte de la frontera con Europa (véase figura 8).

Otro tipo de depósitos diamantíferos son los formados como resultado del impacto de asteroides, hace 35,7 millones de años.

⁵⁸ Polymetal International PLC. (2021). Tomtor initial Ore Reserve estimate. Disponible en: <https://www.polymetalinternational.com/en/investors-and-media/news/press-releases/19-04-2021/>

⁵⁹ Zaitsev, V. y Kogarko, L. (2012). Sources and perspectives of REE in the Lovozero massif (Kola Peninsula, Russia). *Conferencia: European Mineralogical Conference, 2012*. Universität Frankfurt, Alemania.



Figura 8. Vista aérea (Google Earth) de las minas de diamantes de Mir (Yakutia) y Lomonósov (Arkhangelsk)

Esta estructura de Popigai se encuentra en el golfo de Khatanga, en la esquina SW del mar de Láptev. El grafito contenido en el área de impacto fue transformado en diamante en fracción de segundos, lo que hace que su calidad gema sea pequeña. Estos diamantes de impacto se extienden en un área de 1.140 km² y a una profundidad de 600 m.

Las regiones árticas de Rusia suponen una alta proporción del total de los recursos rusos, con el 90% de concentrado de apatito, 85% de níquel, 60% de cobre, más del 98% de EGP, 50% de wolframio, más del 95% de tierras raras, más del 75% de estaño (reservas probadas), 40% de oro, cerca del 90% de plata y el 99% de diamantes. Se puede anticipar con facilidad que se descubrirán nuevos depósitos de importancia y que la industria minera será de vital importancia también en el futuro. Se ha dado mucha importancia y atención a los recursos de hidrocarburos de Rusia, pero los recursos metálicos son también de alta importancia y dimensiones.

2.7.3. Recursos energéticos en las cuencas *onshore* y *offshore* rusas

Rusia fue en 2021 el segundo país productor de petróleo del mundo, con 536,4 millones de toneladas, por detrás de EE. UU. (711,1 millones de toneladas) y con una producción muy similar a la de Arabia Saudí (515,0 millones de toneladas). Estados Unidos tuvo una producción equivalente al 16,8% del total mundial, mientras Rusia produjo el 12,7% y Arabia Saudí, el 12,2%⁶⁰.

En 2020, última actualización de datos de reservas, Rusia poseía el 6,21% de las reservas mundiales de petróleo con unas reservas probadas de 14,8 mil millones de toneladas⁶¹.

⁶⁰ British Petroleum. (2022). *bp Statistical Review of World Energy*. 71st edition. 60 pp.

⁶¹ British Petroleum. (2021). *bp Statistical Review of World Energy*. 70th edition. 72 pp.

Con respecto al gas natural, según la actualización del año 2020, Rusia posee las mayores reservas probadas del mundo, con $37,4 \cdot 10^{12}$ metros cúbicos, un 19,9% de las reservas mundiales, seguida de cerca por Irán, con $32,1 \cdot 10^{12}$ metros cúbicos, que contiene el 17,1% de las reservas mundiales⁶².

En 2021, Rusia fue el segundo país productor de gas natural, con una producción de 701.700 millones de metros cúbicos, lo que supone un 17,4% de la producción mundial. Tan solo fue superada por EE. UU., que produjo 934.200 millones de metros cúbicos, un 23,1% de la producción mundial⁶³.

Según el estudio realizado por el USGS en 2008 para el Ártico, en la Rusia continental ártica se encuentran numerosas cuencas *onshore*, así como *offshore*, en las que se han estimado prometedoras reservas tanto de petróleo como de gas (véase tabla 4).

	CUENCA PETROLÍFERA	PETRÓLEO (millones de barriles)	GAS (10^{12} m³)	GAS NATURAL LÍQUIDO (millones de barriles)
ONSHORE	Timan-Pechora (2008)*	16.000	1,2	sin datos
	Timan-Pechora (2008)	3.300	0,5	300
	Timan-Pechora (2018)	1.400	1,3	sin datos
	Yenisey-Khatanga	5.600	2,83	2.700
	Lena-Anabar	2.000	0,05	1.000
	Lena-Vilyui	400	0,037	40
OFFSHORE	Plataforma del mar de Laptev	3.200	1,2	120
	Mar de Kara	35.800	0,01	sin datos
	Mar de Barents	7.400	9	1400
	Cuenca de Mezen	50	sin datos	sin datos

*Recursos explotados

Tabla 4. Resumen de las reservas estimadas, no descubiertas, de hidrocarburos según el trabajo realizado por el USGS en 2008⁶⁴

La cuenca de Timan-Pechora es una importante cuenca petrolífera, el primer campo petrolífero se descubrió en 1930 y actualmente

⁶² British Petroleum. (2021). *bp Statistical Review of World Energy*. 70th edition. 72 pp.

⁶³ British Petroleum. (2022). *bp Statistical Review of World Energy*. 71st edition. 60 pp.

⁶⁴ Moore, T. E. y Gautier, D. L. (eds.). (2017). *The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824*. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/pp1824>

contiene más de 230 campos petrolíferos y se han descubierto y documentado más de 16.000 millones de barriles de petróleo y $1,3 \cdot 10^{12}$ m³ de gas. Es un cratón con forma triangular delimitado por los Montes Urales, al este y la Cordillera de Timán por el oeste. El progresivo cerramiento del océano Urálico desde el Pérmico hasta el Jurásico dio lugar a la formación de un cinturón montañoso y una cuenca remanente sedimentaria. La acumulación de unos ocho km de sedimentos dio lugar a la maduración termal de las rocas fuente de petróleo, a la creación de una ventana de generación de gas y una ventana de maduración de crudo. La mayor parte de los recursos de petróleo convencionales no descubiertos se encuentran en la zona central, mientras que el 60% del gas no asociado se estima que se encuentre en la zona este.

En la cuenca de Yenisey-Khatanga, localizada entre la península de Taymir, al norte y el Cratón Siberiano al sur, había en 2008, dieciséis campos petrolíferos descubiertos y cuatro campos de gas, casi todos en la parte oeste⁶⁵. La cuenca de Lena-Anabar, que se encuentra en el alto Ártico ruso, entre el mar de Laptev y el cratón Siberiano, no contaba con ningún descubrimiento económico en 2008, pero parece tener prometedoras reservas de recursos no convencionales⁶⁶. Lo mismo ocurre en la cuenca de Lena-Vilyui, situada entre el cinturón de plegamiento de Verkhoiansk y el Cratón Siberiano donde solo en la parte que queda por encima del círculo polar ártico, las estimaciones parecen prometedoras, aunque actualmente no tiene ningún campo activo⁶⁷.

3. Recursos minerales marinos en el Ártico

El primer descubrimiento y descripción científica de mineralizaciones marinas profundas se realizó a bordo del Buque H.M.S. Challenger, a

⁶⁵ Klett, T. R. y Pitman, J. K. (2018). Geology and assessment of undiscovered oil and gas resources of the Yenisey-Khatanga Basin Province, 2008. En: Moore, T. E., y Gautier, D. L. (eds.). *The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824*, 23 p. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/pp1824R>.

