

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

---

# POTENCIAL GEOLÓGICO DE MINERALES CRÍTICOS Y/O ESTRATÉGICOS EN CHILE

Aníbal Gajardo C.  
Braulio Águila A.  
Claudia Arredondo C.  
Nicolás Cádiz T.  
Rodrigo Carrasco O.  
Alejandro Díaz C.  
Roxana Ortega B.  
Sandra Piñana M.



---

INFORME REGISTRADO IR-24-119

SUBDIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA

2024

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

---

# POTENCIAL GEOLÓGICO DE MINERALES CRÍTICOS Y/O ESTRATÉGICOS EN CHILE

Aníbal Gajardo C.  
Braulio Águila A.  
Claudia Arredondo C.  
Nicolás Cádiz T.  
Rodrigo Carrasco O.  
Alejandro Díaz C.  
Roxana Ortega B.  
Sandra Piñana M.



INFORME REGISTRADO IR-24-119

SUBDIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA

2024

---

## **POTENCIAL GEOLÓGICO DE MINERALES CRÍTICOS Y/O ESTRATÉGICOS EN CHILE**

### **INFORME REGISTRADO IR-24-119**

Inscripción No. 2024-A-12661

© Servicio Nacional de Geología y Minería, Avda. Santa María 0104, Santiago, Chile.

Director Nacional: Patricio Aguilera P.

Subdirector Nacional de Geología: Mauricio Lorca M.

Derechos reservados. Prohibida su reproducción.

#### **Edición**

Este informe no ha sido editado en conformidad con los estándares y/o nomenclatura de la Subdirección Nacional de Geología, del Servicio Nacional de Geología y Minería.

Corrección idiomática: Soraya Amar N., Claudia Gómez D.

#### **Apoyo financiero**

Fondos sectoriales del Servicio Nacional de Geología y Minería.

#### **Referencia bibliográfica**

Gajardo A.; Águila B.; Arredondo C.; Cádiz, N.; Carrasco, R.; Díaz, A.; Ortega R.; Piñana, S. 2024. Potencial geológico de minerales críticos y/o estratégicos en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-24-119 (Inédito): 108 p. Santiago.

---

## CONTENIDO

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	9
2. DESCRIPCIÓN DE MINERALES CRÍTICOS Y ESTRATÉGICOS .....	11
3. METODOLOGÍA .....	13
4. CATEGORIZACIÓN DE MINERALES .....	16
4.1. PRIMER GRUPO .....	16
4.1.1. Cobre-molibdeno-renio (Cu-Mo-Re) .....	16
4.1.1.1. Contexto geológico de los depósitos de cobre y elementos asociados, en el mundo y en Chile .....	16
4.1.1.2. Producción mundial y nacional de cobre, molibdeno y renio .....	26
4.1.1.3. Recursos y reservas de cobre, molibdeno y renio en el mundo y en Chile .....	28
4.1.1.4. Prospectos y cartera de proyectos de cobre .....	30
4.1.1.5. Potencial prospectivo del cobre .....	32
4.1.2. Litio-potasio-boro (Li-K-B) .....	35
4.1.2.1. Contexto geológico de los depósitos salinos de litio, potasio y boro en el mundo y en Chile .....	46
4.1.2.2. Producción mundial y nacional de litio, potasio y boro .....	38
4.1.2.3. Recursos y reservas de litio, potasio y boro en el mundo y en Chile .....	43
4.1.2.4. Prospectos y cartera de proyectos de litio .....	46
4.1.2.5. Potencial prospectivo de litio .....	47
4.2. SEGUNDO GRUPO .....	50
4.2.1. Cinc (Zn) .....	50
4.2.1.1. Contexto geológico de los depósitos de cinc en el mundo y en Chile .....	50
4.2.1.2. Producción mundial y nacional de cinc .....	52
4.2.1.3. Recursos y reservas de cinc en el mundo y en Chile .....	53
4.2.1.4. Prospectos y cartera de proyectos de cinc .....	54
4.2.2. Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....	55
4.2.2.1. Contexto geológico de los depósitos salinos de nitratos en el mundo y en Chile .....	56
4.2.2.2. Producción mundial y nacional de nitratos .....	56
4.2.2.3. Recursos y reservas de nitratos en el mundo y en Chile .....	57
4.2.2.4. Prospectos y cartera de proyectos de nitratos .....	57
4.2.3. Yodo (I) .....	57
4.2.3.1. Contexto geológico de los depósitos salinos de yodo en el mundo y en Chile .....	58
4.2.3.2. Producción mundial y nacional de yodo .....	58
4.2.3.3. Recursos y reservas de yodo en el mundo y en Chile .....	59
4.2.3.4. Prospectos y cartera de proyectos de yodo .....	60
4.3. TERCER GRUPO .....	60
4.3.1. Cobalto (Co) .....	61
4.3.1.1. Contexto geológico de los depósitos de cobalto en el mundo y en Chile .....	61
4.3.1.2. Producción mundial y nacional de cobalto .....	64

4.3.1.3. Recursos y reservas de cobalto en el mundo y en Chile. ....	66
4.3.1.4. Prospectos y cartera de proyectos de cobalto .....	67
4.3.1.5. Potencial prospectivo de cobalto .....	68
4.3.2. Elementos de tierras raras (ETR) .....	70
4.3.2.1. Contexto geológico de los depósitos ETR en el mundo y en Chile.....	71
4.3.2.2. Producción mundial y nacional de ETR.....	72
4.3.2.3. Recursos y reservas de ETR en el mundo y en Chile .....	73
4.3.2.4. Prospectos y cartera de proyectos de ETR .....	75
4.3.2.5. Potencial prospectivo de ETR .....	78
4.3.3. Titanio (Ti) .....	80
4.3.3.1. Contexto geológico de los depósitos de titanio en el mundo y en Chile .....	80
4.3.3.2. Producción mundial y nacional de titanio .....	81
4.3.3.3. Recursos y reservas de titanio en el mundo y en Chile .....	82
4.3.3.4. Prospectos y cartera de proyectos de titanio .....	83
4.3.3.5 Potencial prospectivo de titanio .....	84
4.4. CUARTO GRUPO .....	84
4.4.1. Manganeseo (Mn) .....	85
4.4.1.1. Contexto geológico de los depósitos de manganeseo en el mundo y en Chile ....	85
4.4.1.2. Producción mundial y nacional de manganeseo .....	86
4.4.1.3. Recursos y reservas de manganeseo en el mundo y en Chile .....	87
4.4.1.4 Prospectos y cartera de proyectos de manganeseo .....	89
4.5. QUINTO GRUPO .....	89
4.5.1. Níquel (Ni) .....	89
4.5.2. Cromo (Cr) .....	90
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	91
5.1. Conclusiones .....	91
5.2. Recomendaciones.....	93
6. AGRADECIMIENTOS .....	94
7. REFERENCIAS .....	95

## FIGURAS

FIG. 1. Ranking de los cinco países con mayores reservas de cobre año 2023 (USGS, 2024) y sus principales tipos de depósitos. Se detallan reservas actualizadas de algunos de los depósitos de cobre de mayor relevancia en Chile (Modificado de Sillitoe, 2012).....	18
FIG. 2. Perfil esquemático en dirección O-E, norte de Chile (regiones de Antofagasta y Atacama), con contexto geotectónico y tipos de depósitos metalíferos relacionados con el arco magmático Jurásico-Cretácico (cordillera de la Costa), Eoceno-Oligoceno (cordillera de Domeyko) y Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (cordillera Principal).....	23
FIG. 3. Perfil esquemático transversal O-E, Chile centro-norte (regiones de Coquimbo a O'Higgins), con contexto geotectónico y tipo de depósitos metalíferos relacionados con los arcos magmáticos Jurásico-Cretácico (cordillera de la Costa) y Mioceno-Plioceno (cordillera Principal) .....	24

FIG. 4.	Distribución de franjas metalogénicas y potencial geológico de minerales críticos y/o estratégicos de Chile .....	25
FIG. 5.	Contenido de cobre según franja metalogénica con base en los recursos existentes. Fuente: este trabajo, con información compilada de reportes de compañías mineras y publicaciones de acceso libre .....	33
FIG. 6.	Contenido de cobre según franja metalogénica y tipos de depósitos .....	33
FIG. 7.	Perfil esquemático de los procesos geológicos relacionados en la formación de salares y su enriquecimiento de litio. Fuente: este trabajo .....	37
FIG. 8.	Distribución de depósitos y producción de ETR, categorizado por tipos de depósitos y estado de avance del yacimiento .....	72

## TABLAS

Tabla 1.	Listados de elementos o minerales críticos según país o conglomerado.....	12
Tabla 2.	Criterios y Grupos de los 15 minerales críticos y/o estratégicos considerados en este estudio .....	15
Tabla 3.	Producción de cobre y molibdeno contenidos en algunos de los depósitos tipo pórfido cuprífero, estratoligados de cobre e IOCG andinos, más importantes de Chile, año 2023. ....	19
Tabla 4.	Producción mundial de cobre, años 2022 y 2023 .....	26
Tabla 5.	Producción nacional de cobre (tmf), años 2019-2023.....	26
Tabla 6.	Producción mundial de molibdeno, años 2022 y 2023.....	27
Tabla 7.	Producción mundial de renio, años 2022 y 2023 .....	27
Tabla 8.	Producción nacional de molibdeno y renio, años 2019-2023 .....	28
Tabla 9.	Reserva mundial de cobre, años 2022 y 2023 .....	29
Tabla 10.	Reserva mundial de molibdeno, años 2022 y 2023 .....	29
Tabla 11.	Reserva mundial de renio, años 2022 y 2023 .....	30
Tabla 12.	Principales proyectos de exploración greenfield en diferentes tipos de depósitos de Cu y Cu-Mo, con estimación de recursos .....	31
Tabla 13.	Proyectos de recuperación de Cu desde relaves.....	34
Tabla 14.	Producción mundial de litio y tipo de depósito, años 2022 y 2023 .....	38
Tabla 15.	Producción nacional de compuestos de litio (t), años 2019 a 2023.....	39
Tabla 16.	Producción mundial de potasio y tipos de depósitos, años 2022 y 2023.....	40
Tabla 17.	Producción nacional de compuestos de potasio (t), años 2019 a 2023.....	40
Tabla 18.	Producción mundial de boro y tipos de depósitos, años 2022 y 2023 .....	41
Tabla 19.	Producción nacional de compuestos de boro (t), años 2019 a 2023 .....	42
Tabla 20.	Reserva mundial de litio, años 2022 y 2023 .....	43
Tabla 21.	Reserva mundial de potasio, años 2022 y 2023 .....	44
Tabla 22.	Reserva mundial de boro, años 2022 y 2023.....	44
Tabla 23.	Reservas y recursos de litio y potasio de la empresa SQM en el salar de Atacama .....	45
Tabla 24.	Reservas y recursos de litio de la empresa Albemarle en el salar de Atacama.....	46
Tabla 25.	Listado de salares/lagunas en explotación y prospectos por litio en Chile .....	47

Tabla 26. Salares para desarrollar proyectos con participación mayoritaria del Estado .....	49
Tabla 27. Salares para habilitar proyectos liderados por empresas del Estado .....	49
Tabla 28. Producción mundial de cinc y tipos de depósitos, años 2022 y 2023 .....	52
Tabla 29. Producción nacional de concentrados de cinc (tmf) por región, años 2019 a 2023 .....	53
Tabla 30. Reserva mundial de cinc, años 2022 y 2023 .....	53
Tabla 31. Recursos y reservas de cinc de Minera Florida (Alhué).....	54
Tabla 32. Proyectos de exploración avanzada por cinc .....	55
Tabla 33. Producción nacional de nitratos (t) por región, años 2019 a 2023.....	57
Tabla 34. Producción mundial de yodo, años 2022 y 2023 .....	59
Tabla 35. Producción nacional de yodo (t) por región, años 2019 a 2023.....	59
Tabla 36 Reserva mundial de yodo, años 2022 y 2023 .....	60
Tabla 37. Producción mundial de cobalto y tipos de depósitos, años 2022 y 2023.....	65
Tabla 38. Reserva mundial de cobalto, años 2022 y 2023 .....	66
Tabla 39. Producción mundial de ETR y tipos de depósitos, años 2022 y 2023 .....	73
Tabla 40. Reserva mundial de ETR, años 2022 y 2023.....	74
Tabla 41. Estimación de recursos en prospectos de ETR en Chile .....	74
Tabla 42. Estimación de recursos, según categorías, del proyecto Módulo Penco.....	76
Tabla 43. Estimación de recursos, según categorías, del prospecto Cerro Carmen.....	77
Tabla 44. Producción mundial de titanio, años 2022 y 2023.....	81
Tabla 45. Reserva mundial de titanio, años 2022 y 2023 .....	82
Tabla 46. Prospectos de titanio hospedados en roca en Chile y estimación de recursos .....	84
Tabla 47. Producción mundial de manganeso, años 2022 y 2023 .....	87
Tabla 48. Reserva mundial de manganeso, años 2022 y 2023 .....	88
Tabla 49. Estimación de recursos de manganeso del proyecto Los Pumas .....	88
Tabla 50. Potencial de Minerales Críticos y/o Estratégicos en Chile relacionados con la Transición Energética y la Seguridad Alimentaria.....	93

## RESUMEN

En el marco de la Política Nacional Minera 2050 (PNM 2050), cuyo objetivo es “aprovechar la riqueza geológica del país y transformarla en un mayor desarrollo, de la mano de minerales que son esenciales para el uso de tecnologías limpias, además de aportar a una mayor inclusión, justicia social y mayor sostenibilidad ambiental para el país y los territorios donde opera”, el Ministerio de Minería de Chile solicitó la elaboración de un estudio diagnóstico de minerales críticos y/o estratégicos del país, que fue realizado en forma colaborativa por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) y la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), con la finalidad de generar sinergias entre ambas instituciones y contribuir a la futura Estrategia Nacional de Minerales Críticos y/o Estratégicos.

El estudio diagnóstico fue organizado en dos capítulos: el primero, elaborado por Cochilco, se focalizó en la demanda; el segundo, realizado por Sernageomin, se orientó a la oferta y corresponde a una caracterización del potencial geológico de los minerales críticos y/o estratégicos de Chile, basada en el conocimiento geológico del territorio nacional y en la distribución de sus depósitos de principal interés, y representa el primer intento por caracterizar el potencial geológico-minero del país respecto de estos minerales. Con base en los listados de minerales críticos y/o estratégicos elaborados y publicados por países industrializados, consumidores y/o productores (p. ej., EE. UU., China, Australia, Canadá, y países europeos), y en la experiencia profesional y el conocimiento geológico y metalogénico, existentes en Sernageomin respecto de los diferentes tipos de depósitos minerales del territorio nacional, se identificaron 15 minerales críticos y estratégicos, los cuales se analizaron y organizaron en este estudio. Para ello se utilizaron los siguientes criterios: contexto geológico, producción minera mundial y nacional, recursos y reservas mundiales y nacionales, proyectos de exploración y explotación, potencial prospectivo del territorio nacional, transición energética y seguridad alimentaria, incidencia en la economía del país y riesgo de suministro.

Lo anterior permitió establecer una categorización de estos 15 minerales en 5 grupos: primero: cobre (Cu), molibdeno (Mo), renio (Re), litio (Li), potasio (K) y boro (B); segundo: cinc (Zn), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y yodo (I); tercero: cobalto (Co), elementos de tierras raras (ETR) y titanio (Ti); cuarto: manganeso (Mn) y quinto: níquel (Ni) y cromo (Cr). Esta categorización



deberá utilizarse para definir los minerales críticos y/o estratégicos que Chile incluirá en su futura Estrategia de Minerales Críticos y/o Estratégicos.

La importancia actual y futura de estos minerales, en el país y en el mundo, requiere desarrollar e incrementar el conocimiento y el entendimiento de las características geológicas y metalogénicas, al igual que de la distribución de los depósitos que los contienen. Ello permitirá tanto definir con mayor precisión, los factores geológicos, geomorfológicos, estructurales y climáticos que determinan la formación de yacimientos de interés económico como identificar nuevas fuentes de minerales que contribuyan a satisfacer los crecientes requerimientos en materias ambientales.

De acuerdo con lo expuesto en este estudio, Chile tiene muy buenas a excelentes perspectivas para la existencia de un número importante de los minerales críticos y/o estratégicos descritos mundialmente. Ello podrá permitirle al país integrar la línea de suministro de un número importante de estos minerales cuya demanda será objeto de un fuerte incremento, en el corto, mediano y largo plazo, debido, principalmente, a los requerimientos de la transición energética y la seguridad alimentaria.

## **ABSTRACT**

Within the framework of the National Mining Policy 2050 (PNM 2050), whose objective is “to take advantage of the country’s geological wealth, and transform it in a greater development, based on minerals which are essential in clean technologies, and also to contribute to a greater inclusion, social justice and greater environmental sustainability for the country and the territories where it operates”, the Chilean Ministry of Mining requested a diagnostic study of critical and/or strategic minerals of the country. This study was carried out by the National Geology and Mining Service (Sernageomin) and the Chilean Copper Commission (Cochilco), with the aim to generate synergies between both institutions and to contribute to the future National Strategy for Critical and/or Strategic Minerals.

The diagnostic study was organized in two chapters: the first prepared by Cochilco, was focused on demand; the second, carried out by Sernageomin, was supply-oriented and characterize the geological potential of Chile's critical and/or strategic minerals, based on the geological knowledge of the national territory and the distribution of its deposits of main interest, and represents the first attempt to characterize the country's geological-mining potential with respect to these minerals.

Based on the lists of critical and strategic minerals prepared and published by industrialized, consumer and/or producing countries (e.g., the United States, China, Australia, Canada, and European countries), and on Sernageomin's professional experience and geological and metallogenic knowledge regarding the different types of mineral deposits in the country, 15 critical and strategic minerals were identified. To analyze and organize them in this study, the following criteria were used: geological context, global and national mining production, global and national resources and reserves, exploration and exploitation projects, prospective potential of the national territory, energy transition and food security, impact on country's economy, and supply risk.

The above 15 minerals have been categorized in 5 groups: first: copper (Cu), molybdenum (Mo), rhenium (Re), lithium (Li), potassium (K) and boron (B); second: zinc (Zn), nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) and iodine (I); third: cobalt (Co), rare earth elements (REEs) and titanium (Ti); fourth: manganese (Mn) and fifth: nickel (Ni) and chromium (Cr). This categorization must be used to define the critical and/or strategic minerals that Chile will consider in its future Critical and/or Strategic Minerals Strategy.

The current and future importance of these minerals, both in Chile and worldwide, is based on developing and increasing the knowledge and understanding of the geological and metallogenic characteristics, as well as the distribution of the deposits that contain them. This will allow a more precise definition of the geological, geomorphological, structural and climatic factors that control the formation of deposits of economic interest, and also the identification of new sources of minerals that contribute to meet the growing environmental requirements of society.

According to what has been stated, Chile has very good to excellent perspectives for the existence of an important number of the critical and/or strategic minerals described worldwide. This may allow the country to integrate the supply line of a significant number of these minerals, whose demand will strongly increase in the short, medium and long term, mainly due to the requirements of the energy transition and food security.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El presente informe es el resultado del estudio del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), acerca del potencial chileno para la producción de diversos minerales que han sido definidos como críticos y estratégicos por otros países,

demandantes y/o productores de estos recursos. Forma parte de un estudio de diagnóstico solicitado por el Ministerio de Minería y fue realizado en conjunto con la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), en el marco de una alianza orientada a generar y potenciar sinergias entre ambas instituciones, y con el objeto de contribuir a la elaboración de la futura Estrategia Nacional de Minerales Críticos y/o Estratégicos. Este estudio ha sido organizado en dos secciones: Sernageomin asumió la elaboración de la oferta de estos minerales y Cochilco la demanda.

El incremento en la demanda mundial de recursos minerales ha sido considerable en las últimas décadas (IEA, 2021, 2024), en especial de aquellos destinados a la generación de energías limpias, hoy renovables, y a la electromovilidad. El suministro de estos minerales se podría ver afectado, en el largo plazo, por causas como el aumento de la demanda por la industria, el agotamiento o disminución de las reservas y la mayor incidencia de factores ambientales, sociales y/o geopolíticos.

Estos minerales, dependiendo de sus propiedades técnicas y funciones en los procesos industriales y tecnológicos, y en las economías de los países que los poseen y/o utilizan, han sido definidos como Minerales Críticos y Minerales Estratégicos, los que, además, han generado listados con el objeto de asegurar su suministro y satisfacer sus requerimientos internos (Kelley, 2020; Rowan, 2024; Australian Government, 2023; European Commission, 2023; Government of Canada, 2023; Chadha and Sivamani, 2022).

En dicho contexto, las características geológicas y los eventos metalogenéticos ocurridos durante la evolución geológica del territorio nacional han sido responsables de la formación de diversos tipos de depósitos que contienen recursos minerales que pueden ser catalogados como minerales críticos y/o minerales estratégicos, y que tienen amplia distribución en el país. Además, la mayoría de estos están en producción permanente y, algunos, con importante participación en las respectivas producciones mundiales (p. ej., primer lugar: cobre, renio y yodo; segundo lugar: molibdeno y litio).

En este informe se presenta un diagnóstico exploratorio de minerales críticos y/o estratégicos para Chile, de acuerdo con las particularidades geológicas del territorio nacional, que representa un primer intento de caracterizar el potencial geológico del país respecto de estos minerales, y de definir un listado preliminar de ellos, priorizado con base en el contexto geológico, la producción minera mundial y nacional, los recursos y reservas mundiales y nacionales, los proyectos de exploración y explotación, el potencial prospectivo del territorio nacional, la transición energética y seguridad alimentaria, la incidencia en la

economía del país y el riesgo de suministro. Para ello se ha tenido en consideración tanto los listados de minerales críticos y estratégicos publicados por países consumidores y/o productores de esos recursos como la experiencia profesional y el conocimiento geológico y metalogénico existente en Sernageomin respecto de los diferentes tipos de depósitos de recursos minerales del país.

## **2. DESCRIPCIÓN DE MINERALES CRÍTICOS Y ESTRATÉGICOS**

El concepto de minerales críticos surgió hace más de una década, en países industrializados como p. ej., Estados Unidos (EE. UU.), China y países de la Unión Europea (UE) para referirse a ciertos elementos o minerales económicamente importantes, necesarios para la elaboración de nuevas tecnologías y que no tienen reemplazo en las líneas productivas, o cuya escasez afectaría, o pondría en riesgo, las cadenas de suministro. Debido a que su producción o abastecimiento puede verse afectado por factores geopolíticos, el agotamiento de reservas conocidas y la concentración geográfica, ambiental y/o social. Los países impulsores del concepto son, además, líderes en las nuevas tecnologías necesarias para la transición energética y las metas globales de cero emisiones de gases de efecto invernadero (*net-zero by 2050*) (IEA, 2021). De acuerdo con lo anterior el énfasis está en que el concepto se asocia al flujo del suministro de un determinado elemento, su importancia relativa para el sector que se está analizando y sus posibles sustituciones.

La definición de los listados de minerales críticos es propia de cada país o conglomerado (Tabla 1) y se relaciona con las necesidades internas de cada nación, asociadas a la industria que los requiere, son listas dinámicas (Kelley, 2020; Rowan, 2024; Australian Government, 2023; European Commission, 2023; Government of Canada, 2023; Chadha y Sivamani, 2022).

De manera equivalente, y a la vez complementaria, se ha definido, también, el concepto de minerales estratégicos, desde la perspectiva de la oferta de tales recursos minerales, para aquellos países en los que su producción representa un ingreso importante en su economía, además de un alto potencial geológico (Zappettini, 2021; SGB, 2024). Tal es el caso de Chile, considerando que, actualmente, su rol en la cadena de suministro es de proveedor de materias primas, no obstante, tal situación podría cambiar en el futuro, como consecuencia de una industrialización del país.