⁶⁶ Klett, T. R. y Pitman, J. K. (2018). Geology and assessment of undiscovered oil and gas resources of the Lena-Anabar Basin Province, 2008. En: Moore, T. E. y Gautier, D. L. (eds.). *The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824*, 19 p. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/pp1824T>.

⁶⁷ Klett, T.R. y Pitman, J. K. (2017). Geology and assessment of undiscovered oil and gas resources of the Lena-Vilyui Basin Province, 2008. En: Moore, T. E. y Gautier, D. L. (eds.). *The 2008 Circum-Arctic Resource Appraisal: U.S. Geological Survey Professional Paper 1824*, 17 p. Disponible en: <https://doi.org/10.3133/pp1824V>.

lo largo de una campaña oceanográfica entre 1872 y 1876 (Murray y Renard, 1891), que recorrió más de 120.000 km a través de los océanos Atlántico, Antártico, Índico y Pacífico. Estas primeras muestras representan nódulos y costras de ferromanganeso dragados al sur de las Islas Canarias. Con el avance tecnológico el conocimiento de estos depósitos submarinos ha ido aumentando cada vez más hasta que en las últimas décadas se han descubierto numerosos depósitos en todos los mares del mundo resultando en una adición valiosa a las reservas mundiales de diferentes elementos. Los estudios dedicados a comprender la génesis, la distribución y el potencial de recursos de los minerales de los fondos marinos comenzaron a finales de la década de 1970 y principios de la de 1980 (Hein *et al.*, 2013). Abarcando una gran diversidad de entornos y estilos de recursos, incluidos los depósitos hidrotermales de alta y baja temperatura (sulfuros masivos del fondo marino-SMS, depósitos sedimentarios exhalativos-SEDEX), fosforitas, costras de ferromanganeso ricas en cobalto, nódulos de manganeso y lodos ricos en elementos de tierras raras, los recursos minerales en aguas profundas son particularmente atractivos por su naturaleza polimetálica con altos contenidos de elementos de transición, raros y críticos. Además, los recursos de aguas poco profundas, como los depósitos aluviales marinos, representan otra fuente para muchos metales y gemas críticos. Los recursos minerales de los fondos marinos albergan las mayores reservas de la Tierra de algunos metales importantes como el cobalto, el níquel, el telurio, el manganeso, el vanadio, el molibdeno y otros, y son fundamentales para la industria.

Estos depósitos se pueden resumir esencialmente en cinco grupos: i) sulfuros masivos, ii) costras y iii) nódulos de ferromanganeso, iv) fosforitas y v) placeres. Hasta ahora, la explotación comercial de minerales marinos sólidos se ha limitado a los yacimientos originados por la erosión mecánica y química de las rocas de los continentes y transportados al océano principalmente por los ríos (placeres). Estos se encuentran en zonas relativamente poco profundas del mar territorial y de la zona económica exclusiva de 200 millas náuticas de los estados costeros. Por otro lado, los demás tipos de depósitos, algunos de ellos más ricos que cualquier yacimiento terrestre, proceden en parte de fuentes terrestres y en parte de procesos naturales dentro y debajo de los océanos, a menudo en las profundidades marinas más allá de los límites de la jurisdicción nacional.

La importancia de estos depósitos no se centra exclusivamente en ser fuente de grandes reservas de minerales base para el progreso (hierro, cobre), si no que su importancia depende también

en sus contenidos de elementos críticos. Entre estos elementos encontramos litio, cobalto y manganeso útiles en la fabricación de la mayoría de las baterías de alto potencial de los coches eléctricos, pero también telurio y tierras raras que son básicas para la obtención de energías renovables (respectivamente paneles solares y molinos de viento). Además, una gran cantidad de otros elementos (galio, germanio, indio, vanadio, molibdeno, así como las tierras raras) se utilizan tanto en la fabricación de aleaciones de acero como para super y semiconductores muy útiles en el desarrollo de nuevas tecnologías. En este sentido la importancia del Ártico y sobre todo de la definición de los límites de soberanía de los diferentes Estados es clave a la hora de considerar esos depósitos marinos profundos (González *et al.*, 2022)⁶⁸.

3.1. Sulfuros masivos

Los yacimientos hidrotermales del fondo marino, expresados sobre todo como sulfuros masivos del fondo marino (SMS), son equivalentes volcanogénicos modernos a los yacimientos terrestres (fósiles) de sulfuros masivos volcanogénicos (VMS). Los depósitos de VMS han constituido importantes objetivos mineros a lo largo de la historia en muchas regiones de Europa y de todo el mundo, y siguen proporcionando importantes recursos de cobre, zinc, plomo, plata y oro (Singer 1995). En general, los yacimientos de SMS y los procesos exhalativos que conducen a su formación son bien conocidos por los geólogos tras milenios de extracción de metales y azufre de yacimientos VMS encontrados en tierra firme (González *et al.*, 2022).

Los depósitos de sulfuros masivos, ya sea en tierra o en el lecho marino, son acumulaciones de estratos de minerales sulfurados que precipitaron en o cerca del lecho marino en asociación espacial, temporal y genética con el vulcanismo contemporáneo (Franklin *et al.* 2005). En el fondo marino, los depósitos de sulfuros masivos se forman como resultado de la interacción del agua de mar caliente con la corteza oceánica a través de un proceso de convección impulsado por la actividad magmática en profundidad. Durante la convección, el agua de mar fría se infiltra en el fondo marino y se filtra a través de la corteza marina hasta alcanzar profundidades de varios kilómetros, donde el agua se calienta a temperaturas superiores a 400 °C (véase figura 9).

⁶⁸ International Seabed Authority (2023). Disponible: <http://www.isa.org.jm>

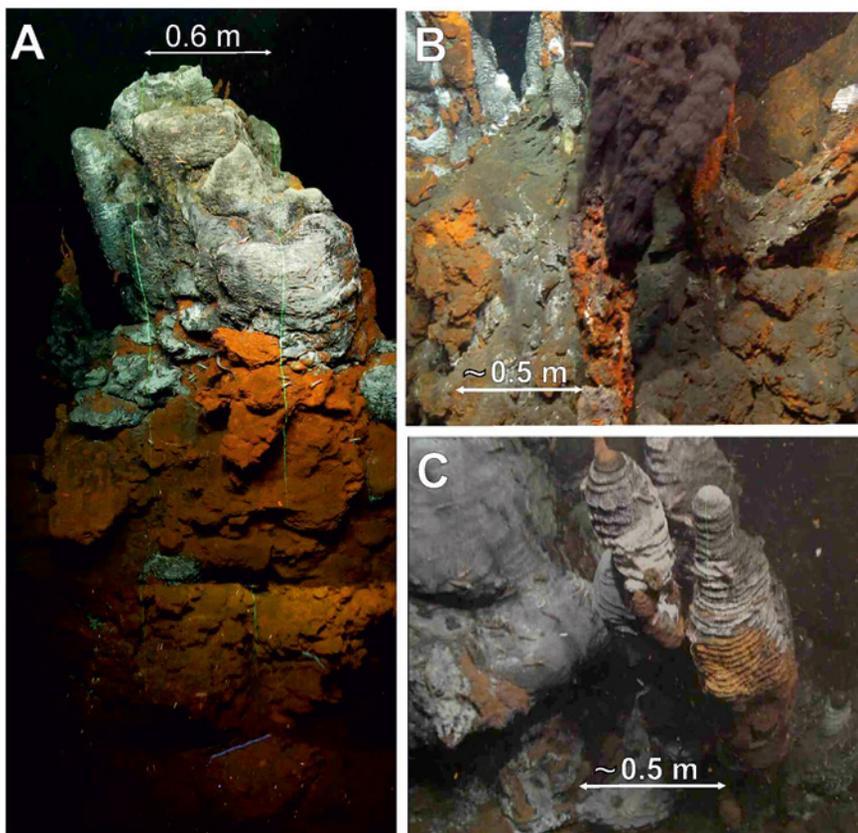


Figura 9. Ejemplo de chimeneas submarinas en las que se puede ver la expulsión de fluidos enriquecidos en metales (Somoza et al., 2022)

Las reacciones químicas en el agua marina descendente generarán un fluido caliente, ácido, reducido químicamente y capaz de lixiviar las rocas circundantes (Petersen *et al.* 2016; 2018). El fluido resultante se enriquecerá en metales, azufre y sílice, y ascenderá rápidamente al fondo marino, donde será expulsado a la columna de agua en un respiradero confinado. Los sulfuros, sulfatos, silicatos y otros minerales se precipitan de los fluidos de ventilación calientes al enfriarse o entrar en contacto con el agua de mar fría. Los penachos ricos en metales asociados se denominan fumarolas negras o blancas en función de su temperatura y de la veta metálica. La mayoría de los metales se dispersarán en la columna de agua suprayacente, pero el resto precipitará para formar depósitos de SMS en forma de chimeneas, montículos y sedimentos metalíferos en el emplazamiento del respiradero y sus alrededores (Petersen *et al.* 2016; 2018), o formará vetas o unidades masivas bajo la superficie. Los depósitos de sulfuros masivos del fondo marino

ricos en metales base se forman generalmente a partir de la actividad hidrotermal de alta temperatura en los emplazamientos de los respiraderos de fumarolas negras situados a profundidades de agua comprendidas entre <500 y más de 4000 m.

Aunque el mundo no se está quedando sin recursos minerales en tierra, los fondos marinos pueden albergar yacimientos de metales básicos y especiales de tamaño y calidad suficientes para sustentar proyectos mineros viables. Los depósitos de sulfuros del fondo marino varían en tamaño desde unos pocos miles de toneladas hasta varios millones de toneladas, y se han encontrado depósitos de sulfuros masivos de tamaño significativo (>5000 m²) en la mayoría de los entornos geodinámicos (Hannington *et al.* 2010). Sin embargo, la mayoría de los yacimientos documentados son muy pequeños y se considerarían muestras si se encontraran en tierra. La continuidad de los cuerpos de sulfuro en el fondo marino es difícil de evaluar, y la estimación fiable del tamaño, incluso en dos dimensiones, es un reto (Hannington *et al.* 2010).

El tamaño de los depósitos de SMS depende de las tasas de propagación, que también controlan la incidencia y la longevidad de la ventilación hidrotermal. Por ejemplo, la frecuencia del campo de *venting* está positivamente correlacionada con la tasa de propagación (German *et al.* 2016), pero diversos análisis muestran que existe un mayor potencial de recursos en las dorsales lentas y ultralentas en comparación con las dorsales de propagación más rápida (por ejemplo, Hannington *et al.*, 2011). Las dorsales de propagación lenta se caracterizan por un bajo suministro de magma o los puntos de ventilación pueden no estar asociados con actividad magmática en absoluto, y la propagación es generalmente acomodada por fallas de desprendimiento (German *et al.* 2016). La circulación profunda y sostenida de agua hidrotermal controlada por fallas es característica de las dorsales lentas o ultralentas y explica por qué se espera que estos sistemas alberguen los mayores sistemas hidrotermales del fondo marino (Hannington *et al.* 2005).

3.2. Costras y nódulos de ferromanganeso

Los depósitos marinos de costras y nódulos ferromanganeso (Fe-Mn) son recursos minerales potenciales que contienen metales básicos y elementos estratégicos y críticos como cobre (Cu), cobalto (Co), vanadio (V), níquel (Ni), titanio (Ti), metales del grupo del platino (PGM) o elementos de tierras raras (REE). Los minerales que conforman estos depósitos pueden definirse tra-

dicionalmente como: a) puramente hidrogenéticos, cuando todos los constituyentes proceden del agua fría del mar; b) diagenéticos, cuando todos los constituyentes precipitan de las aguas de poro de los sedimentos; y c) hidrotermales, cuando la precipitación se produce en las proximidades de respiraderos hidrotermales a partir de fluidos con temperaturas superiores a las aguas marinas (véase figura 10A). Algunos depósitos presentan un origen mixto, principalmente hidrotermal-hidrogenético o hidrogenético-diagenético (Hein *et al.*, 2000; 2003; 2013; Muiños *et al.* 2013; Bau *et al.*, 2014; Gonzáles *et al.*, 2016; Marino *et al.*, 2017).

La formación de costras de Fe-Mn hidrogenéticas está generalmente asociada a la presencia de sustratos duros sobre los que pueden acumularse coloides nanométricos de oxihidróxidos de Fe y Mn durante millones de años formando tapetes continuos de hasta 25 cm de espesor (Bogdanov *et al.*, 1990; 1995; Hein *et al.*, 1997; 2000; Bogdanova *et al.*, 2008; Marino 2020). Estos sustratos duros están representados por relieves positivos que se elevan desde profundidades abisales, formando diferentes estructuras morfotectónicas aptas para la acreción de las costras de Fe-Mn. Entre ellos, los más importantes son: la plataforma continental de mares poco profundos, los montes submarinos, los bancos y mesetas submarinos y las dorsales que pueden encontrarse en casi todos los océanos y mares. El crecimiento de las costras de Fe-Mn se produce por acreción lenta de finas capas de minerales intercrecidos de óxidos de Mn y oxihidróxidos de Fe. La estructura interna es, en general, subparalela, formando capas densas o dendríticas en las que a veces se puede identificar la presencia de minerales detríticos o bioclastos.

Elementos	Unidad de medida	Cantidades
Manganeso	Porcentaje	17,22
Hierro	Porcentaje	20,57
Cobalto	Partes por millón	3939
Niquel	Partes por millón	2887
Cobre	Partes por millón	982
Vanadio	Partes por millón	674
Molibdeno	Partes por millón	383
Tierras raras	Partes por millón	2367
El. G. Platino	Partes por billón	397

Tabla 5. Media a nivel mundial de los elementos estratégicos y críticos más abundantes en las costras de ferromanganeso (Hein *et al.*, 2000)

Las costras de Fe-Mn son interesantes por sus contenidos de Fe y Mn entre el 18 y el 24% que son los elementos principales que forman estos depósitos de oxihidróxidos. Los minerales principales son la vernadita y birnessita en las costras de origen hidrogenético, mientras que en las costras de origen diagenético son más comunes minerales como la asbolana, la busserita y la todorokita. Estos últimos presentan una estructura con un espaciado interlaminar de 10 Å que permite la absorción de grandes cationes como Ni y Cu que aumentan su estabilidad, llegando a presentar interesantes cantidades (respectivamente hasta 7 y 4% en depósitos diagenéticos del océano Pacífico) (Post, 1999; Manceau y Combes, 1988; Manceau *et al.*, 1997; 2014). La vernadita, por otro lado, especialmente debido a su gran superficie disponible y a la diferencia de carga libre permite la absorción de varios elementos críticos como Co, V, Mo, PGM y especialmente REE (véase tabla 5) (Koschinsky y Halbach, 1995; Hein *et al.*, 1997; 2000; Marino *et al.*, 2017; González *et al.*, 2022).