**TABLA 1. LISTADOS DE ELEMENTOS O MINERALES CRÍTICOS SEGÚN PAÍS O CONGLOMERADO.**

Elemento/mineral	Símbolo/sigla	EE. UU.	EU	China	Australia	Canadá
Aluminio (bauxita)	Al	X	X	X	-	X
Antimonio	Sb	X	X	X	X	X
Arsénico	As	X	-	-	-	-
Bario	Ba	X	X	-	-	-
Berilio	Be	X	X	-	X	-
Bismuto	Bi	X	X	-	X	X
Boro	B	X	X	X	-	-
Cesio	Cs	X	-	-	-	X
Cinc	Zn	-	X	-	-	X
Circonio	Zr	X	-	X	X	-
Cobalto	Co	X	X	X	X	X
Cobre	Cu	-	-	X	X	X
Cromo	Cr	X	-	X	X	X
Elemento grupo platino	EPG	X	X	X	X	X
Elementos tierras raras	ETR	X	X	X	X	X
Escandio	Sc	X	X	-	X	X
Estaño	Sn	X	-	X	-	X
Estroncio	Sr	X	X	-	-	-
Flúor	F	X	X	X	-	X
Fósforo (fosfato)	P	-	X	X	-	-
Galio	Ga	X	X	-	X	X
Germanio	Ge	X	X	-	X	X
Grafito (natural)	C	X	X	X	X	X
Hafnio	Hf	X	X	-	X	-
Helio	He	X	-	-	X	X
Hierro	Fe	-	-	X	-	-
Indio	In	X	X	-	X	X
Litio	Li	X	X	X	X	X
Magnesio	Mg	X	X	-	X	X
Manganeso	Mn	X	-	-	X	X
Molibdeno	Mo	-	-	X	-	X
Nitrógeno (nitratos)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	X	X	X	X	X
Niobio	Nb	X	X	-	X	X
Níquel	Ni	X	-	X	-	X
Oro	Au	-	-	X	-	-
Potasio	K	X	-	X	-	X
Renio	Re	X	-	-	X	-
Rubidio	Rb	X	-	-	-	-
Silicio metálico	Si	-	X	-	-	-
Tantalio	Ta	X	X	-	X	X
Teluro	Te	X	-	-	-	X
Titanio	Ti	X	X	-	X	X
Tungsteno	W	X	X	X	X	X
Uranio	U	X	-	X	-	X
Vanadio	V	X	X	-	X	-
Yodo	I	X	X	X	X	X

Fuente: Ministerio de Minería (2022); este trabajo.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para abordar el análisis del potencial geológico de minerales críticos y/o estratégicos de Chile tiene como objetivo final entregar una visión actualizada respecto de los tipos de depósitos en que se encuentran, y de la distribución de estos elementos en el territorio nacional, lo que está directamente relacionado con el conocimiento de la metalogénesis de los depósitos minerales.

Por lo tanto, este estudio caracteriza el potencial geológico nacional respecto de estos minerales, considerando aquellos que están en permanente e histórica operación, producción y exploración, como Cu, Mo, Li y K; aquellos que son de interés en los listados de minerales críticos y estratégicos, y que podrían reintegrarse a la actividad minera, como Mn y Co, por medio de programas de estudio y exploración; y, por último, aquellos que podrían iniciar su producción en el país, como ETR y Ti, mediante programas de exploración geológica que identifiquen los recursos disponibles y su posible recuperación en términos económicos y ambientales. No se han considerado el oro y la plata, ya que no están incluidos en los listados de los principales países industrializados, aunque no se descarta incorporarlos en el futuro al listado de minerales estratégicos nacionales, a causa de requerimientos internos debido a su importancia económica.

La categorización de los 15 minerales críticos y/o estratégicos considerados y descritos en este estudio se efectuó con base en un análisis que estableció la utilización de ocho criterios que permitieron establecer una categorización en 5 grupos: primero: Cu, Mo, Re, Li, K y B; segundo: Zn, Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y Yodo (I); tercero: Co, elementos de tierras raras (ETR) y Ti; cuarto: Mn y quinto: Ni y Cr.

Los ocho criterios utilizados para la categorización de los minerales críticos y/o estratégicos se describen a continuación:

1. Contexto geológico: se describen las características y la evolución geológica del territorio nacional, que condicionan el marco favorable para la formación de depósitos minerales (metalogénesis).

2. Producción minera mundial y nacional: considera las estadísticas de la producción internacional y por país de la publicación anual Mineral Commodity Summaries del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), y de la producción nacional del Anuario de la Minería de Chile, publicado anualmente por Sernageomin.
3. Posición de los recursos y las reservas (RyR) mundiales y nacionales: examina las estadísticas de reservas mundiales, por país, de la publicación anual Mineral Commodity Summaries, del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), y la información de recursos y reservas de los depósitos minerales del país, aportada por instituciones del Estado y/o por las respectivas empresas mineras.
4. Proyectos de exploración y explotación: contempla los reportes de compañías mineras y consultas al Sistema de Información Geológica de Exploración (Sigex), plataforma disponible *online* en la página web de Sernageomin.
5. Potencial prospectivo del territorio nacional: considera la información geológica y metalogénica del país, que permite identificar y describir áreas o sectores del territorio nacional favorables para la existencia de depósitos de interés económico de determinados minerales críticos y/o estratégicos.
6. Transición energética y seguridad alimentaria: el primero considera el aumento de la demanda de minerales críticos requeridos para la transición hacia energías limpias, solar y eólica, y para dispositivos eléctricos, como litio, cobre, níquel, manganeso, cobalto, cinc, tierras raras, entre otros; el segundo tiene en cuenta la demanda de minerales como nitratos y potasio, para producir fertilizantes destinados al desarrollo de la agricultura.
7. Incidencia en la economía del país: considera el impacto de la producción de determinados minerales, como el cobre, en la economía nacional, reflejado en su aporte al PIB.
8. Riesgo de suministro: contempla los factores asociados al riesgo en la cadena de suministro, debido al posible agotamiento de los recursos geológicos, a problemas geopolíticos y a la aparición de posibles sustitutos, entre otros.

De estos ocho criterios, los primeros cinco han sido empleados directamente para describir cada mineral o grupo de minerales considerados y priorizados en este estudio, y los últimos tres se han utilizado como antecedente para caracterizar los minerales y contribuir a su categorización, sin haber sido utilizados específicamente en su descripción.

La relación entre estos criterios y la categorización efectuada se presenta en la tabla 2.

TABLA 2. CRITERIOS Y GRUPOS DE LOS 15 MINERALES CRÍTICOS Y/O ESTRATÉGICOS CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO.

Grupo	Elemento/mineral	CRITERIOS								Potencial
		1	2	3	4	5	6	7	8	
		Contexto geológico	Producción minera mundial y nacional	Posición en RyR mundiales y nacionales	Proyectos de exploración y explotación	Potencial prospectivo del territorio nacional	Transición energética/seguridad alimentaria	Incidencia en la economía del país	Riesgo de suministro	
1.º	Cu	Muy favorable	Sí	1. <sup>a</sup>	Sí	Sí	Sí/no	Alta	Bajo	Muy favorable
	Mo	Muy favorable	Sí	4. <sup>a</sup>	Sí	Sí	Sí/sí	Moderada	Bajo	Muy favorable
	Re	Muy favorable	Sí	1. <sup>a</sup>	Sí	Sí	Sí/no	Baja	Bajo	Muy favorable
	Li	Muy favorable	Sí	1. <sup>a</sup>	Sí	Sí	Sí/no	Alta	Bajo	Muy favorable
	K	Favorable	Sí <sup>(1)</sup>	7. <sup>a</sup>	No	n/d	No/sí	Baja	Bajo	Favorable
	B	Favorable	Sí	3. <sup>a</sup>	Sí <sup>(4)</sup>	n/d	No/sí	Moderada	Bajo	Favorable
P 2.º	Zn	Favorable	Sí <sup>(2)</sup>	s/i	Sí <sup>(5)</sup>	Sí	Sí/no	Baja	Alto	Favorable
	NO <sub>3</sub> -	Favorable	Sí <sup>(3)</sup>	s/i	Sí	n/d	No/sí	Moderada	Moderado	Favorable
	I	Favorable	Sí	2. <sup>a</sup>	Sí	n/d	No/sí	Moderada	Moderado	Favorable
3.º	Co	Favorable	No	n/a	Sí	Sí	Sí/no	n/a	Moderado	Favorable
	ETR	Favorable	No	n/a	Sí	Sí	Sí/no	n/a	n/d	Favorable
	Ti	Favorable	No	n/a	Sí <sup>(6)</sup>	Sí	Sí/no	n/a	n/d	Favorable
4.º	Mn	Favorable	No	n/a	Sí <sup>(7)</sup>	Sí	Sí/no	n/a	n/d	Favorable
5.º	Ni	Desfavorable	No	n/a	No	n/d	Sí/no	n/a	Alto	Muy desfavorable
	Cr	Desfavorable	No	n/a	No	n/d	Sí/no	n/a	Alto	Muy desfavorable

Fuente: este trabajo.

**Notas:**

s/i: sin información; n/a: no aplica; n/d: no descrito; <sup>(e)</sup>: estimado.

<sup>(1)</sup> Producción expresada como potasa (K<sub>2</sub>O);

<sup>(2)</sup> Producción de 0,18% de la producción mundial el 2023.

<sup>(3)</sup> Producción de <1% de la producción mundial de compuestos nitrogenados.

<sup>(4)</sup> Exploración *brownfield*.

<sup>(5)</sup> Proyectos de exploración por polimetálicos y Zn.

<sup>(6)</sup> Prospectos de Ti Cerro Blanco y La Martina.

<sup>(7)</sup> Prospecto de Mn Los Pumas.



## 4. CATEGORIZACIÓN DE MINERALES

Como resultado de la categorización efectuada con base en los 8 criterios definidos en la tabla 2, se definieron cinco grupos que contienen los 15 minerales críticos y/o estratégicos, que tienen distintos niveles de interés para Chile.

- Primer grupo: cobre-molibdeno-renio (Cu-Mo-Re); litio-potasio-boro (Li-K-B).
- Segundo grupo: cinc (Zn); nitratos (NO<sub>3</sub>-), yodo (I).
- Tercer grupo: cobalto (Co); elementos de tierras raras (ETR); titanio (Ti).
- Cuarto grupo: manganeso (Mn).
- Quinto grupo: níquel (Ni); cromo (Cr).

### 4.1. PRIMER GRUPO

En el primer grupo se consideran el cobre, molibdeno, renio, litio, potasio y boro estos son minerales con una importante producción y reservas nacionales y mundiales, tienen una significativa participación en la transición energética y la seguridad alimentaria, además de diferentes niveles de incidencia en la economía nacional y un bajo a muy bajo riesgo de agotamiento de sus reservas y recursos.

#### 4.1.1. Cobre-molibdeno-renio (Cu-Mo-Re)

##### 4.1.1.1. Contexto geológico de los depósitos de cobre y elementos asociados, en el mundo y en Chile

Los depósitos de cobre se encuentran en una amplia variedad de ambientes geológicos, aunque se concentran espacialmente en ciertas provincias cupríferas, entre las que destaca el cinturón del Pacífico, que incluye a Chile y Perú, los dos países con mayores reservas y principales productores de cobre en el mundo (Fig. 1). A ellos se suman Australia, R.D. del Congo (República Democrática del Congo) y Rusia, lo que completa el *ranking* de los cinco países más importantes en cuanto a reservas y producción de Cu en el mundo del año 2023 (USGS, 2024).

Los principales tipos de yacimientos de cobre explotados en Chile (Fig. 1) son pórfidos de Cu-Mo, óxidos de Fe-Cu-Au (IOCG Andinos) y estratoligados de Cu-Ag (Sillitoe, 2012) y, en menor medida, yacimientos tipo *skarn* y vetas mesotermales.

Los pórfidos de cobre son depósitos de gran tonelaje y leyes moderadas a bajas (0,2-1,5% de Cu), asociados a cuerpos intrusivos plutónicos cuya mineralización ha sido generada por actividad hidrotermal relacionada con cuerpos intrusivos hipabisales. En algunos yacimientos la mineralización primaria ha sido enriquecida por procesos supérgenos, como, p. ej., en los yacimientos de clase mundial Chuquicamata y Escondida.

Los depósitos IOCG andinos corresponden a un grupo de variadas características genéticas, mineralógicas y morfológicas. Están asociados a procesos magmáticos hidrotermales y tienen importantes contenidos de óxidos de hierro, tanto magnetita como hematita, y leyes económicas de cobre y oro, asimismo, constituyen cuerpos irregulares, brechas y vetas. Los ejemplos más representativos en Chile son Candelaria y Manto Verde.

Los depósitos estratoligados de Cu son de origen hidrotermal, se emplazan sobre todo en secuencias volcánicas y, en menor proporción, en rocas intrusivas, y corresponden a cuerpos lenticulares o irregulares y vetas. El ejemplo más relevante en el país es Mantos Blancos.

A escala mundial, Chile es el principal productor de cobre, con 5.372.694 tm de Cu fino en el año 2023 (Sernageomin, 2024), equivalente a un 24,42% de la producción mundial y, además, posee el 19% de las reservas mundiales, con 190 Mt de Cu fino (Fig. 1; USGS, 2024).

Los depósitos de cobre de mayor importancia productiva son los de tipo pórfido cuprífero, que concentran el 96% de la producción y contienen más del 95% de los recursos de Cu del país. Les siguen los de tipo IOCG que representan el 2,8% de los recursos de Cu en el país y los de tipo estratoligado Cu-Ag con el 1,9% de estos recursos (Tabla 3 y referencias en ella).

Los pórfidos de cobre (Cu-Mo y Cu-Mo-Au) son la fuente de molibdeno y renio en Chile por sus contenidos del mineral molibdenita.

La totalidad de la producción de molibdeno es un subproducto de la explotación de grandes pórfidos de cobre. Su producción es en forma de concentrado y se efectúa desde la región de Tarapacá hasta la del Libertador General Bernardo O'Higgins. El molibdeno tiene su principal uso en aleaciones para aceros especiales, ya que aporta mayor dureza y resistencia a la corrosión; también se usa como conductor en industrias electrónicas y pigmento en otras.

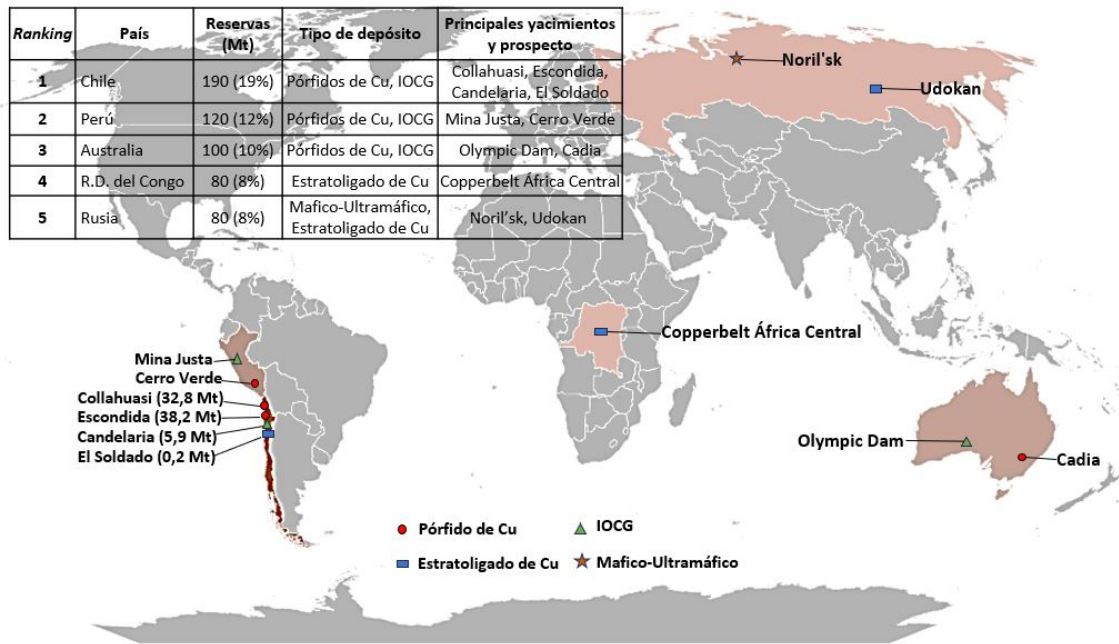


FIG. 1. *Ranking* de los cinco países con mayores reservas de cobre año 2023 (USGS, 2024) y sus principales tipos de depósitos. Se detallan reservas actualizadas de algunos de los depósitos de cobre de mayor relevancia en Chile (modificado de Sillitoe, 2012).

La producción de renio se efectúa mediante el proceso metalúrgico de tostación de la molibdenita. La molibdenita de los pórfidos cupríferos suele contener entre 100 y 3.000 ppm de Re, lo que la convierte en fuente primordial de este elemento, mientras que la segunda fuente de Re es el reciclaje. El principal uso del renio es como aditivo (80%) para la elaboración de superaleaciones de níquel utilizadas en la fabricación de motores para la industria aeronáutica; además, tiene aplicaciones en la industria médica y biotecnológica y en la industria del petróleo. Se comercializa sobre todo como renio metálico o perrenato de amonio.

Chile es actualmente el primer productor mundial de renio con aproximadamente un 53,21% de la producción mundial y el segundo productor de molibdeno con un 41,40%. Las grandes empresas operadoras de pórfidos cupríferos de Cu-Mo y Cu-Mo-Au concentran el 100% del aporte de molibdeno y renio, lo que está relacionado con el contenido de molibdenita y la capacidad para tratarla.

En la tabla 3 se indica la producción 2023 de cobre y molibdeno de algunos de los depósitos de tipo pórfido más importantes del país.

**TABLA 3. PRODUCCIÓN DE COBRE Y MOLIBDENO EN ALGUNOS DE LOS DEPÓSITOS TIPO PÓRFIDO CUPRÍFERO, ESTRATOLIGADOS DE COBRE E IOCG ANDINOS, MÁS IMPORTANTES DE CHILE, AÑO 2023.**

Tipo de depósito	Nombre del depósito	Producción Cu (t)	Participación (%)	Producción de Mo (t)	Participación (%)	Referencias
Estratoligado de Cu	El Soldado	39.500	0,74	s/i	s/i	Consejo Minero El Soldado (2024)
	Mantos Blancos	49.522	0,92	s/i	s/i	Capstone Copper (2024)
IOCG andino	Manto Verde	35.401	0,66	s/i	s/i	Capstone Copper (2024)
	Candelaria	152.012	2,83	s/i	s/i	Lundin Mining (2024)
Pórfido de Cu	Teniente	352.000	6,55	4.673	10,59	Codelco (2023)
	Escondida	1.055.300	19,64	s/i	s/i	BHP (2023)
	Pelambres	30.300	0,56	8.158	18,49	Consejo Minero Centinela (2024)
	Chuquicamata	248.495	4,63	10.869	24,63	Codelco (2023)
	Collahuasi	573.182	10,67	4.554	10,32	Consejo Minero Collahuasi (2024)
	Anglo American Sur	255.042	4,75	1.879	4,26	Angloamerican plc. (2023)
Otros depósitos	-	2.790.754	52,95	n/d	n/d	-
Total producción país	-	<b>5.372.694</b>	<b>100</b>	<b>44.127</b>	<b>100</b>	Sernageomin (2024)

Fuente: este trabajo, con referencias citadas.  
n/d: no determinado.  
s/i: sin información.

El ambiente geotectónico en el margen occidental del continente americano, y de Chile en particular, ha sido el más favorable para la formación de diversos depósitos minerales, principalmente de cobre, debido a las adecuadas condiciones magmáticas y estructurales resultantes de los continuos procesos de colisión, subducción y acreción que han caracterizado la evolución geológica de este territorio. De especial relevancia son los procesos iniciados en el Jurásico, a partir del cual ha predominado un proceso de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, que permitió la generación de magmas y de megasistemas de fallas con orientación subparalela al margen convergente. El magmatismo se distribuyó también en forma subparalela al margen de convergencia, y originó arcos magmáticos que han migrado hacia el E según la variación del ángulo de subducción. Por su parte, la intersección de las megaestructuras con estructuras de dirección NO-SE de carácter translitosférico, además de la existencia de sistemas de fallas de dirección NE-SO que actuaron como corredores y contribuyeron a la circulación de fluidos provenientes de la consecuente actividad hidrotermal, favorecieron la concentración de elementos y la formación de depósitos (Camus y Castelli, 2021; Sillitoe, 1992, 2000; Rivera y Yañez, 2007, 2009, 2012).

La disposición subparalela de megaestructuras, arcos magmáticos y depósitos metalíferos permite definir franjas metalogénicas para los depósitos estratoligados de Cu-Ag, los IOCG andinos y los pórfidos cupríferos (Fig. 4), representativas de un lapso definido durante la evolución geológica del territorio.

Entre el Jurásico Inferior y el Cretácico Superior se formaron la mayoría de los depósitos estratoligados de Cu e IOCG más importantes del país, así como algunos pórfidos cupríferos de tamaños pequeño a mediano, relacionados con un ambiente de subducción de alto ángulo que generó una tectónica extensional.

Los depósitos de estos tipos están asociados a las franjas metalogénicas del Jurásico, Cretácico Inferior y Cretácico Superior, definidas a lo largo de la cordillera de la Costa del norte y del centro del país, en forma paralela al margen continental, y constituidas por rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas, representativas del arco magmático del Jurásico-Cretácico (Maksaev *et al.*, 2007) (Fig. 4).

### **Franja del Jurásico (175-142 Ma)**

Esta franja se distribuye a lo largo del sector más occidental de la cordillera de la Costa, entre las regiones de Antofagasta y del Libertador General Bernardo O'Higgins, y contiene principalmente depósitos de tipo estratoligados de Cu, con Ag como subproducto, los más importantes de los cuales son Mantos Blancos y aquellos de los distritos Michilla y Las Luces, todos en la región de Antofagasta. La franja también contiene depósitos de tipo IOCG, entre los que se menciona el depósito Montecristo-Julia, de tamaño mediano a pequeño, ubicado en la misma región (Boric *et al.*, 1990; Vivallo *et al.*, 2008) (Fig. 4).

### **Franja del Cretácico Inferior (142-98 Ma)**

Corresponde a una franja discontinua que se distribuye desde el norte de la ciudad de Antofagasta (Puntilla-Galenosa) hasta el sur de la ciudad de Talca, sobre todo por el flanco oriental de la cordillera de la Costa. La franja contiene los siguientes tipos de depósitos: estratoligados de Cu, cuyos más importantes exponentes, Talcuna en la región de Coquimbo y El Soldado en la región de Valparaíso, son explotados por cobre con plata como subproducto; IOCG de Cu con Au, los principales ejemplares, Manto Verde y Candelaria, se ubican en la región de Atacama, donde son explotados a mediana y gran escala (Fig. 4); y pórfido cuprífero distribuidos entre las regiones de Antofagasta y del Maule. Estos depósitos son de tamaño pequeño a grande, además de Cu aportan Mo y Au, y los exponentes de mayor importancia en cuanto a producción son Antucoya y Andacollo, ubicados en las regiones de Atacama y Coquimbo, respectivamente (Boric *et al.*, 1990; Vivallo *et al.*, 2008; Arredondo *et al.*, 2017; Ortega *et al.*, 2021).

### **Franja del Cretácico Superior (100-66 Ma)**

Es una franja discontinua que, si bien ha sido definida en la cordillera de la Costa, desde el norte de Antofagasta hasta la latitud de Valparaíso (Fig. 4), se han incluido en ella algunos proyectos de escasas perspectivas en la cordillera Principal de la región de La Araucanía (Camus y Castelli, 2021). En el sector entre Antofagasta y Valparaíso aloja depósitos de interés económico como el pórfido Inca de Oro (Cu-Mo-Au), ubicado en la región de Atacama, y el pórfido Llahuín, en la región de Coquimbo, además del distrito El Espino en esta última región, con depósitos de tipo IOCG de Cu y Au (Vivallo *et al.*, 2008; Arredondo *et al.*, 2017).

### **Franja del Paleoceno-Eoceno Inferior (68-51 Ma)**

Se extiende por más de 1.700 km, desde el sur de Perú, por el norte, hasta la parte sur de la región de Coquimbo (Fig. 4). En esta franja los pórfidos cupríferos, de tamaño intermedio, coexisten con depósitos epitermales donde se explotan metales preciosos (San Cristóbal, El Peñón, Cachinal de la Sierra, El Guanaco). Algunos de los pórfidos pertenecientes a esta franja son Sierra Gorda, Spence, Lomas Bayas, Cerro Colorado, que también aportan Mo y Au (Boric *et al.*, 1990; Camus, 2003).