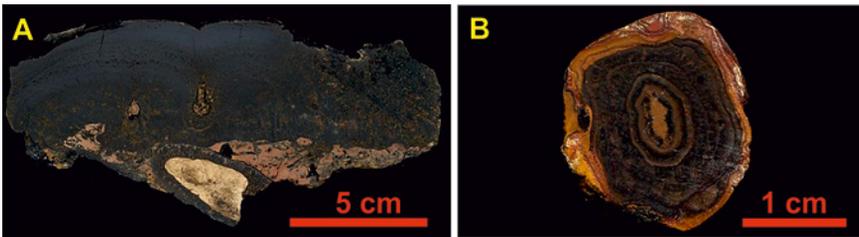


Figura 10. Ejemplos de A) costra de Fe-Mn y B) nódulo de Fe-Mn. En ambos se puede evidenciar el crecimiento estratificado y concéntrico (Marino, 2020)

Los nódulos polimetálicos tienen un origen parecido a las costras de Fe-Mn y su mineralogía y geoquímica son también las mismas. La diferencia es que estos depósitos se originan por la precipitación de elementos desde las aguas de poro en los sedimentos y normalmente presentan un mayor porcentaje de minerales diagenéticos (asbolana, busserita y todorokita). Estos minerales concentran en su mayoría grandes cantidades de Mn, Ni y Cu (hasta 40,7 y 3% en peso), además de cantidades interesantes de elementos críticos como Co y REE. Los mayores yacimientos del mundo se encuentran asociados a grandes cuencas sedimentarias con llanuras abisales casi ininterrumpidas por la presencia de montes submarinos y dorsales. Algunos ejemplos son la zona entre las fracturas de Clarion y Clippertone en el Pacífico norte, la cuenca de Perú, en el Pacífico centro-sur y la cuenca central del océano Índico (Hein y Koschinsky, 2014; Wegorzewski & Kuhn, 2015; González *et al.*, 2016).

Los nódulos polimetálicos pueden tener diferentes tamaños, formas y morfologías superficiales. En tamaño oscila entre 1 y 12 cm en su dimensión más larga, los más grandes, de hasta 21 cm, se han encontrado en la cuenca del Perú (von Stackelberg, 1997, 2000), pero también pueden tener dimensiones a escala milimétrica (micronódulos). La mayoría de los nódulos se encuentran con una dimensión de entre 1 y 5 cm (véase figura 10B). En cuanto a la forma, suelen incluir formas esferoidales, elipsoidales, alargadas, discoidales, platiformes, botrioidales o irregulares. Las morfologías superficiales pueden ser lisas o granular, y dependen de las corrientes y la erosión que pueden provocar en ellos, estando la cara lisa en contacto con el agua de mar y la cara gruesa rodeada de sedimento (Murton *et al.*, 2000).

Las estructuras internas de crecimiento de los nódulos se caracterizan por ser finamente laminadas, columnares, pilares, dendríticas y masivas concéntricas a un núcleo que puede ser formado por fragmentos de roca o de nódulos antiguos. En los nódulos también se pueden diferenciar áreas de formación hidrogenética con estructuras finamente laminadas y columnares, mientras que la precipitación diagenética conduce principalmente al desarrollo de capas dendríticas y moteadas (von Stackelberg & Marchig, 1987).

3.3. Placeres

Los yacimientos de placeres son la acumulación de concentraciones elevadas de minerales económicamente valiosos, densos y resistentes a la meteorización y la abrasión, formados por la separación gravitatoria durante procesos sedimentarios. Los depósitos aluviales marinos están formados por minerales metálicos detríticos pesados, con pesos específicos de $2,9 \text{ g/cm}^3$ o superior o piedras preciosas, más pesados que los de los minerales comunes que forman las rocas, como el cuarzo y el feldespato, erosionados a partir de rocas madre terrestres, normalmente ígneas, y transportados al mar, principalmente por los ríos. Estos depósitos además son concentrados posteriormente por la acción de los movimientos de las aguas (olas, mareas, corrientes) que los acumulan en la misma área.

En los depósitos tipo placer pueden encontrarse más de 20 minerales pesados valiosos, pero los más importantes desde el punto de vista económico (Harben y Bates, 1990) son: casiterita (estaño), ilmenita y rutilo (titanio), circón (circonio), cromita (cromo), monacita (torio y elementos de tierras raras), magnetita (hierro), oro y la principal piedra preciosa es el diamante.

Los placeres marinos pueden clasificarse teniendo en cuenta varios factores (Emory-Moore y Solomon, 1989; y sus referencias):

- a) Fuente: los placeres marinos se clasifican como primarios, cuando se derivan de la meteorización postglacial del lecho rocoso, o secundarios, cuando son el producto de la reelaboración del sedimento de sobrecarga.
- b) Entorno: los placeres marinos poco profundos (en la playa/cerca de la costa) se encuentran en la zona entre la costa y la zona de rompiente, mientras que los de alta mar se encuentran en la zona entre la zona de rompiente y el final de la plataforma continental.
- c) Formación: los depósitos alóctonos pueden producirse a cientos de kilómetros de la fuente y los minerales correspondientes incluyen circón, monacita, ilmenita, rutilo, magnetita, cromita, oro de grano fino y platino; los depósitos autóctonos se forman cerca de la fuente, en zonas donde la tasa de erosión marina supera la tasa de acumulación neta de sedimentos, e incluyen casiterita y oro y platino de grano grueso (Kartashov, 1971).
- d) Propiedades físicas: en función de su gravedad específica, los placeres marinos se dividen en minerales pesados-pesados ($>6,8$), minerales ligeros-pesados (4,2 a 6,8) y gemas (2,9 a 4,1) (Emery y Noaks, 1968). Además, distinguimos los depósitos aluviales relictos/fósiles/sumergidos, formados en el pasado geológico y que cambiaron de un entorno subaéreo a uno marino debido a diversas razones (cambio climático, movimientos tectónicos, etc.). Se clasifican en función del medio de depósito, es decir, depósitos fluviales, eólicos, glaciogénicos, de playa o de costa.