### **Franja del Eoceno-Oligoceno Inferior (43-31 Ma)<sup>1</sup>**

Es la franja con mayor contenido de cobre actualmente en el mundo, con 36 yacimientos y prospectos de Cu-Mo, Cu-Mo-Au y Cu-Au. Se distribuye en el norte del país, por más de 1.400 km a lo largo de la cordillera de Domeyko, asociada al sistema de fallas homónimo y a sistemas magmáticos-hidrotermales, de edades entre 43 y 31 Ma (Fig. 2). En esta franja son comunes las agrupaciones de pórfidos espacial y temporalmente relacionados, como es el caso de los depósitos Collahuasi, Ujina y Quebrada Blanca, ubicados al interior de Iquique; Chuquicamata, Radomiro Tomic y Ministro Hales, cercanos a Calama; y Escondida, Escondida Norte y Zaldívar, ubicados al sureste de Antofagasta (Boric *et al.*, 1990; Camus, 2003) (Fig. 4).

### **Franja del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (28-11 Ma)**

Esta franja se distribuye en el borde occidental del altiplano, en la región de Atacama, y en su borde sur, en la región de Antofagasta. Es reconocida por la estrecha relación de depósitos de metales preciosos de tipo epitermal con yacimientos de tipo pórfido cuprífero y aurífero, entre los que destacan Cerro Casale y Caserones. Su aporte de Mo es menor con respecto a las otras franjas de pórfidos (Vivallo *et al.*, 2008)(Fig. 4).

---

<sup>1</sup> Debido a su arraigo en la literatura especializada, en este trabajo se mantienen las subdivisiones Inferior, Medio y Superior en el nombre de las Franjas Metalogénicas del Paleógeno y Neógeno, no obstante, la International Chronostratigraphic Chart 2023/03 (Cohen *et al.*, 2013, updated) suprimió su uso.

## Franja del Mioceno-Plioceno (11-4 Ma)

Ubicada en la cordillera Principal del centro-norte del país, se caracteriza por yacimientos de tipo pórfido cuprífero gigantes, como Pelambres, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente (Fig. 3) y es la segunda en importancia considerando el contenido metálico, después de la franja del Eoceno-Oligoceno (Fig. 4). Los depósitos están alojados en rocas volcánicas y subvolcánicas, y son contemporáneos a un periodo de rápido sollevamiento tectónico y exhumación, que produjo la superposición de brechas hidrotermales y sistemas de vetillas tipo *stockwork*, que son característicos de esta franja, y que tienen un alto contenido de Cu, con Mo y Au subordinado (Camus, 2003).

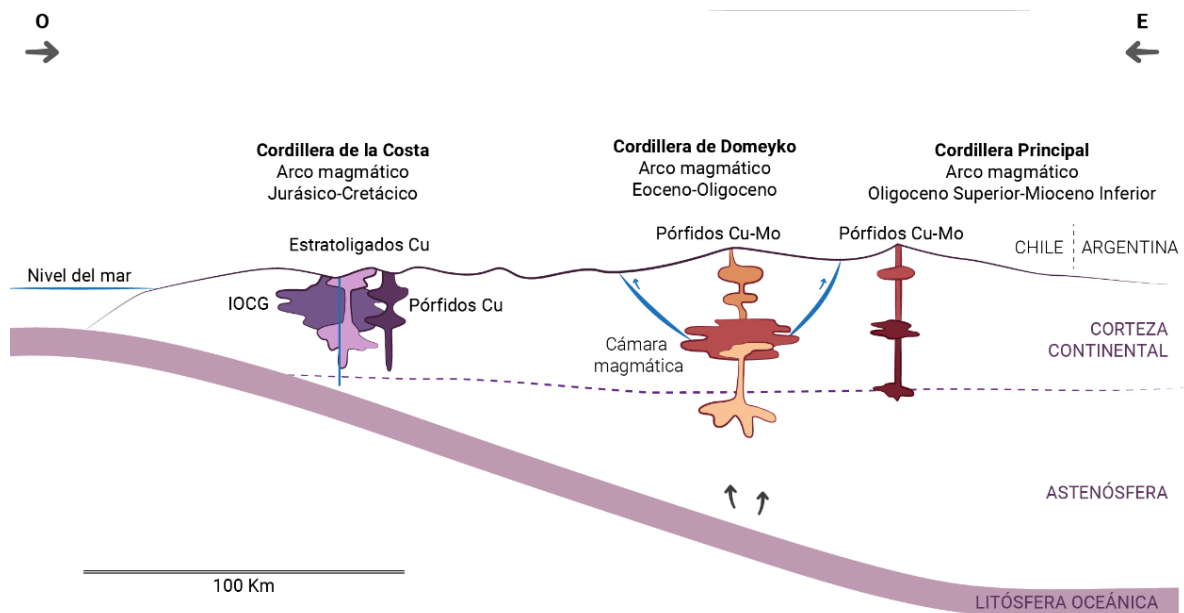


FIG. 2. Perfil esquemático en dirección O-E, norte de Chile (regiones de Antofagasta y Atacama), con contexto geotectónico y tipos de depósitos metalíferos relacionados con el arco magmático del Jurásico-Cretácico (cordillera de la Costa), Eoceno-Oligoceno (cordillera de Domeyko) y Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (cordillera Principal).



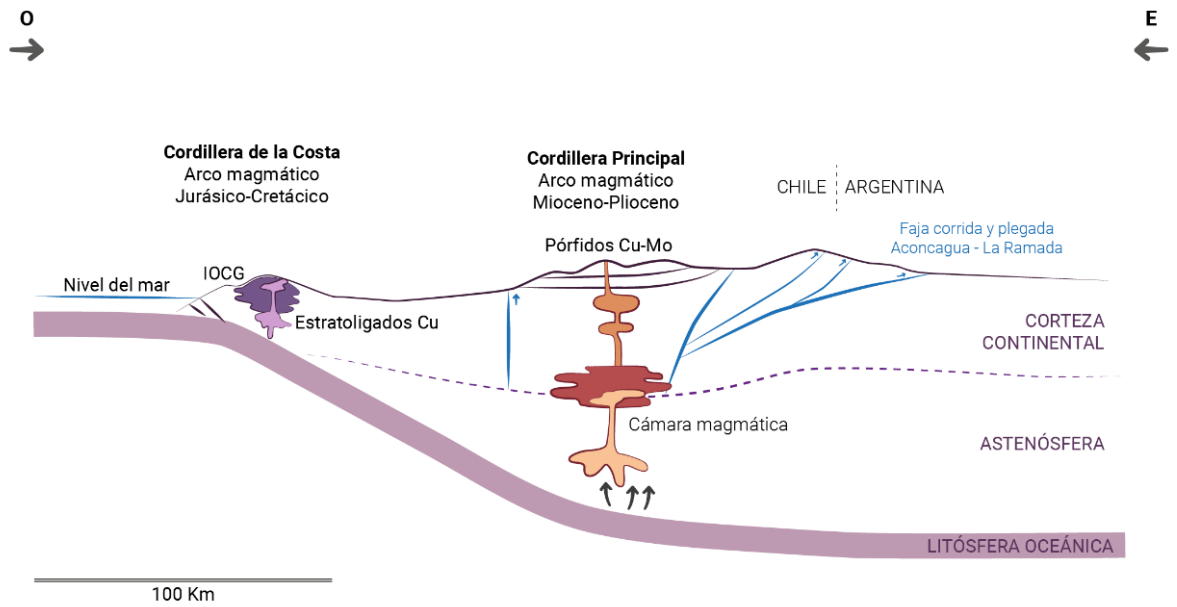


FIG. 3. Perfil esquemático transversal O-E, centro-norte de Chile (regiones de Coquimbo a del Libertador General Bernardo O'Higgins), con contexto geotectónico y tipos de depósitos metalíferos relacionados con los arcos magmáticos del Jurásico-Cretácico (cordillera de la Costa) y Mioceno-Plioceno (cordillera Principal).

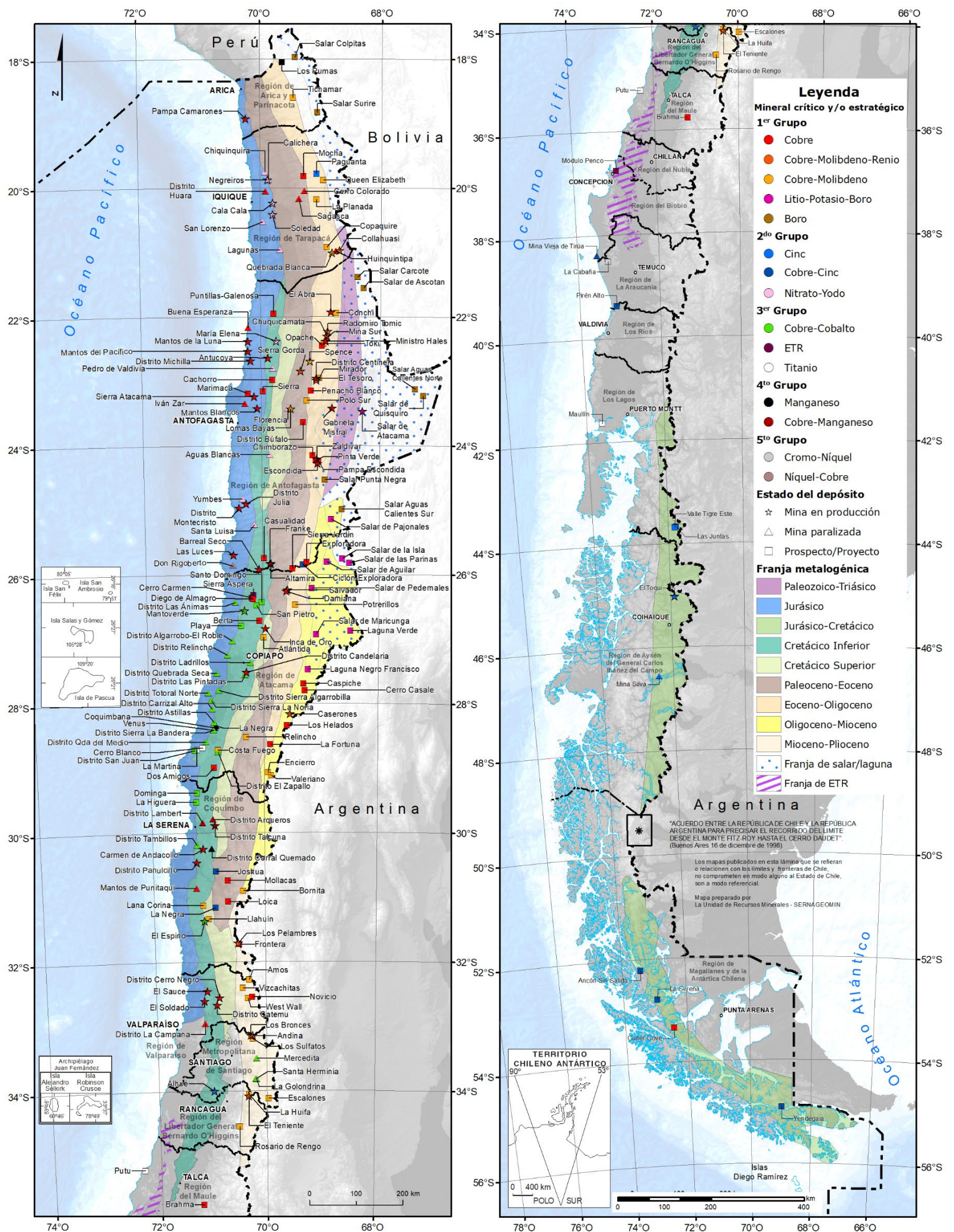


FIG. 4. Distribución de las franjas metalogénicas y el potencial geológico de los minerales críticos y/o estratégicos de Chile.

#### 4.1.1.2. Producción mundial y nacional de cobre, molibdeno y renio

##### Cobre (Cu)

La producción mundial de cobre entre los años 2022 y 2023, se mantuvo en los 22.000 kt/año, con una participación de Chile de un 24,42% del mercado mundial, seguido, en orden de importancia, por Perú, R.D. del Congo, China y EE. UU. (Tabla 4; Sernageomin, 2024; USGS, 2024).

**TABLA 4. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COBRE, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Producción (kt)	Participación (%)	Producción (kt)	Participación (%)
Chile	5.377	24,55	5.373	24,42
Perú	2.450	11,19	2.600	11,82
R.D. del Congo	2.350	10,73	2.500	11,36
China	1.940	8,86	1.700	7,73
EE. UU.	1.230	5,62	1.100	5,00
Otros países	8.553	39,05	8.727	39,07
Total mundial	21.900	100	22.000	100

Fuente: Sernageomin (2024), producción Chile; USGS (2024), producción mundial. kt: miles de toneladas.

La producción nacional de cobre del período 2019-2023 se indica en la tabla 5.

**TABLA 5. PRODUCCIÓN NACIONAL DE COBRE (tmf), AÑOS 2019-2023.**

Año	2019	2020	2021	2022	2023
Total nacional	5.872.027	5.772.632	5.588.631	5.376.631	5.372.694

Fuente: Sernageomin (2024).  
tmf: toneladas métricas de finos.

##### Tipos de productos de cobre en Chile

Los tipos de productos de la minería del cobre en Chile son los siguientes (Sernageomin, 2024; Codelco, 2024):

- Concentrado: resultado de la etapa de flotación, de la que se obtiene un producto con 30% de cobre aproximadamente, que debe someterse a procesos de fundición y refinación para convertirse en cátodos de alta pureza. Esta producción ha disminuido en 4,8% en los últimos cinco años, de 3.857 ktmf de Cu el año 2019, a 3.670 ktmf de Cu el año 2023 (Sernageomin, 2024).
- Cobre *blister*: una vez fundido el concentrado de cobre se obtiene un material metálico que puede alcanzar alrededor de 96% de Cu.
- Ánodos: cobre *blister* con una nueva etapa de refinación que alcanza entre 99,4 y 99,6% de Cu, y su refinación permite obtener cátodos de cobre.
- Cátodos: planchas de cobre que pasaron por las etapas del proceso productivo, por lo que su concentración alcanza el 99,99% de Cu.
- Cobre electrolítico: obtenido de cátodos procedentes de la precipitación electrolítica de soluciones de sulfato de cobre y de refinación electrolítica de ánodos. Su concentración es de 99,98% de Cu. En los último cinco años su producción ha ido a la baja llegando a un 6,36% principalmente por la disminución de oxidados de cobre en las minas en producción (1.841 ktmf de Cu en 2019 a 1.724 ktmf de Cu en 2023) (Sernageomin, 2024).

## Molibdeno (Mo)

En el período 2022-2023 Chile se ha mantenido como el segundo productor mundial de molibdeno, con una participación del 16,61% de esa producción (Tabla 6).

**TABLA 6. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE MOLIBDENO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Producción (tmf)	Participación (%)	Producción (tmf)	Participación (%)
China	106.000	41,82	110.000	41,40
Chile	45.551	17,97	44.127	16,61
EE. UU.	34.600	13,65	34.000	12,80
Perú	31.600	12,47	37.000	13,92
México	15.500	6,12	15.000	5,64
Otros	20.196	7,97	25.600	9,63
<b>Total mundial</b>	<b>253.447</b>	<b>100</b>	<b>265.727</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2024); Sernageomin (2024).  
tmf: toneladas métricas de finos.

## Renio (Re)

Con una participación del 53,21% de la producción mundial, Chile se ha mantenido como el primer productor de renio en el período 2022-2023 (Tabla 7).

**TABLA 7. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE RENIO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Producción (kg)	Participación (%)	Producción (kg)	Participación (%)
Chile	29.000	52,59	30.000	53,21
EE. UU.	8.870	16,09	9.100	16,14
Polonia	6.310	11,44	6.300	11,17
Uzbekistán	4.900	8,89	4.900	8,69
Rep. de Corea	2.800	5,08	2.800	4,97
Otros	3.260	5,91	3.280	5,82
Total mundial	<b>55.140</b>	<b>100</b>	<b>56.380</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2024).  
kg: kilogramo.

La producción nacional de molibdeno y renio del período 2019-2023 se muestra en la tabla 8.

**TABLA 8. PRODUCCIÓN NACIONAL DE MOLIBDENO Y RENIO, AÑOS 2019 A 2023.**

Elemento	Producción				
	2019	2020	2021	2022	2023
Molibdeno (tmf)	53.541	59.319	49.403	45.551	44.127
Renio (kg)	30.000	30.000	29.000	29.000	30.000

Fuente: Sernageomin (2024), producción de Mo; USGS (2021-2024), producción de Re. tmf: toneladas métricas de finos; kg: kilogramo.

### 4.1.1.3. Recursos y reservas de cobre, molibdeno y renio en el mundo y en Chile

#### Cobre (Cu)

Así como ocurre con la producción, Chile alberga la mayor cantidad de reservas de cobre en el mundo, con una participación del 19% del total mundial el año 2023 (Tabla 9), seguido por Perú con 12% y Australia con 10% (USGS, 2024). Chile y Perú comparten muchas de las franjas metalogénicas que albergan los depósitos de cobre, especialmente los pórfidos cupríferos de la franja del Paleoceno-Eoceno (Fig. 4). Australia, por su parte, destaca por

depósitos IOCG de gran envergadura, a diferencia de los IOCG andinos, al igual que por yacimientos tipo pórfido cuprífero (Fig. 1).

**TABLA 9. RESERVA MUNDIAL DE COBRE, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reservas (kt)	Participación (%)	Reservas (kt)	Participación (%)
Chile	190.000	21,35	190.000	19,00
Perú	81.000	9,10	120.000	12,00
Australia	97.000	10,90	100.000	10,00
R.D. del Congo	31.000	3,48	80.000	8,00
Rusia	62.000	6,97	80.000	8,00
Otros	429.000	48,20	430.000	43,00
<b>Total mundial</b>	<b>890.000</b>	<b>100</b>	<b>1.000.000</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024); kt: miles de toneladas.

### **Molibdeno (Mo) y Renio (Re)**

Debido a que la producción de molibdeno no se realiza en todos los yacimientos tipo pórfido que lo contienen, no se cuenta con información de recursos de molibdeno de los yacimientos en que ello ocurre. Por lo tanto, se podría concluir que los recursos nacionales de molibdeno y renio están subestimados en las estadísticas disponibles. No obstante, según la información existente (USGS, 2024), Chile alberga el 9,60% de las reservas mundiales de molibdeno (Tabla 10) y el 56,17% de las reservas de renio (Tabla 11).

**TABLA 10. RESERVA MUNDIAL DE MOLIBDENO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reserva (ktm)	Participación (%)	Reserva (ktm)	Participación (%)
China	3.700	32,13	5.800	39,80
EE. UU.	2.700	23,45	3.500	24,00
Perú	2.400	20,84	1.500	10,30
Chile	1.400	12,16	1.400	9,60
Rusia	430	3,73	1.100	7,60
Otros	884	7,68	1.266	8,69
<b>Total mundial</b>	<b>11.514</b>	<b>100</b>	<b>14.566</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024); ktm: miles de toneladas métricas.

**TABLA 11. RESERVA MUNDIAL DE RENIO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reserva (kg)	Participación (%)	Reserva (kg)	Participación (%)
<b>Chile</b>	1.300.000	56,64	1.300.000	56,17
<b>EE. UU.</b>	400.000	17,43	400.000	17,28
<b>Rusia</b>	310.000	13,51	310.000	13,40
<b>Kazajistán</b>	190.000	8,28	190.000	8,21
<b>Armenia</b>	95.000	4,14	95.000	4,11
<b>Otros</b>	n/d	n/d	19.200	0,83
<b>Total mundial</b>	<b>2.295.000</b>	<b>100</b>	<b>2.314.200</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023,2024).  
kg: kilogramo.

#### **4.1.1.4. Prospectos y cartera de proyectos de cobre**

La actividad de exploración de minerales metálicos en Chile tiene como objetivo primordial el cobre, y de acuerdo con la información aportada por Codelco (2023), hay diferentes tipos de proyectos: algunos enfocados en la expansión de proyectos existentes, otros en la reposición de recursos explotados (*brownfield*) y otros en la generación de nuevos recursos (*greenfield*). En la tabla 12 se muestran los principales proyectos de exploración que representan nuevos recursos de Cu y Mo, y que no han entrado en producción.

La mayoría corresponden a pórfidos, seguidos por IOCG andinos y en menor cantidad estratoligados de Cu. Algunos proyectos no listados en la tabla 12 son Exploradora (pórfido de Cu), La Huifa (pórfido de Cu), El Espino (IOCG) y Arqueros (estratoligado). Los proyectos de pórfidos cupríferos generarán nuevas reservas de Cu y Mo, y consecuentemente de renio.

**TABLA 12. PRINCIPALES PROYECTOS DE EXPLORACIÓN GREENFIELD, EN DIFERENTES TIPOS DE DEPÓSITOS DE CU Y CU-MO, CON ESTIMACIÓN DE RECURSOS.**

Proyecto	Tipo de depósito	Categoría de los recursos	Tonelaje total (Mt)	Ley de Cu (%)	Ley de Mo (%)	Contenido de Cu (t)	Contenido de Mo (t)	Referencia
Cachorro	Estratoligado de Cu	Inferidos+indicados+medidos	242	1,21	-	2.938.200	-	Antofagasta plc. (2022)
Costa Fuego	Pórfido de Cu	Indicados+inferidos	-	-	-	3.156.000	80.600	Hot Chili Limited (2024)
		Indicados	798	0,37	0,0085	2.910.000	68.100	
		Inferidos	203	0,25	0,0061	516.000	12.500	
Los Helados	Pórfido de Cu	Indicados+inferidos	-	-	-	11.992.000	-	Ngex Minerals (2024)
		Indicados	2.080	0,40	-	8.320.000	-	
		Inferidos	1.080	0,34	-	3.672.000	-	
Santo Domingo	IOCG andinos	Inferidos+indicados+medidos	-	-	-	1.702.200	-	Capstone Mining Corp. (2020)
		Indicados+medidos	537	0,30	-	1.611.000	-	
		Inferidos	48	0,19	-	91.200	-	
Valeriano	Pórfido de Cu	Inferidos	1.445	0,49	0,00624	7.080.500	90.168	Atex Resources (2023)
Vizcachitas	Pórfido de Cu	Inferidos+indicados+medidos	-	-	-	12.136.690	463.084	Los Andes Copper Ltd. (2024)
		Indicados+medidos	1.541	0,38	0,0155	5.902.030	238.855	
		Inferidos	1.823	0,34	0,0123	6.234.660	224.229	

Fuente: este trabajo, con referencias citadas.

Mt: millones de toneladas.

t: tonelada.



#### 4.1.1.5. Potencial prospectivo del cobre

##### Fuente primaria de cobre en Chile: la exploración en franjas metalogénicas

Chile sigue siendo uno de los mejores destinos para la exploración minera, con una sólida base de información geológica, profesionales y técnicos preparados para enfrentar el desafío y un territorio en el que la evolución geológica y sus procesos han generado concentraciones de minerales de alto interés económico. Se debate si Chile es un país experimentado en cuanto a la exploración minera, porque lo más evidente ya se habría descubierto; sin embargo, el buen uso de los avances científicos y las innovaciones tecnológicas en esta materia permiten asegurar nuevos descubrimientos de interés, lo que confirma que el país mantiene su condición de destino prioritario para la exploración minera.

En general, las empresas que operan faenas mineras se enfocan en efectuar exploración en el entorno de sus depósitos (*brownfield*) para la obtención de recursos de reemplazo, los que no se consideran “nuevos descubrimientos”. Otras empresas se orientan a la exploración *greenfield*, y pueden lograr grandes aciertos, como los indicados en la tabla 12.