3.4. Localización de los principales depósitos marinos en el Ártico

3.4.1. Rusia

En la región del mar de Barents hay algunas ocurrencias de costras de Fe-Mn. Por lo general, en esta zona las costras se presentan como concreciones finas enriquecidas en Fe a poca profundidad (250 m de profundidad media) y están relacionadas con la presencia de superficies duras formadas por bancos

submarinos (Shulga *et al.*, 2022)⁶⁹. También se han encontrado costras de Fe-Mn asociadas a la presencia de dorsales como las estudiadas en la zona sur de la dorsal de Mendeleev que se alarga desde la plataforma siberiana hasta el centro del Ártico. Las costras encontradas aquí presentan grandes cantidades de material siliciclástico y Fe que diluyen ligeramente los contenidos de elementos económicamente interesante (Hein *et al.*, 2017; Konstantinova *et al.*, 2017) (véase figura 11).

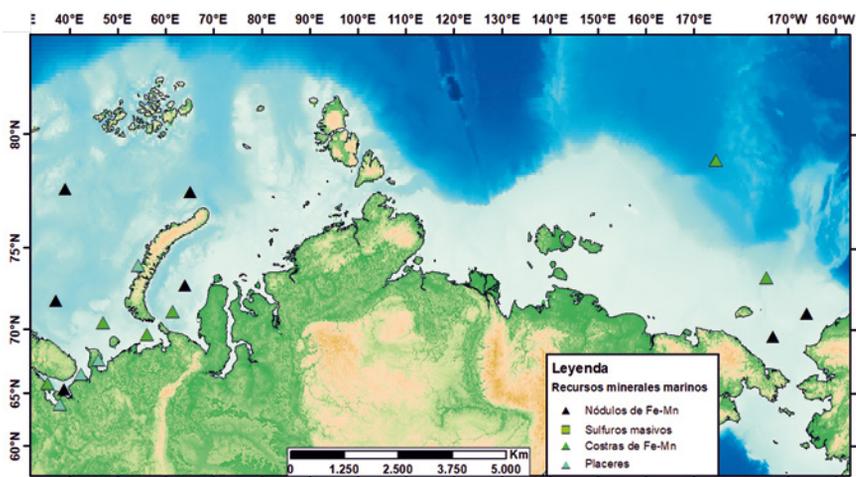


Figura 11. Localización de los principales recursos minerales marinos en los mares de Rusia

En esta misma región hay evidencias de la presencia de nódulos de Fe-Mn asociados a los sedimentos someros del mar de Barents y en el Mar Blanco. Estos nódulos son generalmente de origen principalmente diagenético. Más evidencias se han encontrado en el Ártico este, donde se analizaron 16 muestras (Baturin and Dubinchuk, 2011; Baturin *et al.*, 2014)⁷⁰.

⁶⁹ González, F. J., Marino, E., Somoza, L., Medialdea, T., Lobato, A., Blasco, I., Kuhn, T., Ruehlemann, C., Ferreira, P., Magalhaes, V., Hein, J. R. y Cherkashov, G. (2021). Deliverable 4.4: Models of formation for the main provinces of ferromanganese crusts and phosphorites. *GeoERA*. MINDeSEA project. 67 pp. Disponible en: <https://geoera.eu/projects/mindesea2/>

⁷⁰ Ferreira, P., Moniz, C., González, F. J., Nyberg, J., Kuhn, T., Ruehlemann, C., Marino, E., Melnyk, I., Malyuk, B. y Magalhaes, V. (2021). Deliverable 6.2: Report of the poly-metallic nodules prospect evaluation parameters that will be employed as a road map for the creation of the polymetallic nodules occurrence database. *GeoERA*. MINDeSEA project. 52 pp. Disponible en: <https://geoera.eu/projects/mindesea2/>

Los placeres en esta área se encuentran muy cerca de la costa formando depósitos de titanio, hierro y tierras raras. Se localizan esencialmente en la costa occidental de las islas Severny y Yuzhny, en los golfos del mar Blanco y en la península de Kanin (Ivanova et al., 1999)⁷¹.

3.4.2. Noruega

En el Mar de Noruega, la presencia de costras de Fe-Mn está vinculada fundamentalmente a crestas y montes submarinos. Las dorsales están representadas esencialmente por la triple unión formada entre las dorsales del Atlántico Medio, Jan Mayen y Mohns. Además, en la parte septentrional de esta región se encuentran varias elevaciones submarinas formadas en torno a la dorsal medio Atlántica (véase figura 12).

En esta área se pueden encontrar diferentes indicios de depósitos de sulfuro masivos cuya mena principal está asociada a cobre (hasta 0,6%) y zinc (hasta 14%) y con contenidos variables de elementos estratégicos como Ga y Ge (entre 2 y 20 ppm en los análisis preliminares). Estos depósitos se encuentran en su mayoría asociados al Mohns Ridge que es un área de formación de corteza oceánica ultra lenta localizada entre los 71 y los 73,5 grados norte. Entre los depósitos encontrados en esta área destacamos: Loki's Castle, Mohn's Treasure, Soria Moria, Copper Hill, etc. (Snook, et al. 2018; Lim, et al. 2019; Pedersen, et al. 2010; 2016; Kowalczyk et al., 2018)⁷². Otros indicios también se han encontrado en tres sectores del Knipovich Ridge (74-78 °N) y en el Kolbeinsey Ridge⁷³.

En los mares árticos noruegos también es posible encontrar la presencia de costras y nódulos de Fe-Mn. Las primeras se han encontrado en crestas y dorsales alejadas de los respiraderos hidrotermales y asociadas al punto triple formado entre la dorsal Atlántica, la dorsal de Jan Mayen y la de Mohns. También hay información de la presencia de costras asociadas a la dorsal de

⁷¹ Zananiri, I. (2021). Deliverable 5.4: Report of the models of formation for the main provinces of placer occurrence, as defined through this study. *GeoERA*. MINDeSEA project, 50 pp. Disponible en: <https://geoera.eu/projects/mindesea2/>

⁷² Schiellerup, H., Ferreira, P., González, F. J., Marino E., Somoza, L. y Medialdea, T. (2021). Deliverable 3.3: Metallogeny of hydrothermal deposits in European waters. *GeoERA*. MINDeSEA project. 66 pp. Disponible en: <https://geoera.eu/projects/mindesea2/>

⁷³ <https://interridge.org/>

Knipovich⁷⁴. Estas costras presentan un mayor contenido de Fe, pero también cantidades económicamente interesantes de Co, Ni, V y especialmente REE. Estudios recientes han evidenciado la influencia de procesos hidrotermales en la formación de estas costras ligadas a dorsales (Dubinin *et al.*, 2022) (véase figura 12).

Los nódulos, por otro lado, se encuentran dispersados en las llanuras abisales entre la costa noruega y la isla de Svalbard⁷⁵.

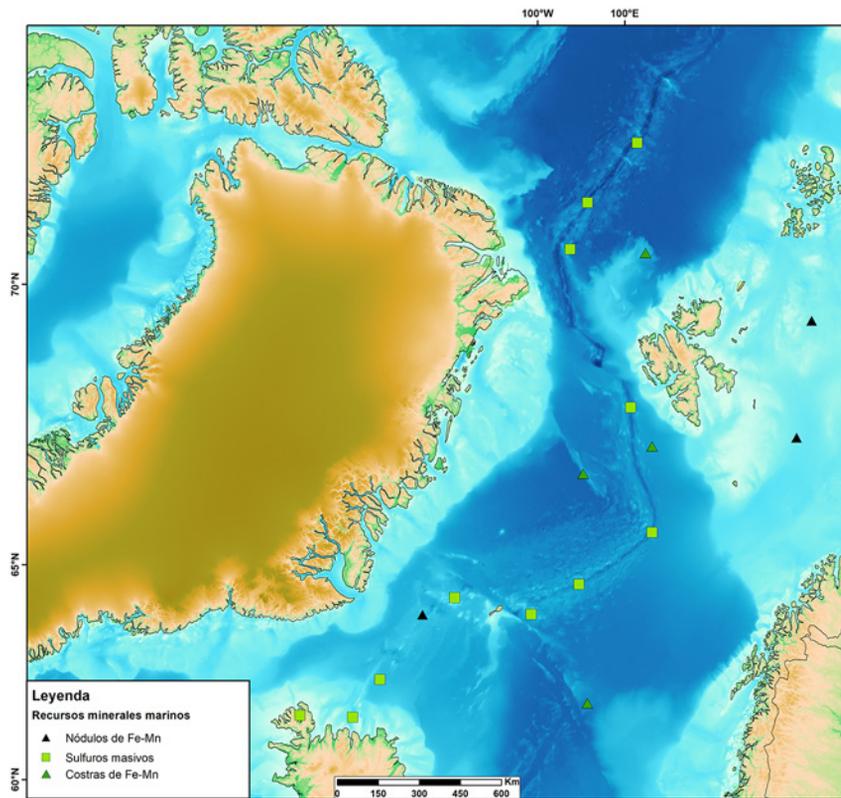


Figura 12. Localización de los principales recursos minerales marinos en los mares de Noruega, Islandia y Groenlandia

⁷⁴ González, F. J., Marino, E., Somoza, L., Medialdea, T., Lobato, A., Blasco, I., Kuhn, T., Ruehlemann, C., Ferreira, P., Magalhaes, V., Hein, J. R. y Cherkashov, G. (2021). Deliverable 4.4: Models of formation for the main provinces of ferromanganese crusts and phosphorites. *GeoERA*. MINDeSEA project. 67 pp. Disponible en: <https://geoera.eu/projects/mindesea2/>

⁷⁵ Ferreira, P., Moniz, C., González, F. J., Nyberg, J., Kuhn, T., Ruehlemann, C., Marino, E., Melnyk, I., Malyuk, B. y Magalhaes, V. (2021). Deliverable 6.2: Report of the poly-metallic nodules prospect evaluation parameters that will be employed as a road map

3.4.3. Groenlandia

Las evidencias de presencias de sulfuros masivos en aguas danesas se encuentran asociadas esencialmente al Gakkel Ridge entre 81 y 85 °N, estos datos han sido recopilados de la database de InterRidge pero no tienen asociada ninguna evaluación de los depósitos⁷⁶ (véase figura 12).

3.4.4. Alaska-Rusia

En los mares de Alaska se han encontrado costras de Fe-Mn asociadas a la elevación submarina de Mendeleev en el mar de Chukchi. Estas muestras aparecen más enriquecidas en Fe y con una mayor cantidad de detritos siliciclásticos (Baturin *et al.*, 2014). En esta misma área se han encontrados campos de nódulos asociados a la presencia del Chukchi Graben y la presencia de llanuras con espesores de sedimentos (Kolesnik and Kolesnik, 2015; Sattarova *et al.*, 2022).

4. Conclusiones

En este capítulo se ha querido dar una visión general de la potencialidad del Ártico como gran almacén de yacimientos tanto de recursos minerales como energéticos. Como se ha visto, son regiones muy ricas en recursos conocidos y que, además, han sido poco exploradas, por lo que es muy posible que existan depósitos todavía no descubiertos. Todo apunta a que los mayores depósitos se encontrarán próximos a los ya localizados, así como a mayor profundidad que estos.

Con el crecimiento de la población global y su nivel de vida, la demanda de materias primas, minerales y energéticas aumentará inevitablemente. Si bien, a nivel global, se está intentando aliviar el mercado por otros medios, como el reciclado de materias primas o las energías renovables, gobiernos y grandes empresas están mostrando un interés cada vez mayor en esta zona del planeta.

for the creation of the polymetallic nodules occurrence database. *GeoERA*. MINDeSEA project. 52 pp. Disponible en: <https://geoera.eu/projects/mindesea2/>

⁷⁶ Schiellerup, H., Ferreira, P., González, F.J., Marino E., Somoza, L. y Medialdea, T. (2021). Deliverable 3.3: Metallogeny of hydrothermal deposits in European waters. *GeoERA*. MINDeSEA project. 66 pp. Disponible en: <https://geoera.eu/projects/mindesea2/>

Las nuevas tecnologías han hecho posible realizar exploraciones en zonas del Ártico inalcanzables hace tan solo décadas. Además, el calentamiento global y el deshielo de grandes superficies podrían permitir la explotación de recursos minerales en un futuro no muy lejano en dichas zonas.

Esta riqueza de recursos ha sido la causa de numerosos conflictos y se podría decir que ha tenido y tiene un gran peso en el devenir de los acontecimientos en la actualidad. En el Ártico, el conflicto principal parte de las discrepancias entre los límites de la plataforma continental de los respectivos países, que como se ha explicado, según la Convención de las Naciones Unidas sobre Derechos del Mar (CNUDM) pueden ampliarse siempre y cuando un país demuestre que dicha plataforma se extiende más allá de las 200 millas náuticas de soberanía. Actualmente, es la riqueza energética del fondo marino la que ha incrementado la batalla por los derechos para su explotación.

Lo que intentan hacer Canadá, Rusia y Dinamarca para el caso del Polo Norte es demostrar que su plataforma continental se extiende más allá de esas 200 millas náuticas. En el caso del archipiélago de Svalbard y mar de Barents, Noruega y Rusia han acordado pacíficamente sus límites marítimos en aguas árticas, aunque China ha mostrado grandes intereses en las islas. Canadá, sin embargo, ha sido objeto de conflictos por la soberanía de las aguas que rodean sus islas en el norte. Las islas pertenecen a Canadá, pero no está del todo clara la soberanía sobre las aguas que las rodean. Dichas aguas se podrían considerar estratégicas tanto como corredor, como por los potenciales recursos de su fondo marino.

Por último, otro de los casos que más tensiones ha provocado es la soberanía por la Dorsal de Lomonósov. En 2007 Rusia plantó su bandera en el Polo Norte, pretendiendo establecer así que la cordillera Lomonósov era una extensión de su plataforma. Este hecho encendió la alarma en el resto de los países reclamantes de derechos. Dinamarca, Noruega, Canadá y EE. UU., a través de Alaska, llevan a cabo también investigaciones encaminadas a demostrar que la cordillera Lomonósov es la continuación de sus respectivas plataformas.

Pero no solo los conflictos tienen que ver con las reclamaciones de soberanía en los fondos marinos. En el caso concreto de Groenlandia, donde se está fundiendo la capa de hielo que recubre la isla, varios países han mostrado un mayor interés e inten-

tan hacerse con el control de sus recursos. En concreto, Rusia, EE. UU y China parecen ser los más interesados.