Las regiones con alto potencial prospectivo de cobre, junto con molibdeno y oro, en el país son:

- Antofagasta, presenta gran interés prospectivo en la franja del Eoceno-Oligoceno, la que se prolonga hasta la región de Arica y Parinacota, debido al alto contenido de Cu, además de Mo y Au de los depósitos tipo pórfido cuprífero (Figs. 5 y 6).
- Atacama, es de gran atractivo a causa de los pórfidos cupríferos en las franjas del Eoceno-Oligoceno y del Oligoceno Superior-Mioceno Medio junto a depósitos tipo IOCG andinos (Figs. 5 y 6) en la franja del Cretácico Inferior.
- Coquimbo hasta del Libertador General Bernardo O’Higgins, donde se dispone la franja del Mioceno-Plioceno, caracterizada por el alto contenido metálico, y los nuevos descubrimientos de pórfidos cupríferos que implican importantes recursos (Figs. 5 y 6; Tabla 10), tanto de cobre como de molibdeno y renio (no cuantificados).
- Atacama a Valparaíso, donde se distribuye la franja metalogénica del Cretácico Inferior, de gran relevancia para la existencia de depósitos tipo IOCG andinos y estratoligados de Cu.

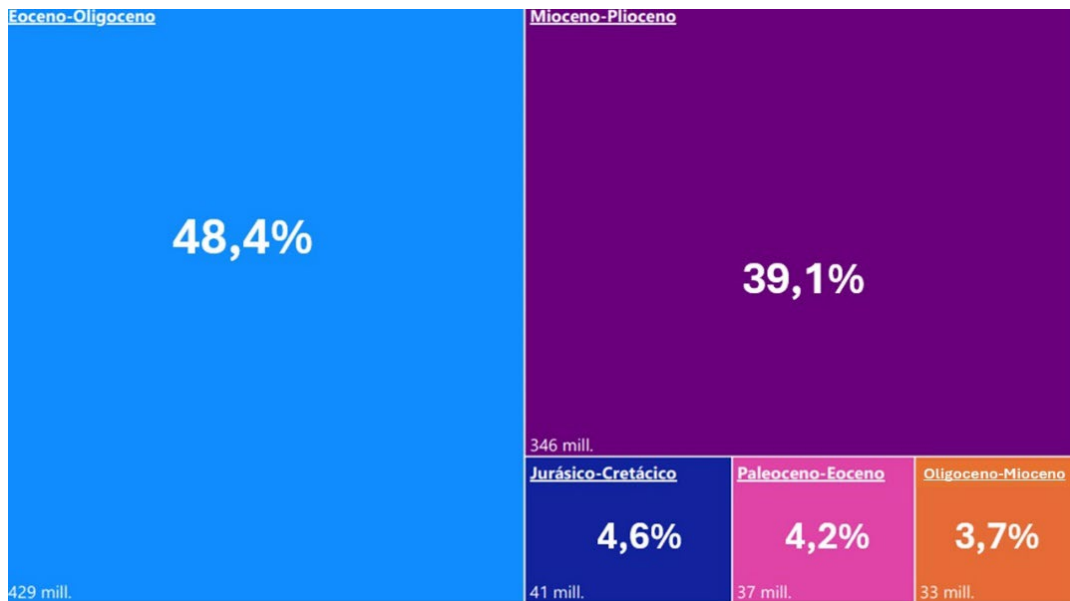


FIG. 5. Contenido de cobre según franja metalogénica con base en los recursos existentes. Fuente: este trabajo, con información compilada de reportes de compañías mineras y publicaciones de acceso libre.

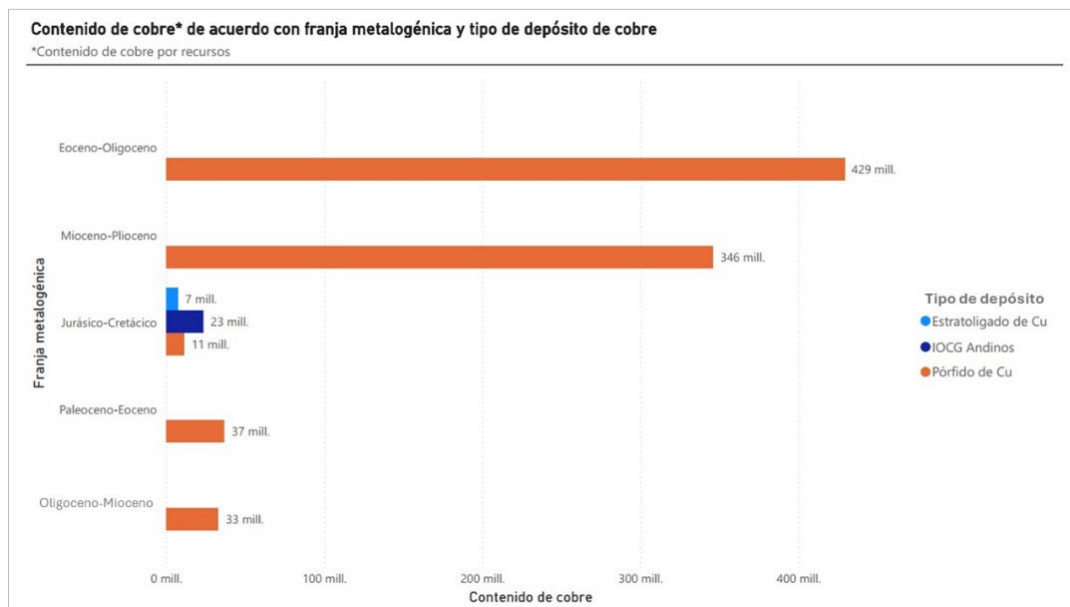


FIG. 6. Contenido de cobre según franja metalogénica y tipos de depósitos. Fuente: este trabajo, con información compilada de reportes de compañías mineras y publicaciones de acceso libre.

## Fuente secundaria de cobre en Chile: los depósitos de relaves

Considerando la gran actividad minera del país, los grandes volúmenes históricos producidos y su amplia distribución entre las regiones de Tarapacá y del Libertador General Bernardo O'Higgins, y principalmente entre las regiones de Antofagasta y de Coquimbo, los depósitos de relaves generados por esta actividad han resultado ser atractivos para la recuperación de los minerales en ellos contenidos. Lo anterior debido a que en ellos se ha efectuado la primera etapa de la minería, que es la reducción de tamaño, y muchos tienen una concentración significativa de recursos minerales de interés. Para categorizar y concretar esto es necesario clasificar y caracterizar estos depósitos antrópicos, así como innovar en las metodologías de extracción, con costos adecuados y cumplimiento de altos estándares en materias ambientales y sociales.

Sernageomin ha elaborado el "Catastro de Depósitos de Relaves de Chile" (Sernageomin, 2023b), el que continuamente está siendo actualizado. Es importante considerar que, en general, la extracción o recuperación de minerales a partir de relaves tiene un gran interés económico, ya que se puede recuperar más de un elemento. Hay experiencias exitosas en este aspecto compiladas en la tabla 13.

Respecto de los depósitos de relaves como fuente de cobre y de otros minerales, existen antecedentes de un estudio en 31 relaves, que se distribuyen entre las regiones de Antofagasta y de Coquimbo, que están incluidos en el Catastro de Relaves de Sernageomin (Sernageomin, 2023b), el cual indica el siguiente contenido de minerales: Cu sobre los 1.000 ppm, Fe sobre el 7% y la suma de ETR pesadas sobre 200 ppm (JRI Ingeniería S.A.-EcoMetales Limited, 2020).

**TABLA 13. PROYECTOS DE RECUPERACIÓN DE CU DESDE RELAVES.**

Región	Empresa	Proyecto	Elemento
Atacama	OP Mining Chile	Procesamiento de relaves Planta OP.	Cu-Au-Fe
Libertador General Bernardo O'Higgins	Minera Valle Central	Procesamiento de relaves frescos provenientes de Codelco-Chile División El Teniente.	Cu-Mo
	Sociedad Minera Los Robles	Reprocesamiento de relaves Planta Chancón.	Cu

Fuente: este trabajo; MVC (2024).

#### **4.1.2. Litio-potasio-boro (Li-K-B)**

##### **4.1.2.1. Contexto geológico de los depósitos salinos de litio, potasio y boro en el mundo y en Chile**

El litio (Li) es un metal alcalino de baja densidad y alto poder electroquímico que se ha convertido en uno de los elementos más requeridos del planeta. Este metal es fundamental en la fabricación de baterías de alto rendimiento, muy utilizadas en la industria electrónica y en la industria de la electromovilidad, ya que es un componente crucial en las baterías de vehículos eléctricos. A causa de sus múltiples aplicaciones, el mercado del litio crece rápidamente, pues forma parte esencial de la transición energética, orientada a reemplazar motores de combustión interna por motores eléctricos, y contribuir así, significativamente, a la reducción de las emisiones de carbono, responsables del calentamiento global.

Se encuentra en depósitos en pegmatitas, rocas graníticas y volcánicas, salmueras en salares y pozos petrolíferos, campos geotérmicos y arcillas. En el mundo, el litio proviene sobre todo de la explotación de pegmatitas y de salmueras en salares, con una participación marginal a partir de la explotación de arcillas. Los yacimientos pegmatíticos contienen minerales de litio como espodumeno ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ), petalita ( $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ ) y lepidolita ( $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$ ); en los salares el litio se encuentra disuelto en las salmueras contenidas en estos depósitos salinos. Los principales productores de litio, en orden decreciente, son Australia (pegmatitas), Chile (salmueras), China (pegmatitas), Argentina (salmueras) y EE. UU. (salmueras) (USGS, 2024).

Chile forma parte del grupo de países que conforman el llamado triángulo del litio, debido a la gran cantidad de salares con concentraciones de interés de litio, para una actual y futura explotación. No obstante, el salar de Atacama es único salar en explotación de litio en el país.

El potasio (K) es parte de los metales alcalinos y es el séptimo elemento más abundante en la corteza terrestre y el sexto más abundante en el agua de mar. Destaca su uso en la agricultura, es un componente clave para la producción de fertilizantes potásicos, como lo son el cloruro de potasio (KCl), el sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) y el nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), los cuales contribuyen al crecimiento y calidad de los cultivos. Se espera que su demanda siga creciendo por el incremento de la población mundial y la necesidad de expandir la producción agrícola para abastecer alimentos, a pesar de que también se deben enfrentar desafíos relacionados con la sostenibilidad y las fluctuaciones de los precios de los productos agrícolas. Los más importantes depósitos de potasio en el mundo son mayoritariamente de tipo sedimentario-evaporítico del Paleozoico, aunque también existen importantes depósitos del

Mesozoico y Cenozoico, en los que primordialmente se explota silvita (KCl) y carnalita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), y secundariamente depósitos de tipo salares actuales, de los cuales se explotan las salmueras para obtener cloruro de potasio. Además, países como Israel y Jordania recuperan potasa ( $\text{K}_2\text{O}$ ) desde el Mar Muerto. Los principales productores mundiales de potasio son Canadá, Rusia, China, Alemania y EE. UU. (USGS, 2024).

El boro (B) es un metaloide, el quinto de la tabla periódica, que comúnmente se encuentra en la naturaleza combinado con oxígeno formando boratos ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ). La mayoría de los depósitos de boratos en el mundo son de origen evaporítico, en los cuales se explota en su mayoría minerales como bórax ( $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), kernita ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), colemanita ( $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) y ulexita ( $\text{NaCa}[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6] \cdot 5 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Estos depósitos de boratos corresponden tanto a depósitos sedimentario-evaporíticos que forman parte de secuencias estratificadas del Neógeno, p. ej., los existentes en Turquía, EE. UU. y Argentina que contienen esencialmente bórax y kernita, como a depósitos salinos evaporíticos, salares, del Neógeno al Cuaternario, p. ej., los que existen en EE. UU., Chile, Argentina y Bolivia que contienen casi exclusivamente ulexita, en la costa. Los boratos sódicos y cálcicos y el ácido bórico son ampliamente utilizados en la fabricación de vidrio y cerámica, detergentes y, también, fertilizantes. Los principales productores registrados de boro en 2023 fueron Turquía, Chile, China, Perú y Bolivia (USGS, 2024).

En cuanto al origen del litio, potasio y boro, estos tienen un comportamiento geoquímico incompatible, lo que implica que tienden a mantenerse en el fundido residual durante la cristalización de magmas en la corteza (Risacher *et al.*, 2003; Bradley *et al.*, 2017; Howell *et al.*, 2020). Proceso que contribuye al aumento de la concentración de estos elementos en los magmas diferenciados, donde pueden quedar alojados en pegmatitas o en rocas volcánicas ácidas y/o fluidos hidrotermales (Benson *et al.*, 2017; López Steinmetz y Salvi, 2021).

En las cuencas de los salares del norte Chile abundan rocas ignimbríticas ácidas de gran extensión que alojan a estos elementos (Stoertz y Ericksen, 1974; Vila, 1986; Alonso y Risacher, 1996; Troncoso y Ercilla, 2016; Naranjo *et al.*, 2018, 2019), los cuales son movilizadas por interacción con aguas meteóricas y/o fluidos hidrotermales, que los transportan y depositan en las profundidades de las cuencas endorreicas (Risacher *et al.*, 1999, 2011; Houston *et al.*, 2011). Después del transporte, los procesos de evaporación concentran estos elementos para generar los depósitos salinos conocidos actualmente. En la figura 7 se muestran los principales procesos de generación, transporte y concentración de litio.

Chile suma 69 sistemas salinos entre salares y lagos altoandinos que se localizan en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, aproximadamente entre los 18 y 27° S, y desde 700 m s.n.m. en el oeste, hasta casi 5.000 m s.n.m. en el este. Según su ubicación geográfica de oeste a este, los salares y lagunas salinas pueden clasificarse en salares de la cordillera de la Costa (p. ej., Grande y Obispo), de la depresión Central (p. ej., Pintados-Bellavista, Llamara y del Carmen), preandinos (p. ej., Atacama, Maricunga, Pedernales, Punta Negra) y andinos (p. ej., Surire, Ascotán, Loyoques, Aguas Calientes Sur Sur o Aguas Calientes 4, La Isla, Pajonales, Las Parinas, Aguilar) (Vila, 1973, 1986; Chong, 1984, 1988).

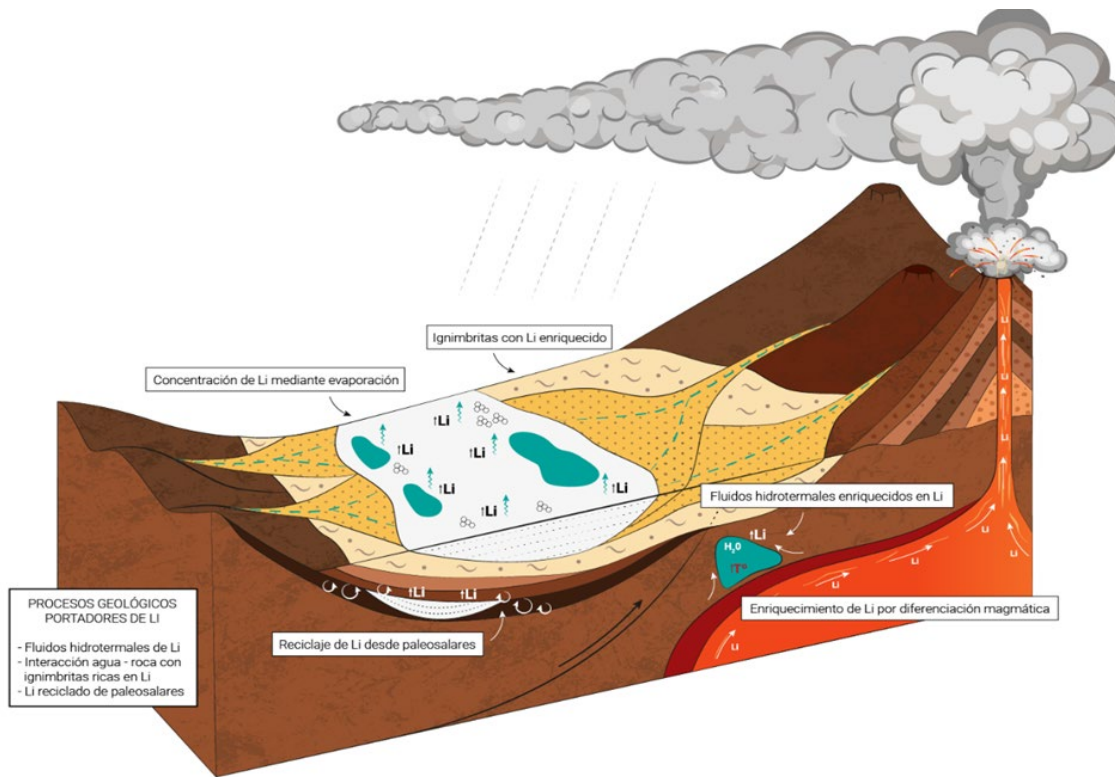


FIG. 7. Perfil esquemático de los procesos geológicos relacionados con la formación de salares y su enriquecimiento de litio. Fuente: Este trabajo.

De estos sistemas, los salares preandinos y andinos son los que reúnen mejores condiciones geológicas para contener Li, K y B en concentraciones económicamente favorables para su explotación. La disposición geográfica de estos grupos de salares permite delimitar una franja prospectiva de depósitos salinos que está ilustrada en la figura 4. En general, salares y lagunas constituyen ambientes naturales de gran complejidad y fragilidad, cuya protección, conservación y manejo debe ser prioritaria para el Estado de Chile, debido a

su relación con recursos minerales, recursos hídricos, áreas protegidas, humedales, sectores de interés científico, biodiversidad altiplánica y pueblos originarios (Sernageomin-CMNM, 2017).

#### 4.1.2.2. Producción mundial y nacional de litio, potasio y boro

##### Litio (Li)

Según lo mencionado anteriormente, la producción mundial de litio proviene de dos fuentes principales: depósitos en salmueras, como en Chile, Argentina y China, y depósitos en pegmatitas, como en Australia, Brasil, China y EE. UU. La producción mundial de litio el 2023 fue liderada por Australia con un 46,57% del total, seguida por Chile con un 23,82%, China con 17,87% y Argentina con 5,20% (Tabla 14).

**TABLA 14. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LITIO Y TIPOS DE DEPÓSITOS, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023		Tipo de depósito
	Producción (t)	Participación (%)	Producción (t)	Participación (%)	
Australia	74.700	51,01	86.000	46,57	Roca
Chile	38.000	25,95	44.000	23,82	Salmuera
China	22.600	15,43	33.000	17,87	Roca y salmuera
Argentina	6.590	4,5	9.600	5,20	Salmuera
Brasil	2.630	1,8	4.900	2,65	Roca
Zimbabue	1.030	0,7	3.400	1,84	Roca
Canadá	520	0,36	3.400	1,84	Roca
Portugal	380	0,26	380	0,21	Roca
Total mundial	<b>146.450</b>	<b>100</b>	<b>184.680</b>	<b>100</b>	-

Fuente: USGS (2024), producción mundial; Elzea *et al.* Ed. (2006), tipos de depósitos.

Nota: la producción de EE. UU. no es registrada por motivos de confidencialidad de las empresas productoras.

En la industria del litio los costos operacionales varían según dos factores: el tipo de producto final, si es carbonato o hidróxido de litio, y el tipo de yacimiento explotado, si corresponde a salmueras o pegmatitas. Según Cochilco (2023), los costos de producción del carbonato de litio a partir de salmueras varían entre 3.600 y 5.000 USD/t, y los costos de producción desde pegmatitas varían entre 4.200 y 5.200 USD/t. El menor costo de producción de las salmueras se debe, en parte, a una menor cantidad de trabajo en la faena, lo que implica un capital inferior requerido en la operación.

Por otro lado, el análisis de la producción de hidróxido de litio evidencia que las operaciones en depósitos de pegmatitas presentan menores costos operacionales, con valores entre 4.700 y 5.500 USD/t, con respecto a las operaciones en salmueras, con costos entre 5.600 y 6.500 USD/t. Esta diferencia radica en que las operaciones en salmueras necesitan en primera instancia producir carbonato de litio, para luego convertirlo en hidróxido, lo que eleva el costo de operación para este último compuesto, a diferencia de las operaciones en pegmatitas, en las cuales el hidróxido de litio se produce de manera directa.

A partir de la explotación del salar de Atacama, en Chile se han producido compuestos de litio como carbonato, cloruro, hidróxido y sulfato de litio. Por otra parte, los compuestos de potasio producidos corresponden a cloruro y sulfato de potasio (Sernageomin, 2024). Las empresas Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) y Albemarle realizan estas operaciones en pertenencias mineras de propiedad de la Corporación de Fomento de Chile (Corfo), las que se han caracterizado por un incremento sostenido en la producción de los compuestos de litio desde 2015, de modo que en 2023 se registró un fuerte aumento de 168,59% respecto del año 2019, y un leve aumento de 0,74% respecto del 2022 (Tabla 15).

**TABLA 15. PRODUCCIÓN NACIONAL DE COMPUESTOS DE LITIO (t), AÑOS 2019 A 2023.**

Compuestos/año	2019	2020	2021	2022	2023
Carbonato de litio	100.787	114.260	150.348	201.950	220.256
Cloruro de litio	1.886	s/i	s/i	s/i	s/i
Hidróxido de litio	9.934	9.030	12.129	15.763	23.071
Sulfato de litio	-	1.312(*)	s/i	82.528	59.130
<b>Total de compuestos de litio</b>	<b>112.607</b>	<b>124.602</b>	<b>162.477</b>	<b>300.241</b>	<b>302.457</b>

Fuente: Sernageomin (2024).

t: tonelada.

s/i: sin información.

(\*): primera producción informada.

## Potasio (K)

La producción mundial de potasio proviene tanto de depósitos sedimentarios como de salares, desde los cuales se obtiene cloruro de potasio que se encuentra disuelto en la salmuera. El principal país productor el 2023, desde depósitos sedimentarios, fue Canadá con 32,82% del total, seguido por Rusia con 16,41%.



La producción mundial, expresada como K<sub>2</sub>O equivalente, se muestra en la tabla 16.

**TABLA 16. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE POTASIO Y TIPOS DE DEPÓSITOS, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023		Tipo de depósito
	Producción (kt)	Participación (%)	Producción (kt)	Participación (%)	
Canadá	14.600	35,3	13.000	32,82	Sedimentario
Rusia	6.800	16,44	6.500	16,41	Sedimentario
China	6.000	14,51	6.000	15,15	Salar
Bielorrusia	4.000	9,67	3.800	9,6	Sedimentario
Alemania	2.700	6,53	2.600	6,67	Sedimentario
Israel	2.450	5,92	2.400	6,06	Mar Muerto
Jordania	1.640	3,97	1.800	4,55	Mar Muerto
Laos	700	1,69	1.400	3,54	Sedimentario
Chile	600	1,45	600	1,52	Salar
EE. UU.	430	1,04	400	1,01	Sedimentario, salar
España	420	1,02	250	0,63	Sedimentario
Otros	1.020	2,47	850	2,15	-
<b>Total mundial</b>	<b>41.360</b>	<b>100</b>	<b>39.600</b>	<b>100</b>	-

Fuente: USGS (2024), producción mundial; Elzea *et al.* Ed. (2006), tipos de depósitos.  
kt: miles de toneladas.

Por su parte, la producción nacional de compuestos de potasio desde el salar de Atacama ha experimentado variaciones entre los años 2019 y 2023, periodo que se ha caracterizado por una inestabilidad en la producción, y que alcanzó el máximo de los últimos 5 años en el 2020. Además, en el 2023 se registró un aumento de la producción de un 9,89% respecto del año 2022 (Tabla 17).

**TABLA 17. PRODUCCIÓN NACIONAL DE COMPUESTOS DE POTASIO (t), AÑOS 2019 A 2023.**

Compuestos/año	2019	2020	2021	2022	2023
Cloruro de potasio	1.082.059	1.509.723	1.394.456	1.066.666	1.177.670
Sulfato de potasio	26.435	25.466	20.721	4.975	s/i
<b>Total de compuestos de potasio</b>	<b>1.108.494</b>	<b>1.535.189</b>	<b>1.415.177</b>	<b>1.071.641</b>	<b>1.177.670</b>

Fuente: Sernageomin (2024).  
t: tonelada.  
s/i: sin información.

## Boro (B)

La producción mundial de boro, que proviene principalmente de depósitos sedimentarios, sitúa a Turquía y a EE. UU. entre los más importantes productores mundiales de boratos refinados, no obstante, la producción de EE. UU. no está registrada en USGS (2024). De esa forma, países como Chile, Argentina, Perú y Bolivia que explotan los boratos contenidos en las salmueras y en las costras de salares de la cordillera andina, junto con China ocupan los siguientes cinco lugares en la producción.

La producción mundial de boro de los años 2022 y 2023 se muestra en la tabla 18.

**TABLA 18. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BORO Y TIPOS DE DEPÓSITOS, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023		Tipo de depósito
	Producción (kt)	Participación (%)	Producción (kt)	Participación (%)	
Turquía	2.200	n/d	2.200	n/d	Sedimentario
Chile	360	n/d	360	n/d	Salar
Perú	200	n/d	200	n/d	Salar
China	200	n/d	200	n/d	Salar, metasedimentario
Bolivia	170	n/d	170	n/d	Salar
Argentina	130	n/d	130	n/d	Sedimentario, salar
Rusia	80	n/d	80	n/d	Metamórfico
Alemania	60	n/d	60	n/d	Sedimentario
Total mundial	n/d	n/d	n/d	n/d	-

Fuente: USGS (2024), producción mundial; Elzea *et al.* Ed. (2006), tipos de depósitos.  
n/d: no disponible.

Nota 1: no se indica el total mundial ni la participación de cada país en la producción, pues las producciones se refieren a diferentes productos que no son sumables.

Nota 2: la producción de EE. UU. no es registrada por motivos de confidencialidad de las empresas productoras.

La producción nacional de compuestos de boro es efectuada por la empresa Química e Industrial del Bórax, Quibórax, mediante la explotación de las costras salinas de los salares Surire y Ascotán, ubicados en el altiplano de las regiones de Arica y Parinacota y de Antofagasta, respectivamente. La producción de ulexita, que representa la producción nacional, ha experimentado un incremento de un 27,81% en el período considerado (Tabla 19).

**TABLA 19. PRODUCCIÓN NACIONAL DE COMPUESTOS DE BORO (t), AÑOS 2019 A 2023.**

Compuestos/año	2019	2020	2021	2022	2023
Ulexita	352.255	288.103	363.032	421.935	450.239
Ácido bórico	86.535	105.470	104.137	171.422	101.875
Total de compuestos de boro	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d

Fuente: Sernageomin (2024).

n/d: no disponible.

Nota: las producciones de ulexita y ácido bórico no son sumables, pues la producción de este compuesto químico proviene de parte de la producción de ulexita.

La explotación de litio, potasio y boro desde salmueras involucra grandes desafíos ambientales, a causa del uso intensivo de agua. El proceso de explotación mediante evaporación implica, de manera general, la extracción de salmueras por medio de pozos de bombeo, las que luego se dejan evaporar en piscinas con la finalidad de recuperar salmueras con concentraciones aptas para ser enviadas a las plantas de procesamiento químico. Este proceso genera un gran déficit hídrico, acrecentado por el hecho que las faenas se realizan en zonas áridas, con escasez de agua.

Debido a esta situación se han generado nuevas tecnologías de extracción, como la Extracción Directa de Litio (EDL) (SUNRESIN, s.f.), la que permite extraer salmueras y recuperar el litio directamente, sin la necesidad de utilizar evaporación, para luego reinyectar la salmuera residual en el salar. Estas nuevas tecnologías posibilitan no solo disminuir la huella hídrica generada por la explotación, sino que también optimizar los procesos a causa de sus elevados porcentajes de eficiencia en la extracción del litio (>70%). Entre los distintos tipos de EDL y sus tecnologías, se mencionan los siguientes: absorción específica, intercambio iónico, extracción por solvente, nanofiltración por membrana selectiva, electrodiálisis de salmuera y extracción electroquímica.

Si bien la EDL asegura generar una explotación con menor impacto ambiental y más eficiente, sus tecnologías están aún en desarrollo y su aplicación está condicionada por las características químicas de la salmuera a explotar. Otro punto importante es el gran desafío que supone la reinyección de salmueras al salar, ya que muchos expertos indican que el éxito de este proceso está directamente condicionado por el nivel de información hidrogeológica existente o disponible del salar explotado. Ello, porque una mala implementación de esta etapa podría generar desequilibrios extremos tanto para el ambiente salino como para los ecosistemas adyacentes al salar, además de descensos en los contenidos de litio a causa de la mezcla de salmueras ya explotadas con las no explotadas, y la dilución de estas últimas.

#### 4.1.2.3. Recursos y reservas de litio, potasio y boro en el mundo y en Chile

Actualmente, Chile es el país con las mayores reservas mundiales de litio, con el 33,59% del total, seguido de Australia con 22,57% y Argentina con 13% (Tabla 17) (USGS, 2023, 2024), participación que, sin embargo, muestra una clara tendencia a la baja si se considera que disminuyó de un 54% el año 2015 a un 35,7% el año 2022. A pesar de ello, este fenómeno, que se explica tanto por un incremento en la explotación como por la ausencia de exploración orientada al aumento de las reservas, deberá revertirse a causa del descubrimiento de nuevas fuentes de litio, resultantes de actividades públicas y privadas de exploración orientadas a abastecer la creciente demanda de este recurso.

Las reservas mundiales de litio del período 2022-2023 se muestran en la tabla 20, lideradas por Chile con un 33,59% del total el año 2023.

**TABLA 20. RESERVA MUNDIAL DE LITIO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reservas (kt)	Participación (%)	Reservas (kt)	Participación (%)
Chile	9,3	35,70	9,3	33,59
Australia	6,27	23,07	6,25	22,57
Argentina	2,7	10,36	3,6	13,00
China	2	7,68	3	10,83
EE. UU.	1	3,84	1,1	3,97
Canadá	0,93	3,57	0,93	3,36
Zimbabue	0,31	1,19	0,31	1,12
Brasil	0,25	1,19	0,39	1,41
Portugal	0,06	0,23	0,06	0,22
Otros	3,3	12,67	2,8	10,11
Total mundial	<b>26,05</b>	<b>100</b>	<b>27,69</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).  
kt: miles de toneladas.

Las reservas de potasio, expresadas como K<sub>2</sub>O equivalente, se muestran en la tabla 21. No se incluyó a Israel y Jordania pues recuperan potasio desde el mar Muerto, el que se estima que contiene 2 billones de toneladas de KCl. La tabla 21 permite destacar a Canadá como líder mundial, con 30,64% de las reservas mundiales el año 2023, seguido por Bielorrusia con 20,89% y Rusia con 18,11% y Chile con 2,79% de las reservas. No se evidencian cambios significativos respecto del año anterior.

**TABLA 21. RESERVA MUNDIAL DE POTASIO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	K <sub>2</sub> O eq. (Mt)	Participación (%)	K <sub>2</sub> O eq. (Mt)	Participación (%)
Canadá	1,10	33,03	1,10	30,64
Bielorrusia	0,75	22,52	0,75	20,89
Rusia	0,4	12,01	0,65	1con 8,11
EE. UU.	0,22	6,61	0,22	6,13
China	0,17	5,11	0,18	5,01
Alemania	0,15	4,5	0,15	4,18
Chile	0,10	3,00	0,10	2,79
Laos	0,08	2,25	0,08	2,09
España	0,07	2,04	0,07	1,89
Otros	0,3	9,01	0,3	8,36
<b>Total mundial</b>	<b>3,33</b>	<b>100</b>	<b>3,59</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).  
Mt: millones de toneladas.

Respecto del boro, las reservas mundiales se muestran en la tabla 22. Cabe mencionar que esta tabla no incluye a todos los países productores, pues la información acerca de recursos y reservas del USGS (2023, 2024), no incluye a Bolivia, Argentina y Alemania.

**TABLA 22. RESERVA MUNDIAL DE BORO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reservas (t)	Participación (%)	Reservas (t)	Participación (%)
Turquía	1.200.000	89,55	950.000	86,6
EE. UU.	40.000	2,99	48.000	4,38
Rusia	40.000	2,99	40.000	3,65
Chile	35.000	2,61	35.000	3,19
China	21.000	1,57	20.000	1,82
Perú	4.000	0,3	4.000	0,36
<b>Total mundial</b>	<b>1.340.000</b>	<b>100</b>	<b>1.097.000</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).  
t: tonelada.

En Chile, el único depósito en el que actualmente se explotan salmueras para la producción de compuestos de litio y potasio corresponde al salar de Atacama, donde la explotación es efectuada por las empresas SQM y Albemarle. En atención a que no existe

información actualizada generada por el Estado de Chile respecto de las reservas y recursos de litio del salar de Atacama, la información disponible es aquella aportada por las empresas mencionadas anteriormente. De esta forma, en sus reportes anuales del año 2023, la empresa SQM declaró las siguientes reservas y recursos de litio que se indican en la tabla 23, y que corresponderían al ámbito de las pertenencias mineras que le han sido entregadas por Corfo, bajo un contrato de arrendamiento, para su explotación.

**TABLA 23. RESERVAS Y RECURSOS DE LITIO Y POTASIO DE LA EMPRESA SQM EN EL SALAR DE ATACAMA.**

Salar de Atacama/ SQM	Reservas					
	Probadas		Probables		Totales	
Recurso	Cant. (vol. Mm <sup>3</sup> )	Ley (% por peso)	Cant. (vol. Mm <sup>3</sup> )	Ley (% por peso)	Cant. (vol. Mm <sup>3</sup> )	Ley (% por peso)
Litio	104	0,20	107	0,20	211	0,20
Potasio	104	2,31	107	2,16	211	2,24

Salar de Atacama/ SQM	Recursos							
	Medidos		Indicados		Indicados+medidos		Inferidos	
Recurso	Cant. (vol. Mm <sup>3</sup> )	Ley (% por peso)	Cant. (vol. Mm <sup>3</sup> )	Ley (% por peso)	Cant. (vol. Mm <sup>3</sup> )	Ley (% por peso)	Cant. (vol. Mm <sup>3</sup> )	Ley (% por peso)
Litio	2.254	0,20	1.435	0,16	3.689	0,18	1.614	0,133
Potasio	2.254	1,80	1.435	1,70	3.689	1,77	1.614	1,77

Fuente: SQM (2023).

Mm<sup>3</sup>: millones de metros cúbicos.

mg/l: miligramos por litro.

vol.: volumen

Cant.: cantidad.

Conc.: concentración.

De igual forma, en su reporte anual del mismo año, la empresa Albemarle informó las siguientes reservas y recursos de litio (Tabla 24), las que, también, corresponderían al ámbito de las pertenencias mineras entregadas por Corfo, bajo un contrato de arrendamiento, para su explotación.

**TABLA 24. RESERVAS Y RECURSOS DE LITIO DE LA EMPRESA ALBEMARLE EN EL SALAR DE ATACAMA.**

Salar de Atacama/ Albemarle	Reservas					
	Probadas		Probables		Totales	
Recurso	Cant. (miles de tm)	Conc. (mg/l)	Cant. (miles de tm)	Conc. (mg/l)	Cant. (miles de tm)	Conc. (mg/l)
Litio	321	2.354	210	2.050	531	2.226

Salar de Atacama/ Albemarle	Recursos							
	Medidos		Indicados		Indicados+medidos		Inferidos	
Recurso	Cant. (miles de tm)	Conc. (mg/l)	Cant. (miles de tm)	Conc. (mg/l)	Cant. (miles de tm)	Conc. (mg/l)	Cant. (miles de tm)	Conc. (mg/l)
Litio	471	2.390	363	1.943	834	2.195	237	1.617

Fuente: Albemarle (2023).  
Mm<sup>3</sup>: millones de metros cúbicos.  
Cant.: cantidad.  
Conc.: concentración.

#### 4.1.2.4. Prospectos y cartera de proyectos de litio

Debido a la gran demanda por este elemento para la transición energética, la exploración de litio a lo largo de los años ha tenido un alza sostenida. Según datos de Cochilco (2023), entre 2010 y 2022 Chile ha recibido el 9% del presupuesto mundial de exploración de litio, con lo que se ubica en el quinto lugar mundial, detrás de Argentina (22%), EE. UU. (16%), Australia (15%) y Canadá (12%). Al analizar la exploración nacional, entre 2010 y 2020, se aprecia que SQM lideró las exploraciones con un 58% del presupuesto. Sin embargo, Codelco-Chile registró un presupuesto de USD 13,3 millones en 2021 y USD 15,3 millones en 2022, equivalente al 63% del presupuesto total nacional en dicho periodo, todo orientado al salar de Maricunga, y SQM, por su parte, ha contado con USD 18,8 millones en 2021-2022, equivalente al 24% del total nacional.

En la tabla 25 se muestran los principales prospectos de litio en Chile.

**TABLA 25. LISTADO DE SALARES/LAGUNAS EN EXPLOTACIÓN Y PROSPECTOS DE LITIO EN CHILE.**

<b>Proyecto</b>	<b>Empresa mayoritaria</b>	<b>Estado</b>
Salar de Atacama	SQM	Explotación
Salar de Pedernales	Codelco	Prospecto
Salar de Maricunga	Codelco	Prospecto
Salar de La Isla	Enami	Prospecto
Salar de Pajonales	Enami	Prospecto
Salar de Aguilar	Enami	Prospecto
Salar de Las Parinas	Enami	Prospecto
Laguna Verde	CleanTech Lithium	Prospecto
Laguna del Negro Francisco	CleanTech Lithium	Prospecto

#### **4.1.2.5. Potencial prospectivo de litio**

Estudios hechos por instituciones del Estado y empresas privadas en los salares preandinos Atacama, Pedernales y Maricunga han sido efectuados con el propósito de conocer su potencial de Li y de otros elementos de interés, y determinar sus potenciales recursos y reservas. Dichos estudios, realizados en el salar de Atacama a partir de los inicios de la década del 60 del siglo XX por el ex-Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) y la Corporación de Fomento (Corfo), condujeron a la explotación de este salar, el único que está actualmente en producción en el país, registrada por litio desde 1984 y por potasio desde 1994.

Continuando con esta labor, Sernageomin llevó a cabo estudios en los salares del norte de Chile como parte de la elaboración del Mapa de Rocas y Minerales Industriales de Chile, escala 1:1.000.000, que implicó la georreferenciación, el reconocimiento geológico y la caracterización química de costras de estos salares (Gajardo *et al.*, 2003). Esta labor continuó, entre el 2010 y 2023, con estudios focalizados en determinar el potencial como fuente de Li de los salares andinos, con base en el estudio de 15 salares efectuado entre los años 2010 (Gajardo y Carrasco, 2010) y 2013 (Troncoso *et al.*, 2013), ubicados tanto en la región de Antofagasta (Tara, Aguas Calientes Norte, Pujsa, Loyoques o Quisquiro, Aguas Calientes Centro, El Laco, Aguas Calientes Sur, Aguas Calientes Sur Sur y Pajonales) como en la región de Atacama (Gorbea, Agua Amarga, La Isla, Las Parinas, Aguilar y Grande). Estos salares fueron seleccionados a partir de los 40 salares andinos existentes en el norte del país, según los siguientes factores: contenido de Li equivalente (mg/l), área del salar (km<sup>2</sup>), razón Li/K,



razón Li/Mg y ambiente geológico, lo que permitió determinar para 7 de ellos dos niveles de potencial de litio, potencial medio: Loyoques o Quisquiro, Tara, Aguilar y Las Parinas, y potencial alto: Aguas Calientes Centro, Pajonales y La Isla. De estos salares, por medio de estudios de mayor detalle realizados por Sernageomin entre los años 2019 y 2022 (Carrasco y Cádiz, 2019, 2020, 2021, 2022), se identificaron 4 salares andinos con recursos potenciales de Li: de Pajonales (región de Antofagasta) y de La Isla, Las Parinas y Aguilar (región de Atacama). Todos ellos, en términos de los recursos potenciales identificados, constituirían el principal interés actual para una eventual exploración y explotación.

Sin embargo, la real factibilidad de explotación de estos 4 salares, así como de los restantes salares andinos que presenten potencial interés de Li y otros recursos, deberá estar definida por estudios que permitan determinar tanto los recursos y reservas de Li, y eventualmente de K y B, como las reales ventajas comparativas para su exploración y explotación de recursos salinos, considerando, especialmente, factores geológicos, climáticos y ambientales, dadas las particulares características de estos salares y de la zona altiplánica donde se distribuyen (Troncoso *et al.*, 2013).

La determinación del potencial de litio en salares del norte de Chile es altamente estratégica para la toma de decisiones del Estado respecto a su eventual explotación y uso, considerando que lo anterior debe llevarse a cabo en un marco de sustentabilidad y respeto por los diversos ecosistemas existentes en las cuencas preandinas y andinas, y en el altiplano de esta zona del país.

En el año 2023 se dio a conocer la Estrategia Nacional del Litio (Gobierno de Chile, 2023) que contempla, entre sus objetivos, la habilitación de una serie de salares para ser explorados, y eventualmente explotados, por empresas del Estado y/o privadas. Para ello, el Ministerio de Minería, en conjunto con otras carteras del Estado, ha realizado un proceso de identificación de salares y lagunas salinas que serán excluidos de cualquier procedimiento de otorgamiento de contratos especiales de operación de litio (CEOL). En ese sentido, esta estrategia considera la creación de una “Red de Salares Protegidos” y, en aquellos salares que están siendo explotados actualmente, el aseguramiento del uso de tecnologías de bajo impacto ambiental. Además, en ese documento se reconoce que los salares son ecosistemas complejos, únicos y altamente biodiversos.

Según lo señalado en la Estrategia Nacional del Litio (Gobierno de Chile, 2023), en las tablas 26 y 27 se indican los salares con las mejores perspectivas como fuente de este recurso.

### Salares para habilitar proyectos con participación mayoritaria del Estado

Aquello en que, dada su importancia estratégica, el Estado tendrá una participación mayoritaria en las alianzas público-privadas destinadas a la explotación del litio (Tabla 26).

**TABLA 26. SALARES PARA DESARROLLAR PROYECTOS CON PARTICIPACIÓN MAYORITARIA DEL ESTADO.**

Salar	Ambiente	Región	Área (km <sup>2</sup> )
Atacama	Preandino	Antofagasta	3.417
Maricunga	Preandino	Atacama	144

Fuente: Gobierno de Chile (2023).

### Salares para habilitar proyectos liderados por empresas del Estado

Los salares en los que Codelco-Chile y la Empresa Nacional de Minería (Enami) podrán desarrollar sus proyectos, implementando alianzas público-privadas con la flexibilidad que requiera cada iniciativa, son, respectivamente, el salar de Pedernales y los salares Aguilar, Grande, La Isla y Los Infieles, en el marco de los proyectos de salares preandinos y andinos (Tabla 27).

**TABLA 27. SALARES PARA HABILITAR PROYECTOS LIDERADOS POR EMPRESAS DEL ESTADO.**

Salar	Ambiente	Región	Área (km <sup>2</sup> )
Pedernales	Preandino	Atacama	327
Aguilar	Andino	Atacama	80
Grande	Andino	Atacama	32
La Isla	Andino	Atacama	158
Los Infieles	Andino	Atacama	7

Fuente: Gobierno de Chile (2023).

## **4.2. SEGUNDO GRUPO**

En el segundo grupo se consideran cinc, yodo y nitratos; el cinc, con escasa producción actual y limitada incidencia en la economía nacional, pero, con conocimiento de recursos y reservas debido a diversos proyectos de exploración a lo largo del país, tiene una gran expectativa de participación en la transición energética; el yodo, con una importante producción que ha situado históricamente al país en el primer lugar de la producción mundial, y los nitratos, que si bien tienen una producción menor al 1% de la producción mundial de compuestos nitrogenados, representan la única fuente natural de estos compuestos en el mercado mundial, ambos, con conocimiento de sus recursos y reservas, un bajo riesgo de agotamiento y una moderada incidencia en la economía nacional, tienen una significativa participación en la seguridad alimentaria.

### **4.2.1. Cinc (Zn)**

El cinc es un metal maleable, dúctil, buen conductor de calor y la electricidad. Se encuentra en la naturaleza en distintas especies minerales como sulfuros, óxidos, silicatos y carbonatos. Se usa mayormente como recubrimiento anticorrosivo de metales (galvanización) y para aleaciones en la industria eléctrica y aeronáutica. En energías verdes se utiliza en tecnologías eólicas y almacenamiento energético.

#### **4.2.1.1. Contexto geológico de los depósitos de cinc en el mundo y en Chile**

Existe una gran variedad de tipos de yacimientos de cinc en el mundo. Los más importantes, de acuerdo con su producción, son los depósitos volcanogénicos de sulfuros masivos (VMS) entre los cuales se encuentran los de tipo sedimentario-exhalativo (Sedex). Estos yacimientos se forman en los fondos marinos y, en general, son estratiformes (lenticulares) y contienen mineralización polimetálica compuesta de metales preciosos (Au-Ag) y metales base (Cu, Fe, Pb, Zn, Ni), y se hospedan en series de rocas volcánicas y/o volcanosedimentarias, asociados espacialmente a rocas intrusivas (Maksaev, 2001; Jorge *et al.*, 2003).

En Chile existen depósitos tipo VMS, pero de escasa relevancia económica en la actualidad. Hay descripciones de pequeños depósitos de sulfuros con pirita-calcopirita y pirita-

calcopirita-pirrotina-esfalerita a lo largo de la cordillera de Nahuelbuta, restringidos a los esquistos verdes de edad paleozoica de la Unidad Cabo Tirúa (Oyarzún y Clemmey, 1986). Este tipo de mineralización se encuentra, p. ej., en la mina Vieja de Tirúa e inmediatamente al sur de la misma localidad, en Casa de Piedra, Huenalibén y Trovolhue (Oyarzún y Clemmey, 1986; Maksaev, 2001). También se describen sulfuros masivos en la región de Magallanes y la Antártica Chilena, alojados en esquistos y metabasaltos de la costa, como los depósitos Cutter Cove y La Serena (Maksaev, 2001) y otros más pequeños, como Ancón (Oyarzún y Clemmey, 1986).

Aunque existen localmente otros depósitos con cinc en el país, estos son de pequeño tamaño, en los que el cinc es un subproducto y/o su producción no es económica. En los pórfidos se han reconocido minerales de cinc en vetas dispuestas en sus zonas marginales. Camus y Castelli (2021) mencionan el caso de Chuquicamata, donde hay presencia significativa de cinc en la parte central alta del sistema, pero cuya recuperación no es económica. En la cordillera de la Costa de la región de Atacama, también se han reconocido depósitos de Pb-Zn, estratiformes, pero de pequeñas dimensiones, como es el caso del yacimiento Bellavista-La Jaula, y también en la región de Valparaíso, en las minas Unión-Restauradora y Veta Grande, ambas actualmente sin producción (Camus y Castelli, 2021; Ortega *et al.*, 2022). Aunque la región de Coquimbo tuvo una producción de cinc, así queda reflejado en los registros de los años 2017 a 2019, esta no fue significativa respecto del aporte de las otras dos regiones, al representar menos del 1% de la producción total nacional (Sernageomin, 2023a).

Los tipos de depósitos de mayor interés actual en el país son un depósito epitermal de baja sulfuración ubicado en la localidad de Alhué, región Metropolitana de Santiago, que consiste en un sistema de vetas de cuarzo con metales preciosos y metales base, cuyas leyes varían entre 1,5 y 12 g/t de Au, 6 y 100 g/t de Ag y 0,1 y 1,81 % de Zn; además de los cuerpos mineralizados de tipo *skarn* de Zn-Pb-(Au), alojados en rocas calcáreas cretácicas del distrito polimetálico El Toqui, en la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, entre los que destacan Doña Rosa (Pb-Zn), Rosa Oeste y Estatuas (Zn-Au) (Camus y Castelli, 2021).

#### 4.2.1.2. Producción mundial y nacional de cinc

El mayor productor mundial es China con 4 Mt en el año 2023 (USGS, 2024), le sigue Perú con 1,4 Mt, con el yacimiento Antamina de tipo *skarn* como principal fuente de cinc (Tabla 28).