Se hace, por tanto, imprescindible una legislación que sirva para sofocar los posibles conflictos. Un gran avance tuvo lugar en 1996, cuando fue establecido el Consejo Ártico⁷⁷, con Canadá, Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega, Rusia y EE. UU., como miembros, seis organizaciones indígenas como participantes permanentes, seis grupos de trabajo y treinta y ocho observadores (entre los que se encuentra España). Este foro de alto nivel tiene como objetivo promover la cooperación, coordinación y la interacción entre Estados, pueblos indígenas y resto de habitantes y coordina programas sobre un desarrollo sostenible y la protección medioambiental en el Ártico.

Finalmente, la exploración de recursos minerales marinos tiene que considerarse una base científica de conocimientos sobre los fondos marinos y en especial en una zona tan desconocida como el Ártico. La minería marina se encuentra en las primeras fases de su desarrollo en las que todavía se está estudiando la tecnología para su futura explotación. Hay que tener claro que como en los ambientes terrestres, cualquier tipo de actividad minera necesita de estudios ambientales exhaustivos para identificar todos los posibles efectos que esta pueda tener en los diferentes hábitats y desarrollar una metodología adecuada para su puesta en funcionamiento.

Está claro que debe encontrarse un equilibrio entre la protección de determinadas zonas y ecosistemas, como el Ártico, y la necesidad real que existe de explotar los recursos naturales que contienen. El Ártico puede ofrecer grandes oportunidades, pero se debe asegurar asimismo, que su aprovechamiento se realiza de una forma responsable y siempre y cuando se eviten conflictos tanto políticos, como ambientales y sociales.

⁷⁷ Página oficial Arctic Council. Disponible en: <https://arctic-council.org/en/>

Bibliografía

- Baturin, G. N., Dubinchuk, V. T., (2011). *Mineralogy and chemistry of ferromanganese crusts from the Atlantic Ocean. Geochem. Int.* 49 (6), pp. 578-593.
- Baturin, G. N., Dubinchuk, V. T., Ivanov, G. I., Siraev, A. I. (2014). *A specific type of Fe-Mn mineralization on the Arctic seafloor. Dokl. Earth Sci.* 458(2), pp. 1191-1196.
- Bau, M., Schmidt, K., Koschinsky, A. *et al.* (2014). Discriminating between different genetic types of marine ferro-manganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium. *Chemical. Geology.* 381: 1-9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.004>
- Bogdanov, Y. A., Sorochtin, O. G., Zonenshain, L. P. *et al.* (1990). *Ferromanganese Crust and Nodules of Pacific Seamounts*, Nauka: Moscow, Russia, p. 229.
- Bogdanov, Y. A., Bogdanova, O. Y., Dubinin, A. V. *et al.* (1995). Composition of ferromanganese crusts and nodules at north-west Pacific guyots and geologic and paleoceanographic considerations. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results* 144, Haggerty, J. A., Premoli Silva, I., Rack, F. R., McNutt, M. K. (eds.). Ocean Drilling Program: College Station, TX, USA, p. 1059.
- Bogdanova, O. Y., Gorshkov, A. I., Novikov, G. V. y Bogdanov, Y.A. (2008). Mineralogy of morphogenetic types of ferromanganese deposits in the world ocean. *Geology of Ore Deposits*, 50, pp.462-469.
- Dubinin, A. V., Kuznetsov, E. V., Rimskaya-Korsakova, M. N. *et al.* (2022). Comparative Characteristics of Fe-Mn Crusts from the Arctic and Atlantic Oceans. *Oceanology* 62, pp. 231-246. Disponible en: <https://doi.org/10.1134/S0001437022020059>
- Emery, K.O. y Noakes, L.C. (1968). *Economic placer deposits of the continental shelf: United Nations Economic Commission for Asia and the Far East*. Committee for Coordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas, Technical Bulletin, v.1, pp. 95-111.
- Emory-Moore, M. y Solomon, S. (1989). *Placer gold potential offshore Newfoundland: A preliminary assessment*. Current Research, Newfoundland Department of Mines, Geological Survey of Newfoundland, Report 89-1, pp. 229-236.

- Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R. y Galley, A. G. (2005). Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp. 523-560.
- German, C. R., Petersen, S. y Hannington, M. D. (2016). Hydrothermal exploration of mid-ocean ridges: Where might the largest sulfide deposits be forming? *Chemical Geology* 420, pp. 114-126. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.11.006>
- González, F. J., Somoza, L., Hein, J. R. et al. (2016). Phosphorites, Co-rich Mn nodules, and Fe-Mn crusts from Galicia Bank, NE Atlantic: reflections of Cenozoic tectonics and paleoceanography. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 17. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/2015GC005861>
- González, F. J., Medialdea, T., Schillerup, H. et al. (2022). MIND-eSEA – Exploring Seabed Mineral Deposits in European Seas, Metallogeny and Geological Potential for Strategic and Critical Raw Materials. En: *The Green Stone Age: Exploration and Exploitation of Minerals for Green Technologies*. Geological Society of London Special Publication, 250.
- Hannington, M. D., De Ronde, C. E. J. y Petersen, S. (2005). Sea-Floor Tectonics and Submarine Hydrothermal Systems. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, pp. 111-141.
- Hannington, M. D., Jamieson, J., Monecke, T. y Petersen, S. (2010). *Modern seafloor massive sulfides and base metal resources: Towards an estimate of global seafloor massive sulfide potential*. Society of Economic Geologists Special Publication 15, pp. 317-338
- Hannington, M. D., Jamieson, J., Monecke, T. et al. (2011). The abundance of seafloor massive sulfide deposits. *Geology* 39, pp.1155-1158. Disponible en: [doi: 10.1130/G32468.1](https://doi.org/10.1130/G32468.1)
- Harben, P. W. y Bates, R.L. (1990). Industrial minerals: geology and world deposits. *Metal Bulletin Plc*.
- Hein, J. R., Koschinsky, A., Halbach, P. et al. (1997). *Iron and manganese oxide mineralization in the Pacific*. Geological Society London Special Publications, 119, pp.123-138
- Hein, J. R., Koschinsky, A., Bau, M. et al. (2000). Co-rich ferromanganese crusts in the Pacific. In *Handbook of Marine Mineral Deposits*, CRC Marine Science Series, Cronan, D.S. (ed.). CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pp. 239-279
- Hein, J. R., Koschinsky, A. y Halliday, A. N. (2003). Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a