**TABLA 28. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE CINCO Y TIPOS DE DEPÓSITOS, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023		Tipo de depósito
	Producción (kt)	Participación (%)	Producción (kt)	Participación (%)	
China	4.040	32,22	4.000	32,84	Magmáticos polimetálicos, sedimentarios relacionados con estructuras y metamórficos de Pb y Zn.
Perú	1.370	10,93	1.400	11,49	Tipo <i>skarn</i> , epitermales polimetálicos, sulfuros masivos y vetas de reemplazo
Australia	1.240	9,89	1.300	10,67	Sedimentario exhalativo (Sedex).
India	840	6,70	860	7,06	Sedimentario exhalativo (Sedex).
EE. UU.	761	6,07	750	6,16	Sedimentario exhalativo (Sedex).
Otros	4.286	34,19	3.870	31,77	-
Total mundial	12.537	100,00	12.180	99,99	-

Fuente: USGS (2024); Maksaev (2001); Jorge *et al.* (2003).  
kt: miles de toneladas

La producción nacional de cinc está actualmente restringida a las regiones Metropolitana de Santiago y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, reportada, respectivamente por Minera Florida, en la localidad de Alhué y por el distrito polimetálico El Toqui, en la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

En la tabla 29 se muestra la producción nacional de cinc del período 2019-2023, la que correspondió a finos contenidos en concentrados de cinc y de plomo (Sernageomin, 2024). La producción nacional de cinc ha venido decreciendo desde el año 2020, solo entre el 2022 y 2023 se redujo en aproximadamente un 8,44%.

**TABLA 29. PRODUCCIÓN NACIONAL DE CONCENTRADOS DE CINCO (tmf) POR REGIÓN, AÑOS 2019 A 2023.**

Región/año	2019	2020	2021	2022	2023
Coquimbo	6	s/i	s/i	s/i	s/i
Metropolitana de Santiago	5.614	6.062	6.299	6.010	4.548
Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	s/i	22.600	21.616	18.082	17.511
<b>Total nacional</b>	<b>5.620</b>	<b>28.662</b>	<b>27.915</b>	<b>24.092</b>	<b>22.059</b>

Fuente: Sernageomin (2024).

s/i: sin información.

tmf: toneladas métricas de finos.

#### 4.2.1.3. Recursos y reservas de cinc en el mundo y en Chile

Los recursos identificados de cinc en el mundo son del orden de 1,9 billones de toneladas. El país con las mayores reservas el 2023 fue Australia con 64.000 kt, seguido por China con 44.000 kt y Rusia con 25.000 kt (Tabla 30).

**TABLA 30. RESERVA MUNDIAL DE CINCO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reservas (kt)	Participación (%)	Reservas (kt)	Participación (%)
Australia	66.000	31,72	64.000	28,57
China	31.000	14,9	44.000	19,64
Rusia	22.000	10,57	25.000	11,16
Perú	17.000	8,17	21.000	9,38
México	12.000	5,77	14.000	6,25
Otros	60.100	28,88	56.000	25,00
<b>Total mundial</b>	<b>208.100</b>	<b>100</b>	<b>224.000</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024)

kt: miles de toneladas.

Las reservas y recursos de cinc actualmente conocidos en el país corresponden a los de la Minera Florida del año 2023, los que se indican en la tabla 31.

**TABLA 31. RECURSOS Y RESERVAS DE CINCO DE MINERA FLORIDA (ALHUÉ).**

Recursos/Reservas	Categorías	Toneladas (Mt)	Ag (g/t)	Au (g/t)	Zn (%)
<b>Recursos</b>	Medidos	1,7	18	3,21	1,23
	Indicados	4,5	18	3,32	1,03
	Inferidos	4,9	15	2,93	0,83
<b>Reservas</b>	Probadas	0,9	26	3,25	1,15
	Probables	2,0	20	3,28	0,93

Fuente: Pan American Silver (2023).

Nota: datos al 30 de junio del 2023.

Mt: millones de toneladas.

g/t: gramos por toneladas.

#### **4.2.1.4. Prospectos y cartera de proyectos de cinc**

En Chile existen diversos proyectos de exploración avanzada con cinc como subproducto. La mayoría de ellos son vetas polimetálicas de baja a intermedia sulfuración.

En la tabla 32 se entrega un listado de estos tipos de proyectos.

**TABLA 32. PROYECTOS DE EXPLORACIÓN AVANZADA POR CINC**

Proyecto	Tipo de yacimiento	Compañía mayoritaria	Estado	Tipo de depósito	Recursos y reservas
<b>Paguanta</b>	Polimetálico de Zn-(Ag-Au-Pb)	Golden Rim Resources	Exploración avanzada	Epitermal polimetálico de sulfuración intermedia	2,4 Mt @5% de Zn, 1,4% de Pb, 88 g/t de Ag y 0,3 g/t de Au (8% de Zn eq.), con el 50% de los recursos como medidos e indicados.
<b>Ciclón-Exploradora CIEX</b>	Polimetálico de Cu-Zn-Ag-Au	Minera Activa	Exploración avanzada	Epitermal polimetálico de sulfuración intermedia	Recursos indicados e inferidos: 10,1 Mt, @1,02% de CuT, 2,53% de Zn, 0,91% de Pb, 61 g/t de Ag y 0,22 g/t de Au.
<b>Challacollo</b>	Polimetálico de Ag- (Pb, Zn, Au)	Aftermath Silver	Exploración avanzada	Epitermal polimetálico de baja sulfuración	Recurso de 9,4 Mt.
<b>El Inca</b>	Polimetálico de Ag-Au-(Cu, Pb, Zn)	Mineral Opportunities SpA	Exploración avanzada	Epitermal polimetálico de baja sulfuración	Recursos de 4,7 Mt (estimado).
<b>Cachinal</b>	Polimetálico de Ag- (Au, Zn)	Honey Badger Silver Inc.	Exploración avanzada	Epitermal polimetálico de baja sulfuración	Recursos de 5,6 Mt.
<b>Isidora</b>	Polimetálico de Au- (Ag, Pb, Zn)	APM Ltda	Exploración avanzada	Vetas epitermales polimetálicas	Recursos de 2,1 Mt (estimado).
<b>Taitao</b>	Polimetálico de Au, Ag-(Pb, Zn)	Mitre Mining	Exploración avanzada ( <i>brownfield</i> )	Epitermal polimetálico de baja sulfuración	Recursos de 3,8 Mt.

Fuente: Chilepolimetálico (2021); Ministerio de Minería (2024).

Mt: millones de toneladas.

g/t: gramos por toneladas.

#### 4.2.2. Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

El nitrógeno es un elemento con gran distribución en la superficie terrestre, donde constituye el 78% de la atmosfera, y forma parte esencial de la biosfera mediante el ciclo del nitrógeno. Junto con el fósforo y el potasio, es uno de los principales nutrientes de las plantas, característica que lo convierte en un elemento clave en la elaboración de fertilizantes para la agricultura. Los nitratos son compuestos nitrogenados naturales (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), altamente solubles en agua que se presentan como nitrato de sodio (NaNO<sub>3</sub>) y nitrato de potasio (KNO<sub>3</sub>), en depósitos salinos ubicados en zonas desérticas y asociados a sulfatos, cloruros, boratos y carbonatos.



#### **4.2.2.1. Contexto geológico de los depósitos salinos de nitratos en el mundo y en Chile**

En Chile se han descrito los únicos depósitos de nitratos naturales que por su tamaño y leyes son de interés económico en el mundo, no obstante, se han encontrado diferentes concentraciones de este recurso en distintos desiertos del mundo (Elzea *et al.*, Ed., 2006). Los depósitos chilenos se distribuyen, en forma irregular, según una franja de unos 700 km de dirección N-S, con un ancho variable entre 30 y 50 km (Ericksen, 1981), adyacentes a la parte oriental de la cordillera de la Costa y occidental de la depresión Central, en las regiones de Tarapacá y Antofagasta, zona norte del país.

El caliche, la mena de los depósitos de nitratos chilenos, se encuentra rellenando los poros y el sistema fisural (diaclasas, microfallas y fallas) de rocas de edad y naturaleza diversas, así como en diseminaciones irregulares en estas rocas. Asimismo, se presenta en rocas metamórficas, volcánicas, volcánoclasticas, sedimentitas terrígenas y carbonáticas, e intrusivos de edades que abarcan del Paleozoico al Cenozoico. Lo más frecuente es, sin embargo, encontrar este compuesto rellenando los poros de materiales volcanoclasticos que forman parte de sistemas aluviales, como piedemontes y abanicos aluviales coalescentes (Pueyo *et al.*, 1998).

Los procesos de formación de los depósitos de nitratos han sido investigados durante décadas, especialmente los mecanismos para la proveniencia y fijación del nitrógeno que constituyen los procesos de mayor dificultad (Ericksen, 1981; Chong, 1984).

#### **4.2.2.2. Producción mundial y nacional de nitratos**

Chile tiene la totalidad de la producción mundial registrada de nitratos naturales. Sin embargo, esta producción, que representa del orden del 1% de la producción mundial anual de compuestos nitrogenados, no está incluida en la producción mundial, la que se expresa como nitrógeno contenido e incluye a 22 países (USGS, 2024). No obstante, este recurso compite con los nitratos sintéticos, los cuales son elaborados con procesos industriales de “neutralización ácido-base”, entre ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) o carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). La ventaja de la producción de nitratos sintéticos radica en su flexibilidad, ya que estos procesos pueden realizarse en diversas ubicaciones del mundo, con insumos de fácil acceso, que originan productos de muy buena calidad. Sin embargo, los nitratos de Chile son de vital importancia para la agricultura mundial, debido a su condición de recursos naturales, respecto de la oferta de compuestos nitrogenados sintéticos disponibles en el mercado.

En Chile, la producción de nitratos proviene de las regiones de Tarapacá y Antofagasta. En la tabla 33 se muestra la producción nacional del periodo 2019-2023, la que se ha mantenido relativamente constante, pero con una disminución de 14,27% en el año 2023 respecto del 2022.

**TABLA 33. PRODUCCIÓN NACIONAL DE NITRATOS (t) POR REGIÓN, AÑOS 2019 A 2023.**

Región/año	2019	2020	2021	2022	2023
Tarapacá	53.003	70.248	50.296	66.537	64.952
Antofagasta	814.582	926.267	905.220	776.785	657.988
Total nacional	<b>867.585</b>	<b>996.515</b>	<b>955.516</b>	<b>843.322</b>	<b>722.940</b>

Fuente: Sernageomin (2024).

#### **4.2.2.3. Recursos y reservas de nitratos en el mundo y en Chile**

Las mayores reservas del mundo de nitratos naturales se encuentran en el norte de Chile, en las regiones de Tarapacá y Antofagasta, aproximadamente entre los 19°00' y 26°00' S, y entre los 69°30' y 70°30' O (Ericksen, 1981).

Los recursos y reservas de caliche en Chile, estimados por Sernageomin al año 2007, ascendían a 2.459 millones de toneladas, con una ley media de 6,3% de nitratos (Cochilco, 2013). Actualmente no existe información de carácter público referida a la totalidad de los recursos de nitratos en Chile.

#### **4.2.2.4. Prospectos y cartera de proyectos de nitratos**

No se cuenta con información respecto del desarrollo de proyectos de exploración para efectuar por las empresas productoras, en el área de distribución de los depósitos de nitratos en el norte de Chile, y de acuerdo con las características geológicas y genéticas de estos depósitos, no existen antecedentes de la existencia en el territorio nacional de otros sectores con depósitos de este recurso.

#### **4.2.3. Yodo (I)**

El yodo es un elemento no metálico, de número atómico 53, del grupo de los halógenos. Es de color gris oscuro, blando, brillante y se encuentra de forma sólida a temperatura

ambiente. El yodo posee múltiples aplicaciones, entre las cuales destaca su uso para la fabricación de antisépticos y como aditivo en la sal (yodada) de mesa en medidas de salud pública para prevenir enfermedades que afecten la tiroides, p. ej., el bocio y el hipotiroidismo. En la naturaleza se encuentra comúnmente como yodatos y yoduros, y los minerales con mayor interés económico por este elemento son lautarita ( $\text{Ca}[\text{IO}_3]_2\text{H}_2\text{O}$ ), bruggenita ( $\text{Ca}[\text{IO}_3]\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) y dietzita ( $\text{Ca}_2[\text{IO}_3]_2[\text{CrO}_4]$ ).

#### **4.2.3.1. Contexto geológico de los depósitos salinos de yodo en el mundo y en Chile**

El yodo se encuentra en salmueras de muchos sistemas salinos e incluso en el agua de mar, donde existen concentraciones promedio de alrededor de 0,05 ppm. Sin embargo, una fuente de gran importancia son los depósitos de nitratos de Chile, donde existe como yodato de calcio (lautarita y bruggenita) y yodo-cromato de calcio (dietzita), con concentraciones promedio de 400 ppm (0,04% de yodo en peso) y, en casos puntuales, puede alcanzar los 0,3 a 0,4% de yodo. El yodo también está presente en salmueras asociadas a depósitos de gas natural y de petróleo, como en Japón, y en salmueras enriquecidas en yodo, como en EE. UU. (Elzea *et al.* Ed., 2006).

Los recursos de yodo en Chile se encuentran principalmente en los depósitos de nitratos de las regiones de Tarapacá y Antofagasta, con una distribución similar a la de esos depósitos, así como en los depósitos de residuos de su explotación, denominados “tortas de ripio salitral”. El yodo es producido a partir de la lixiviación con agua del caliche y de los materiales residuales, el yodato contenido en la solución se trata en plantas químicas para transformarlo en yodo elemental, en forma de esferas (*prill* o perlado).

#### **4.2.3.2. Producción mundial y nacional de yodo**

Chile mantuvo el primer lugar como país productor de yodo, en los años 2022 y 2023, con el doble de producción respecto del segundo lugar ocupado por Japón (Tabla 34). El resto de los países, Turkmenistán, Irán, Azerbaiyán, Indonesia y Rusia tienen una participación minoritaria, y la producción de EE. UU. no está registrada.

**TABLA 34. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE YODO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Producción (t)	Participación (%)	Producción (t)	Participación (%)
Chile	19.200	63,85	19.000	63,90
Japón	9.200	30,60	9.000	30,27
Turkmenistán	770	2,56	800	2,70
Irán	700	2,33	700	2,35
Azerbaiyán	170	0,57	200	0,67
Otros	32	0,10	33	0,11
<b>Total mundial</b>	<b>30.072</b>	<b>100</b>	<b>29.733</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).

t: tonelada.

Nota: la producción de EE. UU. no es registrada por motivos de confidencialidad de las empresas productoras.

En Chile, al igual que en el caso de los nitratos, el yodo proviene en su totalidad de las regiones de Tarapacá y Antofagasta. En la tabla 35 se muestra la producción nacional de yodo en el periodo 2019-2023, donde se aprecia, con excepción del año 2021, un alza sostenida, principalmente liderada por la producción de la región de Tarapacá. La región de Antofagasta, por su parte, ha tenido un descenso sostenido de su producción, con una disminución de un 29,79% en el periodo 2019-2023.

**TABLA 35. PRODUCCIÓN NACIONAL DE YODO (t) POR REGIÓN, AÑOS 2019 A 2023.**

Región/año	2019	2020	2021	2022	2023
Tarapacá	13.295	14.384	13.055	15.538	17.150
Antofagasta	7.531	7.557	6.139	5.078	5.287
<b>Total nacional</b>	<b>20.826</b>	<b>21.941</b>	<b>19.194</b>	<b>20.616</b>	<b>22.437</b>

Fuente: Sernageomin (2024).

t: tonelada.

#### 4.2.3.3. Recursos y reservas de yodo en el mundo y en Chile

Con respecto a las reservas mundiales de yodo en el mundo, Chile ocupa el segundo lugar con el 9,90%, después de Japón que está en el primer lugar con el 79,55%, cifra relacionada con sus yacimientos de gas y petróleo, de cuya producción la de yodo es un subproducto. Después de Chile se sitúan EE. UU. con 4,06%, Azerbaiyán con 2,76 % y Rusia con 1,95 % (Tabla 36).

**TABLA 36. RESERVA MUNDIAL DE YODO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reservas (t)	Participación (%)	Reservas (t)	Participación (%)
Japón	4.900.000	80,07	4.900.000	79,55
Chile	610.000	9,97	610.000	9,90
EE. UU.	250.000	4,08	250.000	4,06
Azerbaiyán	170.000	2,78	170.000	2,76
Rusia	120.000	1,96	120.000	1,95
Otros países	70.000	1,14	110.000	1,79
<b>Total mundial</b>	<b>6.120.000</b>	<b>100</b>	<b>6.160.000</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).  
t: tonelada.

#### **4.2.3.4. Prospectos y cartera de proyectos de yodo**

No se cuenta con información respecto del desarrollo de proyectos de exploración a efectuar por las empresas productoras, en el área de distribución de los depósitos de yodo en el norte de Chile, y de acuerdo con las características geológicas y genéticas de estos depósitos, no hay antecedentes de la existencia de otros sectores en el territorio nacional con depósitos de este recurso.

### **4.3. TERCER GRUPO**

En el tercer grupo se consideran el cobalto, las tierras raras y el titanio, minerales sin producción actual, pero con antecedentes históricos de explotación de cobalto, con su máximo en la década del 40 del siglo XX, y sin registros de producción de ETR y titanio. Estos recursos se encuentran, actualmente, en proceso de exploración y con interesantes perspectivas para determinar recursos, reservas y leyes, que fundamenten su explotación, minimicen los riesgos de su agotamiento, y aseguren su participación en la transición energética y en la economía nacional.

### **4.3.1. Cobalto (Co)**

#### **4.3.1.1. Contexto geológico de los depósitos de cobalto en el mundo y en Chile**

La producción mundial del cobalto corresponde a un subproducto de la producción de cobre, cinc o níquel, proveniente de una variedad de depósitos minerales, entre los que destaca la franja de depósitos estratoligados de Cu-Co de África Central y los depósitos lateríticos de Ni de Indonesia, que suman más del 80% de la producción del año 2023 (USGS, 2024).

Los tipos de yacimientos de mayor interés desde los que se obtiene cobalto en el planeta son:

#### **Depósitos estratoligados de Cu-Co**

Los depósitos estratoligados de África Central se ubican en la R.D. del Congo y en Zambia, se caracterizan por mineralización estratiforme lateralmente continua, de enormes dimensiones y pueden contener sulfuros diseminados o vetas (Hitzman *et al.*, 2012). Los minerales de mena principales son sulfuros de cobre diseminados, mientras que la mineralización supérgena contiene óxidos de cobre, junto con las concentraciones más altas de cobalto (heterogénita). Las leyes cercanas a la superficie comúnmente contienen entre 4 y 6% de Co, que pueden disminuir a 3% en profundidad, debido a que el cobalto, al ser menos móvil que el cobre, forma zonas de alta ley cerca de la superficie (Fay y Barton, 2012).

#### **Depósitos de lateritas de Ni-Co**

Estos depósitos son fuente importante de níquel mundialmente, y de cobalto, con leyes que alcanzan hasta 0,84% de CoO (Proenza, 2015), y se ubican en regiones tropicales como Indonesia, Filipinas, Cuba, Guatemala y República Dominicana. Se originan en la meteorización química de rocas ultramáficas ricas en olivino, con diferentes grados de serpentización. Los factores que controlan la formación de estos depósitos son los siguientes: la composición de la roca parental, el clima tropical, las morfologías favorables y la tasa de meteorización.

## Depósitos magmáticos de sulfuros de Ni-Co

Los depósitos magmáticos de sulfuros de Ni-Co tienen edades precámbricas, y los más importantes se ubican en Canadá, Rusia y Australia. Estos depósitos están asociados a rocas ígneas ultramáficas y máficas. La mineralización se localiza en la base de complejos magmáticos estratiformes, de *sills* o coladas, o bien, en las zonas de alimentación subyacente, donde forman cuerpos irregulares (Fay y Barton, 2012; Proenza, 2015).

En Chile, los depósitos que fueron explotados solo por cobalto como recurso principal son escasos, pequeños y están generalmente ligados al cobre, en distritos muy acotados, que se distribuyen entre las regiones de Atacama y Coquimbo (Fig. 4). Espacial y temporalmente son parte de la Franja Ferrífera de Chile, relacionada con la evolución del arco magmático del Cretácico Inferior, representada por yacimientos tipo óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG) y en menor medida de tipo óxidos de hierro-apatito (IOA), y, por lo tanto, se asocian a la franja metalogénica del Cretácico Inferior (Fig. 4). Destacan los distritos mineros de San Juan-Carrizal Alto ubicado en la región de Atacama y Tambillos-Minillas, en la región de Coquimbo, los que tuvieron una explotación relevante de cobalto. Estos distritos mineros pueden tener un potencial exploratorio remanente por cobalto como mena primaria, debido a que fueron explotados solo hasta los 100 m de profundidad, por lo que una exploración más profunda podría dar resultados positivos (Townley *et al.*, 2017).

En el distrito minero San Juan, la mineralización primaria se encuentra en sistemas de vetas con cobaltita ( $\text{CoAsS}$ ), con ley media de 1,6% de Co, y mineralización secundaria en horizontes oxidados compuestos por eritrina ( $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), con leyes de hasta 6,4% de Co, que fue la principalmente explotada. Estas vetas se encuentran hospedadas en rocas metamórficas del Paleozoico al Triásico y en rocas intrusivas de la zona costera. La Cobaltera, faena paralizada desde los años 40, es un ejemplo de este tipo de yacimiento en este distrito, y en la región de Atacama.

En el distrito minero Tambillos la mineralización existe mayoritariamente en vetas, con menor cantidad de brechas y cuerpos mantiformes, que contienen sulfuros de cobre y sulfosales de cobalto (cobaltita). Hacia niveles superiores predomina la oxidación cuprífera por sobre la eritrina que es más bien escasa. Los yacimientos mantiformes tienen menas primarias de cobre y cobalto, con cobaltita como mena primaria de cobalto. Las leyes de explotación de estas vetas variaron de 4 a 5% de Co, en el año 1942, a una ley media de 1% de Co, en 1968 (Cruzat, 1968; Townley *et al.*, 2017).

Los yacimientos en los que se explotó cobalto como mena principal, son los ubicados en la región Metropolitana de Santiago, en los sectores de El Volcán y Alto Maipo. Consisten en sistemas de vetas pequeñas, cuyas potencias son menores de 30 cm, con mineralización primaria de löllingita cobaltífera y danaita ((Fe, Co) AsS), además del escaso desarrollo de una zona de oxidación con asbolana y eritrina. Las leyes medias obtenidas para las distintas vetas variaron entre 0,5 y 0,7% de Co y las leyes máximas entre 2,4 y 2,58% de Co (Cruzat, 1968; Townley *et al.*, 2017). Debido a que no se cuenta con las edades de mineralización de estos yacimientos, no es posible relacionarlos metalogénicamente con la evolución magmática y tectónica de Chile central (Townley *et al.*, 2017).

Los yacimientos con potencial por cobalto como subproducto corresponden a los depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG) y a los de tipo óxido de hierro-apatito (IOA), de la franja metalogénica del Cretácico Inferior (Fig. 4), asociados al Sistema de Fallas de Atacama (SFA). Entre los depósitos de IOCG favorables para exploración está Manto Verde, y entre los depósitos de IOA, Los Colorados, El Algarrobo y El Romeral (Townley *et al.*, 2017).

Debido a la afinidad del cobalto con el arsénico, Townley *et al.* (2017) no descartan la existencia de mineral de cobalto en los yacimientos de tipo pórfido cuprífero. La posibilidad de recuperarlo en el mismo proceso metalúrgico utilizado para los concentrados sería, como en el caso del oro, un objetivo interesante para considerar. Tampoco descartan la presencia de cobalto en los yacimientos polimetálicos del tipo vetas y *skarns* de la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, y en los sulfuros masivos de la región de Magallanes y la Antártica Chilena, a pesar de los escasos estudios que existen al respecto.

En síntesis, considerando la afinidad del cobalto con el cobre, arsénico y hierro, todos los depósitos de cobre y hierro tienen un gran potencial para la obtención de sulfuros o arseniuros de cobalto, especialmente aquellos yacimientos ricos en arsénico (Kuyvenhoven y Townley, 2020); asimismo, los depósitos tipo IOCG e IOA ubicados en la Faja Ferrífera de Chile, ligada a la evolución del arco magmático del Cretácico Inferior, y con contenidos en el Sistema de Falla Atacama, son los yacimientos con mayor potencial para obtener cobalto en Chile.

También se deben considerar los pasivos ambientales generados por la minería, cuyos procesos de recuperación no toman en cuenta el cobalto y, por lo tanto, este mineral pasa directamente, junto con la ganga, a formar parte del relave. Hay estudios en relaves que no sobrepasan los 2 m de profundidad y que dieron concentraciones bajísimas de cobalto. Sin embargo, los sulfuros y sulfosales asociados al cobalto tienen alto peso específico, por lo que



su tendencia es de acumularse en profundidad, por lo que las bajas concentraciones, obtenidas a escasa profundidad, no resultan sorprendentes. Además, los relaves antiguos han experimentado oxidación, hidrólisis y posible lixiviación, procesos similares a un enriquecimiento secundario, que pudiesen haber favorecido una reconcentración del cobalto en profundidad (Townley *et al.*, 2017).

#### **4.3.1.2. Producción mundial y nacional de cobalto**

La electromovilidad ha generado una mayor demanda de cobalto, y aunque la mayor producción mundial proviene de la R.D. del Congo (Tabla 37), los conflictos sociales que existen en ese país motivan a los países consumidores a buscar alternativas. Otro gran productor es Indonesia que desplazó a un segundo lugar a Rusia. Si bien la producción en Indonesia tiene bajo costo por las técnicas de lixiviación utilizadas, el cobalto es un subproducto de la minería del níquel, por lo que su producción también puede verse afectada por las fluctuaciones en el precio de este mineral.

China es el principal consumidor de cobalto y también el principal refinador. La producción nacional proviene de la minería de cobre, níquel y hierro, de cuyas faenas el cobalto se obtiene como subproducto. Sin embargo, las minas económicamente rentables son pocas, debido a que la tasa de recuperación de este elemento es baja, el proceso para su obtención es complejo y el costo de producción es alto. Lo anterior implica que China dependa, en gran medida, de las importaciones (SMM, 2024).

**TABLA 37. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COBALTO Y TIPOS DE DEPÓSITOS, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023		Tipo de depósito
	Producción (t)	Participación (%)	Producción (t)	Participación (%)	
R.D. del Congo	144.000	73,1	170.000	73,91	Depósitos de cobre estratoligados
Indonesia	9.600	4,87	17.000	7,39	Lateritas con Ni-Co
Rusia	9.200	4,67	8.800	3,83	Depósitos magmáticos de sulfuros de Ni-Cu de rocas máficas y ultramáficas
Australia	5.790	2,94	4.600	2	Lateritas con Ni-Co y depósitos magmáticos de sulfuros de Ni-Cu de rocas máficas y ultramáficas
Filipinas	3.900	1,98	4.000	1,74	Lateritas con Ni-Co
Otros	24.510	12,44	25.600	11,13	-
Total mundial	<b>197.000</b>	<b>99,97</b>	<b>230.000</b>	<b>100</b>	-

Fuente: USGS (2024); Fay y Barton (2012); Proenza (2015).  
t: tonelada.

Existen antecedentes de producción de cobalto en Chile desde la primera mitad del siglo XIX y hasta mediados de los años 40, la que era íntegramente exportada (Sutulov, 1976). En efecto, esta producción, realizada especialmente entre 1906 y 1944, tuvo importantes variaciones tanto por disminuciones del precio por la entrada en producción de las minas de Canadá como por alzas por la demanda generada durante la Segunda Guerra Mundial (A. Gajardo, comunicación escrita, 2024). Las leyes de cobalto variaron entre 2 y 8% Co, y su producción fue de 250-300 t/año (Sutulov, 1976). Debido a que esta producción fue empleada principalmente para aleaciones de acero utilizadas en la Segunda Guerra Mundial, su máxima producción se efectuó en los años 40 (Townley *et al.*, 2017). Las minas con mayores leyes fueron Rosa Amelia y Blanca, ubicadas en el distrito San Juan (Fig. 4), en la actual comuna de Freirina, región de Atacama, tenían entre 7 y 9% de Co, y aportaron el 80% de la producción nacional en esos años. El resto de la producción estuvo concentrada en minas de Copiapó, Coquimbo y Petorca, cuyas leyes promedio variaban de 3,5 a 4% de Co (Sutulov, 1976).

#### 4.3.1.3. Recursos y reservas de cobalto en el mundo y en Chile.

Las reservas de cobalto alcanzaron 11.000 kt el año 2023 (USGS, 2024) (Tabla 38), en especial, en la R.D. del Congo se concentran 6.000 kt, con leyes entre 0,3 y 0,5% de Co, que representan el 54,55% de las reservas mundiales. Los mayores depósitos se congregan en la provincia de Katanga, donde se ubican algunas de las minas más grandes de cobalto como son Mutanda, Kamoto, Etoile y Ruashi, en las cuales el cobalto obtenido es un subproducto de la minería del cobre. A este país africano le sigue lejanamente Australia con una reserva de 1.700 kt de mineral de cobalto. La mina Murrin-Murrin en Australia occidental es la mayor operación de cobalto de ese país, y la provincia de Gansu, en China, es la que tiene la mayor cantidad de reservas nacionales.

**TABLA 38. RESERVA MUNDIAL DE COBALTO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reservas (kt)	Participación (%)	Reservas (kt)	Participación (%)
R.D. del Congo	4.000	48,19	6.000	54,55
Australia	1.500	18,10	1.700	15,45
Indonesia	600	7,23	500	4,55
Cuba	500	6,02	500	4,55
Filipinas	260	3,13	260	2,36
Otros	1.440	17,35	2.040	18,55
Total mundial	<b>8.300</b>	<b>100</b>	<b>11.000</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).  
kt: miles de toneladas.

En Chile no existen aún informes de recursos y reservas de cobalto para los depósitos en que este elemento se considera parte de la mena principal. Solo algunos informes de recursos incluyen el cobalto en los diferentes prospectos en los que este elemento se podría considerar subproducto, como el caso del proyecto Santo Domingo.

Debido a que los relaves contienen elementos de interés económico que se relacionan con los depósitos a partir de los cuales fueron generados, se confirma que los contenidos de cobalto derivados de depósitos de los tipos IOCG/IOA, vetiformes de Cu-Co-Au y pórfidos de Cu-Mo Miocenos, se relacionan con la existencia de pirita. Sin embargo, no existe información pública en la que se reporte una estimación de recursos ni reservas de este mineral en estos tipos de depósitos.

#### 4.3.1.4. Prospectos y cartera de proyectos de cobalto

La exploración de cobalto en Chile se ha intensificado sobre la base del informe de Townley *et al.* (2017), principalmente en los distritos con producción histórica de este recurso, ubicados en la región de Atacama. Otra fuente de información que ha aportado a la exploración corresponde a la caracterización química de las menas de depósitos metálicos de la provincia metalogénica de la cordillera de la Costa (PMCC), aportada por Sernageomin y disponible entre las regiones de Atacama y Valparaíso (Vivallo *et al.*, 2008; Lacassie *et al.*, 2016; Arredondo *et al.*, 2018; Ortega *et al.*, 2022), en parte considerada en el informe de Townley *et al.* (2017). La exploración más avanzada se ha realizado en el proyecto La Cobaltera, distrito San Juan, región de Atacama, por la empresa Chilean Cobalt Corporation/Baltum spa, con la ejecución de alrededor de 20.000 m de sondajes de diamantina hasta el año 2019 (Chilean Cobalt Corp., 2024), lo que ha permitido identificar mineralización de cobalto, cobre e indicios de oro. Actualmente, no se dispone de informes públicos de estimación de recursos, resultantes de los estudios efectuados para generar un reporte NI43-101, acerca de 14.000 m de sondajes (SRK Consulting, 2019).

Otro proyecto en desarrollo de esta compañía, en la región de Atacama, es Carrizal Alto, en el distrito del mismo nombre, del cual se desconoce información de exploración. Adicionalmente, los proyectos Farellón y Perth, de Red Metal Resources Ltda., en este distrito, muestran los resultados de análisis de muestras de superficie y de alrededor de 700 m de sondajes de aire reverso, con interceptos de cobre, oro e indicios de cobalto, los que tampoco cuentan con informes públicos de recursos (Jobin-Bevans, 2021).

La exploración en depósitos del tipo IOCG, en los que el cobalto es considerado un subproducto, cuenta con reportes de distintas categorías. En cuanto al prospecto Santo Domingo de Capstone, se dispone de un reporte NI 43-101 (2020), con recursos medidos más indicados de 537 Mt con 0,30% de Cu, 25,7% de Fe, 229 ppm de Co y 0,039 g/t de Au (Maycock *et al.*, 2020). Próximo a este proyecto se desarrolla exploración en el prospecto Pietro, de propiedad de Golden Arrow Resources, el que cuenta con 30.000 m de sondajes históricos a partir de los cuales se informan interceptos decimétricos con contenidos promedio de cobalto desde 310 hasta 626 ppm, además de hierro, cobre y oro, asociados a brechas de especularita y cuerpos macizos de magnetita. Siempre en la región de Atacama, el proyecto Playa-Playa Este, de Tracking Exploraciones, informa (Tracking exploraciones, 2024) interceptos métricos en dos sondajes de tres efectuados, con un total de 1.900 m perforados, cuyas concentraciones de cobalto varían entre 103 y 223 ppm, además de cobre, hierro y oro,

relacionados con brechas de magnetita-actinolita-albita-cuarzo-calcopirita-pirita y a brechas de cuarzo-turmalina-actinolita-carbonatos, minerales oxidados de hierro y cobre (Ministerio de Minería, 2024).

#### **4.3.1.5. Potencial prospectivo de cobalto**

De acuerdo con los antecedentes de producción histórica de cobalto, del contenido de cobalto en yacimientos de la provincia metalogénica de la cordillera de la Costa (PMCC) entre las regiones de Atacama y de Valparaíso, y del contenido de cobalto en los depósitos cupríferos y en los relaves actuales y abandonados, catastrados por Sernageomin, se concluye que el potencial de cobalto, en Chile, se relaciona con tres fuentes principales.

#### **Potencial prospectivo de cobalto desde depósitos vetiformes de Cu-Co (Au) y estratoligados y vetas de Cu-(Au-Ag)-Co**

Esta primera fuente corresponde a los depósitos en los cuales se han descrito minerales de mena de cobalto y/o ha existido explotación histórica de este elemento. Tal es el caso de los depósitos vetiformes de Cu-Co (Au) (distritos San Juan y Carrizal Alto) y estratoligados y vetas de Cu-(Au-Ag)-Co (cuerpos irregulares, mantos y vetas) del Jurásico-Cretácico Inferior (distritos Ladrillos, Las Pintadas, Tambillos y la mina Merceditas). Estos están distribuidos sobre todo en la provincia metalogénica de la cordillera de la Costa de la zona central-norte de Chile, en el ámbito de las franjas metalogénicas del Jurásico y Cretácico Inferior, las que se relacionan con la evolución de un sistema de arco-trasarco Jurásico-Cretácico Inferior desarrollado sobre un basamento Paleozoico-Triásico y controlado por el Sistema de Fallas de Atacama (SFA). En términos más específicos, la franja más prospectiva para los depósitos vetiformes de Cu-Co (Au) corresponde a la del Jurásico, donde destaca la presencia del basamento pre-Jurásico intruido por granitoides del Jurásico Inferior, Jurásico Medio-Superior y Jurásico Superior-Cretácico Inferior y la expresión más occidental del Sistema de Fallas Atacama, SFA. En tanto, el segundo grupo de depósitos se asocia a rocas volcánico-sedimentarias del Jurásico-Cretácico Inferior, depositadas en un ambiente de trasarco, distribuidos en la PMCC y en la precordillera andina. En la PMCC destacan también los distritos auríferos de las franjas metalogénicas del Cretácico, como Inca de Oro, en la región de Atacama, y Punitaqui, en la región de Coquimbo.

## **Potencial prospectivo de cobalto desde depósitos IOCG/IOA y pórfidos de Cu-Mo**

Esta segunda fuente se relaciona con depósitos en los que el cobalto está presente como subproducto, principalmente en depósitos contenidos en la PMCC, del tipo IOCG (distritos Santo Domingo, El Zapallo, Astillas, entre otros) e IOA (distritos Pleito, Los Cristales, Cerro Negro Norte, El Romeral), descritos en la Franja Ferrífera y las franjas metalogénicas del Jurásico y Cretácico Inferior, y en depósitos del tipo pórfido cuprífero del Cretácico, Paleoceno, Eoceno-Oligoceno y Mioceno, agrupados en las franjas metalogénicas homólogas de la zona centro-norte de Chile. En la mayoría de estos depósitos, el contenido de cobalto se asocia a la existencia de pirita-arsenopirita-pirrotina (sulfoarseniuros de Co-Ni), en los del tipo IOCG/IOA, y a la existencia de pirita en los pórfidos cupríferos. En esta misma línea, estudios geometalúrgicos realizados en la última década para evaluar la recuperación de cobalto en depósitos del tipo IOCG/IOA, y también en pórfidos de Cu-Mo, han determinado que la especie primordial que contiene cobalto es la pirita y, en particular, aquella que se forma a mayor temperatura y que está relacionada con las fases tempranas de mineralización y asociada con la existencia de magnetita-pirita-calcopirita y la alteración calco-sódica y potásica en los depósitos del tipo IOCG/IOA (Quevedo, 2020; Quevedo y Kuyvenhoven, 2023; Chepillo, 2019) y con la mineralización hipógena de cobre y molibdeno temprana (calcopirita-bornita-molibdenita) en los depósitos tipo pórfido de Cu-Mo miocenos (Velásquez *et al.*, 2020).

## **Potencial prospectivo de cobalto desde relaves**

Esta tercera fuente se relaciona con el contenido de cobalto en relaves abandonados, activos e inactivos, provenientes de la explotación histórica en los distritos cobaltíferos, como San Juan y Tambillos; de la explotación histórica y actual del tipo IOCG, p. ej., el relave El Buitre del distrito Punta del Cobre, y de los de tipo pórfido, como en el relave Cauquenes, de la mina El Teniente.

A este respecto, el interés prospectivo por los depósitos de relaves como potenciales fuentes de minerales entre los que destaca el cobre, el hierro, las tierras raras y el cobalto ha tenido como fundamento los siguientes tres pilares:

- La implementación de programas estratégicos, a partir del año 2017, propuestos con base en el programa Nacional de Minería de Alta Ley, creado en el año 2015, en particular aquellos programas relacionados con la minería secundaria, entendida como el reprocesamiento de los residuos mineros, especialmente de los relaves.

- La existencia de un Catastro de Depósitos de Relaves, en periódica actualización, elaborado por Sernageomin y que el 2023 (Sernageomin, 2023b) contaba con 796 depósitos entre activos (129), inactivos (475), abandonados (176) y en construcción (14), con más de 26.000 Mt de residuos mineros depositados, la mayoría de ellos en las regiones de Atacama y Coquimbo.
- El esfuerzo conjunto de los organismos públicos y privados que ha permitido avanzar en la caracterización química de los relaves, en la determinación de especies vinculadas a elementos de interés económico, y en la recuperación de cobre, hierro, tierras raras y cobalto (Aracena *et al.*, 2019).

En cuanto al cobalto, los estudios en los relaves El Buitre, asociados a la explotación de depósitos del tipo IOCG del distrito Punta del Cobre y Cauquenes, provenientes del Pórfido El Teniente, señalan que la existencia de este mineral se asocia principalmente con piritita (Kotthoff, 2020), cuyas concentraciones en el primer caso son del orden de 127 ppm y en el segundo de 340-400 ppm.

#### *Otras fuentes Potenciales*

Si bien se cuenta con información de contenidos de cobalto en nódulos de manganeso de las costas de Chile, en este informe no se desarrolla esta línea de trabajo.

#### **4.3.2. Elementos de tierras raras (ETR)**

Los elementos de tierras raras (ETR) son un grupo de 15 elementos químicos que van desde el número atómico 57 (lantano) hasta el 71 (lutecio), comúnmente conocidos como “lantánidos”. Los ETR se subdividen en livianos, que incluyen del número atómico 57 al 64 (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu y Gd) y ETR pesados, que incluyen los elementos de número atómico 65 a 71 (Tb, Y, Ho, Er, Tm, Yb y Lu). El itrio (número atómico 39) y el escandio (número atómico 21), también, se consideran pertenecientes a los ETR, ya que tienen propiedades similares (Murty *et al.*, 2023).

Se utilizan principalmente en la fabricación de productos de consumo, energía y defensa, entre los cuales destacan la fabricación de imanes permanentes, catalizadores, aplicaciones en metalurgia y revestimientos de altas temperaturas, entre otros (Murty *et al.*, 2023).

#### 4.3.2.1. Contexto geológico de los depósitos ETR en el mundo y en Chile

Los ETR se encuentran en forma cristalina en minerales como carbonatos, fluorocarbonatos e hidroxicarbonatos, fosfatos, óxidos, silicatos, entre otros, y en estado de adsorción en arcillas iónicas hospedadas en regolito (Van Gosen *et al.*, 2017; Murty *et al.*, 2023). Respecto de lo anterior, los ETR se extraen más fácilmente desde las arcillas, en comparación con las formas minerales cristalinas, ya que en este último caso están fuertemente unidos en complejas estructuras minerales cristalinas (Murty *et al.*, 2023).

En el mundo, los depósitos de ETR se encuentran ampliamente repartidos en los cinco continentes, con una importante distribución de depósitos en carbonatitas mayoritariamente en el sur de África; de depósitos en carbonatitas, hidrotermales/IOCG, en arcillas y en rocas alcalinas/peralcalinas, en Australia; de depósitos en carbonatitas y en rocas alcalinas/peralcalinas e hidrotermales/IOCG, en Norte América; y de depósitos en carbonatitas, rocas alcalinas/peralcalinas y placeres, en Sudamérica, especialmente en Brasil, además de un depósito en arcillas en Chile (Fig. 8) (Liu *et al.*, 2023). Una fracción mayoritaria de los depósitos conocidos son motivo tanto de explotación, según ocurre en el sureste de Asia, como de programas de exploración avanzada, principalmente en Sudáfrica, Norteamérica y Australia, con una clara preponderancia de los depósitos en carbonatitas y en rocas alcalinas/peralcalinas.

El desarrollo del actual conocimiento de las características y del contexto geológico de los depósitos de ETR, al igual que de programas de exploración, estuvo motivado por las restricciones al suministro de estos materiales impuestas por China en la década de 2010, mediante cuotas, licencias e impuestos (Schulz *et al.*, 2017). Estas implicaron el comienzo de la producción de los ETR en Australia el 2011 y en EE. UU. el 2012, y el inicio de proyectos de exploración y desarrollo en numerosos países del mundo, así como del consecuente establecimiento de faenas mineras para la explotación de estos minerales (Schulz *et al.*, 2017).

En cuanto a Chile, de los tipos de depósitos de distribución mundial mencionados, el depósito de tipo arcillas con capacidad de adsorción iónica, hospedadas en regolito, y ubicado en la región del Biobío, alberga el único proyecto de minería primaria con conocimiento actual de sus características geológicas, mineralógicas, ambientales y tecnológicas, lo que justifica y sustenta la instalación de un proyecto de explotación de ETR en el país (Aclara, 2024).





FIG. 8. Distribución de los depósitos y producción de ETR, categorizados por tipos de depósitos y estado de avance del yacimiento (tomado de Liu *et al.*, 2023).

#### 4.3.2.2. Producción mundial y nacional de ETR

Durante las décadas previas al año 2010, China lideró ampliamente la producción mundial de ETR, la que alcanzó a representar hasta más del 90% de la producción y oferta de estos elementos (Schulz *et al.*, 2017).

En el año 2023, la producción mundial de tierras raras aumentó de 300.000 a 350.000 t de REO eq. (óxidos de tierras raras equivalente) respecto del año 2022 (USGS, 2024). Ese mismo año, China continuó liderando la producción mundial con un total de 240.000 t de REO eq. (Tabla 39), en torno al 70% de la producción anual (USGS, 2024).

La producción mundial de los años 2022 y 2023, expresada en REO eq., se muestra en la tabla 39.

**TABLA 39. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ETR Y TIPOS DE DEPÓSITOS, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023		Tipo de depósito
	Producción (t)	Participación (%)	Producción (t)	Participación (%)	
China	210.000	70,00	240.000	68,57	Rocas ígneas alcalinas/peralcalinas, carbonatitas, arcillas.
EE. UU.	43.000	14,33	43.000	12,29	Carbonatitas, arcillas, hidrotermal/IOCG, rocas alcalinas/peralcalinas.
Australia	18.000	6,00	18.000	5,14	Carbonatitas, arcillas, hidrotermal/IOCG y rocas alcalinas/peralcalinas.
Myanmar	12.000	4,00	38.000	10,86	Carbonatitas, placer.
Tailandia	7.100	2,37	7.100	2,03	Placer de minerales pesados.
Otros	7.820	2,61	7.220	2,06	-
Total mundial	<b>300.000</b>	<b>100</b>	<b>350.000</b>	<b>100</b>	-

Fuente: USGS (2023, 2024); Liu *et al.* (2023).

t: tonelada.

Además de la concentración geográfica de los depósitos, la exploración y la explotación, es importante considerar la capacidad de procesamiento, en particular de refinación, que se debe tener presente en la configuración del mercado y en el nivel de criticidad de este grupo de elementos, y respecto del cual China controla en torno al 90%.

En Chile no se registra producción actual ni histórica de ETR. Sí existe un único proyecto de exploración actual, denominado Módulo Penco, ubicado en la comuna de Penco, región del Biobío, que eventualmente podría llegar a producir tierras raras en el país.

#### **4.3.2.3. Recursos y reservas de ETR en el mundo y en Chile**

Las reservas mundiales de elementos de tierras raras son del orden de 104 Mt al año 2023, China es el líder, con aproximadamente el 33,85% de estas reservas (Tabla 40). Los países con importantes reservas de ETR, como Brasil, Rusia e India, tienen una producción bastante más baja con respecto a los cinco que lideran la producción de ETR (Tabla 39).

**TABLA 40. RESERVA MUNDIAL DE ETR, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reservas (Mt)	Participación (%)	Reservas (Mt)	Participación (%)
China	44	33,85	44	38,26
Vietnam	22	16,92	22	19,13
Brasil	21	16,15	21	18,26
Rusia	21	16,15	10	8,7
India	6,9	5,31	6,9	6
Otros países	15,1	11,62	11,1	9,65
Total mundial (aproximado)	<b>130</b>	<b>100</b>	<b>115</b>	<b>100</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).  
Mt: millones de toneladas.

En Chile no se han cuantificado reservas de elementos de tierras raras. Sin embargo, en el proyecto Módulo Penco y en prospectos ubicados en la región de Atacama, se han realizado estimaciones de recursos (Tabla 41). El mayor grado de certeza en la determinación de recursos de ETR se ha logrado en Módulo Penco, donde se han definido recursos medidos e indicados, con base en un programa de sondajes (Ausenco Engineering Chile Ltda., 2021). Por su parte, la exploración hecha en Cerro Carmen, región de Atacama, si bien determinó recursos indicados e inferidos, estuvo basada en un programa de muestreo en zanjas (Fortín y Serrano, 2000).

**TABLA 41. ESTIMACIÓN DE RECURSOS EN PROSPECTOS DE ETR EN CHILE.**

Prospecto	Tipo de recurso	Tonelaje (Mt)	Ley (%)	Contenido de ETR (t)
<b>Módulo Penco</b>	Medido+indicado	20,68	0,2426	50.178
<b>Cerro Carmen</b>	Indicado	3,87	0,08	2.944

Fuente: Ausenco Engineering Chile Ltda. (2021); Fortín y Serrano (2000).  
Mt: millones de toneladas.  
t: tonelada.

#### **4.3.2.4. Prospectos y cartera de proyectos de ETR**

Los dos proyectos de exploración recientes para evaluar el potencial de este tipo de elementos en el país, denominados Módulo Penco y Cerro Carmen, se describen a continuación.