- model for the enrichment of tellurium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (6), pp. 1117-1127. doi: 10.1016/s0016-7037(02)01279-6
- Hein, J. R., Mizell, K., Koschinsky, A. y Conrad, T. A., (2013). Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: comparison with land-based resources. *Ore Geology. Reviews*. 51: 1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001>
- Hein, J. R. y Koschinsky, A. (2014). Deep-ocean ferromanganese crusts and nodules. En: Turekian, H.D.H.K. (ed.). *Treatise on Geochemistry*, second edition Elsevier, Oxford, pp. 273-291.
- Hein, J. R., Konstantinova, N., Mikesell, M. et al. (2017). Arctic deep-water ferromanganese-oxide deposits reflect the unique characteristics of the Arctic Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18, pp. 3771-3800. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/2017GC007186>.
- Ihlen, P. M., Shiellerup, H., Gautneb, H. y Skår, Ø. (2014). Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential - A review. *Ore Geology Reviews*. 58, pp. 126-147.
- Ivanova, A. M., Ushakov, V. I., Cherkasov, G. A., Smirnov, A. N. (1999). Placer Minerals of the Russian Arctic Shelf. *Polarforschung*, 69, pp. 163-167.
- Kartashov, I. P. (1971). Geological features of alluvial placers. *Economic Geology*, 66, pp. 879-885
- Kolesnik, O. N., Kolesnik, A. N. (2015). Rare earth elements in ferromanganese nodules of the Chukchi Sea. *Lithology and Mineral Resources*, 50 (3), pp-181-191. Disponible en: doi: 10.1134/s0024490215030050
- Konstantinova, N., Cherkashov, G., Hein, J. R. et al. (2017). Composition and characteristics of the ferromanganese crusts from the western Arctic Ocean. *Ore Geology. Reviews*, 87, pp. 88-99, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.011>.
- Koschinsky, A. y Halbach, P. (1995). Sequential leaching of marine ferromanganese precipitates: Genetic implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(24), pp. 5113-5132. Disponible en: [https://doi:10.1016/0016-7037\(95\)00358-4](https://doi:10.1016/0016-7037(95)00358-4)
- Kowalczyk, P. B., Snook, B., Kleiv, R. A. y Aasly, K. (2018). Efficient extraction of copper and zinc from seafloor massive sulphide rock samples from the Loki's Castle area at the Arctic

- Mid-Ocean Ridge. *Minerals Engineering*, 115, pp.106-116. Disponible en: <https://doi: 10.1016/j.mineng.2017.10.015>
- Kravchishina, M. D., Kuznetsov, A. B., Baranov, B. V. *et al.* (2022). Hydrothermal Genesis of Fe-Mn Crust in the Southernmost Segment of the Mohns Ridge, Norwegian Sea: REE Geochemistry and Sr and Nd Isotopic Composition. *Doklady Earth Sciences* 506, pp. 734-739. Disponible en: <https://doi.org/10.1134/S1028334X22600530>
- Lim, A., Brønner, M. M., Johansen, S. E. y Dumais, M. A. (2019). *Hydrothermal Activity at the Ultraslow-Spreading Mohns Ridge: New Insights From Near-Seafloor Magnetics*. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019GC008439>
- Manceau, A. y Combes, J. M. (1998). Structure of Mn and Fe oxides and oxyhydroxides: A topological approach by EXAFS. *Physics and Chemistry of Minerals*, 15: 283. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00307518>
- Manceau, A., Drits, V. A., Silvester, E., Bartoli, C. y Lanson, B. (1997). Structural mechanism of Co²⁺ oxidation by the phyllosulfate buserite. *American Mineralogist*, 82 (11-12): 1150-1175.
- Manceau, A., Lanson, M., Takahashi, Y. (2014). Mineralogy and crystal chemistry of Mn, Fe, Co, Ni, and Cu in a deep-sea Pacific polymetallic nodule. *American Mineralogist* 99: 2068-2083.
- Marino, E. 2020. *Costras de Ferromanganeso ricas en cobalto de los Montes Submarinos al Suroeste de las Islas Canarias: Mineralogía y Geoquímica de Elementos Estratégicos y Críticos*. [Tesis doctoral], 502 pp.
- Marino, E., González, F. J., Somoza, L. *et al.* (2017). Strategic and rare elements in Cretaceous-Cenozoic cobalt-rich ferromanganese crusts from seamounts in the Canary Island Seamount Province (northeastern tropical Atlantic), *Ore Geology Reviews*. Disponible en: <https://doi: 10.1016/j.oregeorev.2016.10.00>
- Muñoz, S. B., Hein, J. R., Frank, M. *et al.* (2013). Deep-sea Fe-Mn crusts from the Northeast Atlantic Ocean: composition and resource considerations. *Marine Georesources. Geotechnology*. 31 (1): 40-70. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/1064119X.2012.661215>.

- Murray, J. y Renard, A. F. (1891). *Manganese Deposits From the HMS Challenger Stations Supplement to: Murray, John, Renard, A. F. (1891): Deep-sea Deposits (Based on the Specimens Collected During the Voyage of HMS Challenger in the Years 1872 to 1876). Report on the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. Challenger During the Years 1873–76*. John Menzies and Co. Edinburgh, United Kingdom. Enlace original. Disponible en: <http://www.vliz.be/nl/open-marienarchief?module=ref&refid=41584> (688 pp (pdf 252 Mb), hdl: 10013/epic.45942.d002: PANGAEA)
- Murton, B. J., Parsons, L-M., Hunter, P. y Miles, P. (2000). *Global Non-Living Resources on the Extended Continental Shelf: Prospects at the Year 2000*. International Seabed Authority, Technical Study N.º 1, Kingstown, Jamaica, 161 pp.
- Post, J. E. (1999). *Manganese oxide minerals: Crystal structures and economic and environmental significance*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 96, pp. 3447–3545.
- Petersen, S., Krättschell, A., Augustin, N. et al. (2016). News from the seabed: Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy* 70, 175–187. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2016.03.012>
- Petersen, S., Lehrmann, B. y Murton, B. J. (2018). Modern Seafloor Hydrothermal Systems: New Perspectives on Ancient Ore-Forming Processes. *Elements* 14, 307–312. Disponible en: <https://DOI: 10.2138/gselements.14.5.307>
- Sattarova, V. V., Aksentov, K. I., Ivanov, M. V. et al. (2022). Distribution and assessment of trace metals in modern bottom sediments in the southwestern Chukchi Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 180, 113797. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113797>.
- Shulga, N., Abramov, S., Klyukina, A. et al. (2022). Fast-growing Arctic Fe–Mn deposits from the Kara Sea as the refuges for cosmopolitan marine microorganisms. *Scientific Reports* 12, 21967. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23449-6>
- Singer D. A. (1995). World class base and precious metal deposits—a quantitative analysis. *Economic Geology* 90, pp. 88-104
- Snook, B., Drivenes, K., Rollinson, G. K. y Aasly, K. (2018). Characterisation of Mineralised Material from the Loki’s Castle Hydrothermal Vent on the Mohn’s Ridge. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2075-163X/8/12/576>.

- Von Stackelberg, U. y Marchig, V. (1987). Manganese nodules from the Equatorial North Pacific Ocean. *Geology Jahrbuch*, D87: 123-227.
- Von Stackelberg, U. (1997). Growth history of manganese nodules and crusts of the Peru Basin. En: Nicholson, K. (ed.). *Manganese mineralization: geochemistry and mineralogy of terrestrial and marine deposits. Geological Society Special Publications*, 119. Geological Society of London, pp. 153-176.
- Von Stackelberg, U. (2000). Manganese nodules of the Peru Basin. En: Cronan, D.S. (Ed.), *Handbook of Marine Mineral Deposits*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 197-238.
- Wegorzewski, A. V. y Kuhn, T.(2014). The influence of suboxic diagenesis on the formation of manganese nodules in the Clarion Clipperton nodule belt of the Pacific Ocean. *Marine Geology*, 357, pp. 123-138.