##### **Módulo Penco**

Se localiza en la cordillera de la Costa, en las cercanías de la ciudad de Penco, región del Biobío, y geológicamente se ubica en la zona de contacto intrusivo entre el Batolito Costero del Sur y la Serie Oriental del Basamento Metamórfico Paleozoico (Aclara, 2024). En el área del proyecto se reconocen cuatro unidades litológicas principales: el Basamento Metamórfico Paleozoico, integrado por metapelitas; el Complejo Plutónico de Concepción, granitoide ubicado al oeste y este del proyecto; el Complejo Granítico de Penco, integrado por dioritas con mineralización de ETR, y el Granitoide de Granate, sobre todo peraluminoso, constituido mayoritariamente por tonalita con granate y localmente diorita con granate en sus bordes (Aclara, 2024), con marcadas anomalías de ETR y una fuerte correlación con anomalías de torio (Aclara, 2024). En esta última unidad, la mineralogía de interés corresponde a itrio y a ETR pesadas, albergados en xenotima y granate; itrio y disprosio, en monacita y allanita, y ETR pesadas, en ilmenita (Aclara, 2024). Según esto último, el proyecto resulta sumamente atractivo por sus altas concentraciones en ETR pesadas, las que mundialmente están concentradas y explotadas en China.

El depósito de Módulo Penco se habría formado por procesos de meteorización física y química que afectaron principalmente las rocas graníticas, y formaron regolitos residuales que contienen la mineralización de ETR en este tipo de depósito (Marquardt *et al.*, 2023). Así, la mineralización de interés de este proyecto está hospedada específicamente en los horizontes B (B1, B2) y C1 del perfil de meteorización, aunque, en mayor medida en el horizonte B, donde se concentrará la explotación de elementos de tierras raras del proyecto (Aclara, 2024).

Los recursos de ETR actualmente conocidos del proyecto Módulo Penco, se indican en la Tabla 42.

**TABLA 42. ESTIMACIÓN DE RECURSOS, SEGÚN CATEGORÍAS, DEL PROYECTO MÓDULO PENCO.**

Recursos	Tonelaje (t)	REYT (ppm)	TREO (ppm)	REO (t)	Recuperación (%)
<b>Medidos</b>	15.357.416	2.080	2.467	37.887	18
<b>Indicados</b>	5.323.628	1.945	2.309	12.292	17
<b>Medidos+ indicados</b>	20.681.044	2.045	2.426	50.178	18
<b>Inferidos</b>	2.083.200	1.936	2.299	4.788	16

Fuente: Ausenco Engineering Chile Ltda. (2021), modificada.

t: tonelada.

ppm: parte por millón.

REYT: elementos de tierras raras totales e itrio.

TREO: óxidos de tierras raras totales.

REO: óxidos de tierras raras.

Actualmente, el proyecto Módulo Penco implica la construcción y operación de una faena minera, con una planta de procesamiento de arcillas ricas en ETR. La planta tendrá capacidad para procesar hasta 320 t/h de arcillas húmedas y producir aproximadamente 3.100 t anuales húmedas (1.700 t secas) de concentrado de ETR. El proyecto compromete una inversión de 130 millones de dólares, y se estima una vida útil de 9 años con las condiciones actualmente consideradas (Aclara, 2024).

Como parte del avance del proyecto, la empresa Aclara debe entregar al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) un nuevo informe que, en términos generales, constituye un rediseño técnico del proyecto que aborda las observaciones respecto de requisitos ambientales y sociales realizadas por los servicios públicos y la comunidad local.

Durante este año 2024, el Grupo CAP compró a la canadiense Aclara Resources, un 20% de su filial Aclara en Chile, la que está enfocada en el proyecto de explotación de ETR en el país. Esta asociación, eventualmente, ampliaría la cadena de valor en el negocio, incorporando la posibilidad de fabricación de aleaciones, etapa previa a la manufactura de imanes permanentes, utilizadas en los motores de vehículos eléctricos (Aclara, 2024).

### **Cerro Carmen**

Este prospecto se ubica en el flanco oriental del cerro homónimo, en la comuna de Diego de Almagro, región de Atacama. Geológicamente ha sido definido como un depósito tipo *skarn* hospedado en rocas volcánicas, generado por la intrusión de monzonitas y aplitas, en un

dominio estructural regional caracterizado por fallas de rumbo NO-SE. El prospecto se encuentra en la zona conocida como El Salado, que incluye otros dos prospectos de similares características denominados Sierra Áspera y Veracruz, ubicados a dos kilómetros al norte de Cerro Carmen, pero con menor grado de estudio (Fortín y Serrano, 2000).

Los minerales existentes corresponden a hierro, titanio, uranio y ETR, en una matriz de cuarzo y feldespato con alteración a hematita. Esta mineralización está hospedada en vetas emplazadas en rocas graníticas, con corridas de 25 a 75 m y potencia de hasta 1 m. Los minerales de hierro, titanio, son principalmente óxidos de hierro y/o titanio (magnetita, ilmenita y esfeno). Tanto el uranio como las ETR fueron incorporados al depósito por un metasomatismo potásico, que reemplazó el titanio, calcio y hierro desde minerales preexistentes. En términos generales, los portadores de ETR en este prospecto son una serie entre ilmenita y davidita (Fortín y Serrano, 2000).

El programa de exploración efectuado consistió en un mapeo de superficie para la definición de cuerpos mineralizados y radiometría gamma; en la excavación de 35 zanjas, con un total de 1.450 m, y en la recolección de 129 muestras de canaleta (450 m de longitud y peso total de 800 kg) que fueron analizadas por 45 elementos mediante ICP-MS, incluyendo ETR, uranio y titanio (Fortín y Serrano, 2000). La estimación de recursos se resume en la tabla 43.

**TABLA 43. ESTIMACIÓN DE RECURSOS, SEGÚN CATEGORÍAS, DEL PROSPECTO CERRO CARMEN.**

Categoría	Tonelaje (t)	Fino (t)				
		LRE	HRE	RE	U	Ti
Indicado	3.877.799	2.473	496,9	2.944,3	595,3	36.177,5
Inferido I	1.827.750	599,9	125	724,9	172	s/i
Inferido II	4.100.000	2.610,3	498	3.108,3	624,4	s/i
Hipotético-especulativo	10.000.000	7.158,3	1.078,1	8.236,4	1.429,1	s/i
<b>Total</b>	<b>19.805.550</b>	<b>12.841,5</b>	<b>2.198,1</b>	<b>15.014,1</b>	<b>2.821</b>	s/i

Fuente: Fortín y Serrano (2000).

t: toneladas.

LRE: tierras raras ligeras.

HRE: tierras raras pesadas.

Nota: la categoría "hipotético" corresponde a recursos posibles a profundidades <200 m y la categoría "especulativo", a sectores fuera del área del prospecto Cerro Carmen.

Nota: la metodología empleada para el cálculo de recursos puede consultarse en Fortín y Serrano (2000).

s/i: sin información.

#### **4.3.2.5. Potencial prospectivo de ETR**

##### **Potencial de minería primaria**

##### **Depósitos de elementos de tierras raras en arcillas iónicas adsorbentes hospedadas en regolito de la franja metalogénica de ETR de la cordillera de la Costa.**

En la figura 4 se muestra la franja metalogénica asociada al magmatismo del Paleozoico del centro-sur de Chile, responsable de la formación de depósitos minerales relacionados con un evento ígneo ocurrido durante el Paleozoico Superior (Carbonífero) (Crisóstomo y Rabbia, 2018), y con posteriores procesos de meteorización durante el Neógeno, la que ha sido trazada siguiendo la definición de estos autores. Esta franja metalogénica que se distribuye en la cordillera de la Costa del centro-sur del país, regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins a La Araucanía, tiene favorables condiciones geológicas y ambientales para la formación de depósitos primarios y secundarios de ETR. Los depósitos primarios están ligados a pegmatitas, con mineralización de ETR asociada a rocas intrusivas peraluminosas y contenida en minerales primarios, como allanita. Los depósitos secundarios se relacionan con perfiles de suelo con contenido de arcillas capaces de retener las ETR por adsorción. En esta franja, Módulo Penco es el único proyecto actualmente en desarrollo del tipo generado por meteorización, a pesar de que, tanto hacia el norte como hacia el sur, existen concesiones de exploración para ETR.

##### **Depósitos de ETR y uranio en roca, en la región de Atacama**

Como se indicó anteriormente, existe un potencial prospectivo de depósitos de ETR y uranio en roca, en la región de Atacama, los que han sido definidos como depósitos tipo *skarn*, están emplazados en el borde oriental de la franja de hierro y tienen una edad cretácica (Fortín y Serrano, 2000). En el sector El Salado se podría desarrollar un programa de exploración distrital orientado a caracterizar de mejor forma estos depósitos.

Asimismo, en las regiones de Atacama y Coquimbo se han reconocido depósitos con similares características y asociaciones minerales equivalentes a las del prospecto Cerro Carmen. La mayoría de ellos se encuentran en rocas volcánicas de la formación Bandurrias (Segestrom, 1960) en contacto con intrusivos de edad cretácica (Carmen y Productora, en Vallenar; El Durazno y Recoleta, entre otros) (Fortín y Serrano, 2000).

## **Depósitos tipo IOA de la Franja Ferrífera Chilena**

Se han documentado mundialmente, concentraciones elevadas de ETR en fases minerales propias de depósitos tipo IOA (e.g., Kiruna), en particular en apatitas. Sin embargo, este tipo de depósitos no han sido explotados por ETR, debido a leyes muy bajas comparadas con otros tipos de depósitos de estos elementos y la falta de tecnologías competitivas para su procesamiento (Pavez, 2020).

En Chile no existen programas sistemáticos de evaluación y/o de exploración del potencial de ETR en la Franja Ferrífera chilena, la que incluye depósitos tipo IOCG andinos y de IOA, desarrollada en la cordillera de la Costa del norte del país, en la que, potencialmente, podrían existir depósitos de interés, según lo documentado internacionalmente. Sin embargo, sí existen estudios individuales que corroboran la existencia y concentraciones de interés de ETR en apatitas de los depósitos tipo IOA (Palma *et al.*, 2019).

Es importante indicar que Sernageomin cuenta con un programa regular de geoquímica de sedimentos de drenaje, como una de las líneas de investigación del Plan Nacional de Geología, que genera cartografía geoquímica a escala regional (1:250.000) y bases de datos, información que permite detectar anomalías geoquímicas de una amplia batería de elementos (61 elementos medidos por ICP-MS), incluidos los ETR. Si bien algunos estudios analizaron los resultados de los trabajos publicados por este programa (Cochilco, 2016; Pavez, 2020), su potencial como instrumentos prospectivos debe aún ser explorado en mayor profundidad.

## **Potencial de minería secundaria**

### **Recuperación de ETR desde relaves**

A partir del creciente interés por explorar nuevas fuentes de ETR, se ha puesto atención en el procesamiento de residuos mineros, en particular de depósitos relaves, para la recuperación de elementos de valor no tradicionales (EVNT), entre ellos ETR.

En esta línea, JRI Ingeniería S.A.-EcoMetales Limited (2020) definieron un listado de 31 depósitos de relaves con valores de Cu sobre los 1.000 ppm, de Fe sobre el 7% y de la suma de ETR pesadas sobre 200 ppm. Estos depósitos se distribuyen principalmente en las regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo.



### 4.3.3. Titanio (Ti)

El titanio ha aumentado sostenidamente su demanda desde mediados del siglo XX y se proyecta que esta tendencia continúe, en atención a su uso como pigmento para la fabricación de pinturas, papel, plásticos y otros, gracias a que aumenta la resistencia a la corrosión de esos productos; además, es utilizado en aplicaciones aeroespaciales, procesamiento químico, *hardware* marino, implantes médicos, generación de energía y otras aplicaciones industriales y de consumo (USGS, 2024).

#### 4.3.3.1. Contexto geológico de los depósitos de titanio en el mundo y en Chile

En el mundo los depósitos de titanio son en su mayoría de dos tipos: depósitos primarios, en roca, y depósitos sedimentarios. Estos últimos corresponden a los de mayor interés económico y a la principal fuente de titanio, debido a su fácil explotación y a los menores costos asociados, no obstante que su cercanía a la línea de costa puede generar conflictos ambientales y de uso del suelo. Los depósitos primarios de ilmenita se encuentran en rocas ígneas, como anortositas, y también en rocas metamórficas, como eclogitas, pero resultan de menor importancia comercial que los primeros por el intercrecimiento de ese mineral con magnetita. Los dos depósitos más importantes de anortosita, del tipo macizo, se encuentran en Canadá y Noruega, y el más reconocido depósito en rocas metamórficas, en Sudáfrica (Elzea *et al.* Ed., 2006).

Los depósitos sedimentarios, originados por la meteorización y erosión de rocas ígneas y metamórficas con concentraciones importantes de titanio, y el posterior transporte, depositación y retrabajo de sus sedimentos, se ubican normalmente en las zonas costeras, cerca de la línea de costa o en ella, o a diferentes distancias hacia el continente, además de en lechos de ríos y en zonas de delta. Los depósitos sedimentarios costeros pueden clasificarse en depósitos del Cuaternario y pre-Cuaternarios. Los primeros, de hasta 2 Ma de antigüedad, se distribuyen en la línea de costa como depósitos de playa y de dunas costeras, y están representados por aquellos de las costas este y oeste de Australia y de la India y Sri Lanka, y de la costa este de EE. UU., en los estados de Florida y Georgia. Los depósitos pre-Cuaternarios pueden encontrarse a varios metros bajo la superficie actual de las zonas costeras y a decenas, y hasta centenas, de kilómetros al interior de la línea de costa actual; como consecuencia de su posición, pueden encontrarse muy alterados, con ilmenitas que alcanzan contenidos de TiO<sub>2</sub> relativamente altos. Entre estos depósitos se mencionan aquellos

de Nueva Jersey y Tennessee, EE. UU., reestudiados en los últimos años, y los de la región sureste de Australia, que alberga dos proyectos en desarrollo (Elzea *et al.* Ed., 2006).

En Chile, la información relativa a depósitos de titanio se refiere en su mayoría a los de tipo sedimentario, ubicados principalmente en las zonas costeras de las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Biobío y La Araucanía, en las cuales se han efectuado diferentes estudios con la finalidad de determinar el potencial de las arenas de los depósitos de playa y de dunas costeras como fuentes de titanio, los que, en general, no tuvieron resultados favorables. Además, existen antecedentes de depósitos en roca situados en la región de Atacama, alojados en rocas intrusivas del Cretácico, dos de los cuales han sido estudiados por su potencial interés como fuente de rutilo (Ministerio de Minería, 2020).

#### 4.3.3.2. Producción mundial y nacional de titanio

Los principales países productores de titanio en el mundo elaboran concentrados de minerales de titanio, especialmente ilmenita y rutilo, entre los que predomina la ilmenita con aproximadamente el 90% de la producción mundial. China y Mozambique se encuentran entre los productores de ilmenita más destacados del año 2023, mientras que los de concentrados de rutilo fueron Australia y Sierra Leona (Tabla 44).

**TABLA 44. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE TITANIO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Producción ilmenita (kt)	Participación (%)	Producción ilmenita (kt)	Participación (%)
China	3.140	35,68	3.100	36,05
Mozambique	1.400	15,91	1.600	18,60
Sudáfrica	1.100	12,5	1.000	11,63
Canadá	520	5,91	500	5,81
Noruega	410	4,66	430	5,00
Otros	2.230	25,34	1.970	22,91
Total mundial ilmenita	<b>8.800</b>	100	<b>8.600</b>	100

continuación tabla 44

País/año	2022		2023	
	Producción rutilo (kt)	Participación (%)	Producción rutilo (kt)	Participación (%)
Australia	200	31,25	200	35,71
Sierra Leona	130	20,31	110	19,64
Sudáfrica	100	15,63	100	17,86
Kenia	73	11,41	58	10,36
Ucrania	95	14,84	50	8,93
Otros	42	6,56	87	15,54
Total mundial Rutilo	<b>640</b>	100	<b>560</b>	100
Total mundial rutilo+ilmenita	<b>9.400</b>	-	<b>9.200</b>	-

Fuente: USGS (2024).

kt: miles de toneladas.

Nota: los datos de producción de rutilo de Estados Unidos se incluyen con la ilmenita.

No existe registro oficial de producción de minerales de titanio en Chile, no obstante que hay información de una antigua explotación artesanal de ilmenita, en Playa Blanca, sector costero de la región del Biobío, la que era utilizada para recubrir varillas de soldar y que habría paralizado antes de la década de 1990 (Gajardo y Gutiérrez, 1993).

#### 4.3.3.3. Recursos y reservas de titanio en el mundo y en Chile

Los países con las principales reservas de ilmenita en el año 2023 fueron China y Australia, mientras que aquellos con las principales reservas de rutilo fueron Australia e India (Tabla 45).

**TABLA 45. RESERVA MUNDIAL DE TITANIO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reserva ilmenita (kt)	Participación (%)	Reserva ilmenita (kt)	Participación (%)
China	190.000	29,23	210.000	30,43
Australia	160.000	24,62	180.000	26,09
India	85.000	13,08	85.000	12,32
Canadá	31.000	4,77	52.000	7,54
Brasil	43.000	6,62	43.000	6,23
Otros países	141.000	21,69	120.000	17,39
Total mundial ilmenita	<b>650.000</b>	<b>100</b>	<b>690.000</b>	<b>100</b>

continuación tabla 45.

País/año	2022		2023	
	Reserva rutilo (kt)	Participación (%)	Reserva rutilo (kt)	Participación (%)
<b>Australia</b>	31.000	63,27	35.000	63,64
<b>India</b>	7.400	15,1	7.400	13,45
<b>Sudáfrica</b>	6.500	13,27	6.100	11,09
<b>Sierra Leona</b>	490	1	2.900	5,27
<b>Ucrania</b>	2.500	5,1	2.500	4,55
<b>Otros países</b>	1.110	2,27	1.100	2
<b>Total mundial rutilo</b>	<b>49.000</b>	<b>100</b>	<b>55.000</b>	<b>100</b>
<b>Total mundial rutilo+ilmenita</b>	<b>699.000</b>	<b>-</b>	<b>745.000</b>	<b>-</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).

kt: miles de toneladas.

Nota: los datos de reservas de rutilo de Estados Unidos se incluyen con la ilmenita.

Debido a que no existe explotación de titanio en Chile, y a que solo hay dos depósitos relacionados con la determinación de fuentes de titanio en el norte del país, la información disponible acerca de recursos y reservas se refiere únicamente a aquellos determinados para el proyecto Cerro Blanco (dióxido de titanio), ubicados en el sector de cerro Blanco, comuna de Freirina, región de Atacama. Se estima que las reservas de mineral de rutilo de los yacimientos del proyecto alcanzan los 81,5 Mt, aproximadamente, con una ley promedio de 1,97% de rutilo (TiO<sub>2</sub>) (SCW White Mountain Titanium, s.f).

#### 4.3.3.4. Prospectos y cartera de proyectos de titanio

Los depósitos de titanio conocidos en Chile, con potencial para ser productores de rutilo, son Cerro Blanco y La Martina, ubicada a 10 km al suroeste del anterior; ambos se distribuyen en la cordillera de la Costa de la región de Atacama. Están relacionados con intrusivos del Cretácico Inferior que incluyen gabros, dioritas y tonalitas. La mineralización se asocia a una alteración hidrotermal sericita-illita-albita-titanita, y la mena se presenta como diseminación de rutilo, la que aumenta su concentración en zonas de falla y fracturas, y puede llegar a constituir bolsones mineralizados (Ministerio de Minería, 2020).

La información relativa a estos depósitos se indica en la tabla 46.

**TABLA 46. PROSPECTOS CHILENOS DE TITANIO HOSPEDADOS EN ROCA Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS.**

Depósito	Mineral	Categoría de recursos	Tonelaje (Mt)	Ley TiO <sub>2</sub> (%)	Contenido TiO <sub>2</sub> (Mt)
Cerro Blanco	Rutilo	Indicado+medido	87,5	1,89	1,65
La Martina	Rutilo	s/i	s/i	s/i	s/i

Fuente: Ministerio de Minería (2020).

Mt: millones de toneladas.

s/i: sin información.

En el caso del proyecto Cerro Blanco (Tabla 44), si sus recursos cambian a la categoría de reservas, estas podrían alcanzar a un 3% de las reservas mundiales informadas por USGS (2024).

#### **4.3.3.5 Potencial prospectivo de titanio**

Existen diversos estudios para la obtención de titanio desde arenas titaníferas costeras en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso y La Araucanía, pero no ha habido producción a partir de ellas. También existen antecedentes de otros proyectos en zonas costeras de las regiones del Maule y de Los Lagos, pero han tenido problemas sociales y ambientales.

No obstante que los yacimientos ricos en hierro presentan bajos contenidos de titanio, podría resultar de interés estudiar algunos depósitos de relaves de estos yacimientos, así como de pórfidos cupríferos, como fuente secundaria de titanio, especialmente si se considera el menor costo de explotación de este tipo de depósitos.

#### **4.4. CUARTO GRUPO**

En el cuarto grupo se considera el manganeso. Este mineral está sin producción actual y existe un escaso conocimiento de sus recursos y reservas remanentes, así como del riesgo de su agotamiento, lo que determina una nula incidencia en la economía nacional. Lo anterior implica una limitada expectativa actual de participación en el mercado, a pesar del proyecto Metal y Manganeso para Baterías Los Pumas, con recursos de interés, pero con una ley muy

baja para este tipo de depósito. Para dicha participación, o para cualquier otra actividad industrial relacionada con el manganeso, se requerirán proyectos de exploración, evaluación y cuantificación de recursos y reservas.

#### **4.4.1. Manganeso (Mn)**

El manganeso (Mn) es un metal de transición de color blanco grisáceo, con alto grado de dureza y naturaleza quebradiza, y los minerales de mayor interés que lo contienen son pirolusita, dióxido de manganeso y psilomelano. Más del 95% del manganeso que se produce se utiliza en siderurgia, especialmente en la manufactura del acero, ya que mejora su dureza y resistencia mecánica, y también la de productos de aluminio y magnesio.

##### **4.4.1.1. Contexto geológico de los depósitos de manganeso en el mundo y en Chile**

La mayoría de los depósitos de manganeso de mayor interés económico se han originado como rocas sedimentarias con alto contenido en este mineral y, en general, pueden ser agrupados en tres tipos principales. El tipo I corresponde a cuerpos lenticulares de rodocrosita en capas, con menor braunita, contenidos en cinturones de rocas volcánicas básicas del pre-Cámbrico Inferior (Arqueano) (*greenstone belts*). Estos depósitos están distribuidos como *clusters* alrededor del océano Atlántico sur, e incluyen importantes depósitos en Brasil, Guyana, Costa de Marfil, Ghana, Burkina Faso y República Democrática del Congo. Están coronados por óxidos de manganeso de origen supérgeno, de alta ley, mientras que el carbonato de manganeso primario subyacente también puede ser extraído. Depósitos con menas de carbonatos primarios son explotados en Ghana y Brasil (Elzea *et al.* Ed., 2006). El tipo II está compuesto por distintivos estratos de braunita lateralmente extensos y carbonatos de manganeso contenidos en rocas sedimentarias muy oxidadas y ricas en hierro y sílice, de edad proterozoica. Los principales ejemplos de este tipo de depósitos se ubican en Sudáfrica, Brasil y Bolivia. Estas capas, explotables en toda su extensión, se distribuyen por cientos de kilómetros cuadrados y, probablemente, constituyen los más importantes recursos de este mineral en el mundo. Por último, el tipo III de depósitos de manganeso está representado por capas, de gran extensión lateral, de esquistos con óxidos de manganeso, esquistos y carbonatos manganésíferos y/o esquistos ricos en braunita, cuyos protolitos fueron depositados en áreas de plataforma de grandes cuencas epicontinentales. Ejemplos representativos de estos depósitos son aquellos que circundan el Mar Negro, los de la cuenca del río Amazonas en Brasil y los de Gabón, en África (Elzea *et al.* Ed., 2006).

En Chile, los depósitos de manganeso tienen una amplia distribución desde el extremo norte hasta la región de Los Ríos, aunque los de mayor desarrollo están en las regiones de Coquimbo y Atacama, entre los cuales destacan aquellos de los distritos de Corral Quemado, Lambert, Talcuna y Arqueros, ubicados en el sector centro-norte de la región de Coquimbo. Los depósitos chilenos del sur de la región de Atacama y de la región de Coquimbo son de tipo estratiforme y constituyen parte de las secuencias de rocas volcano-sedimentarias del Cretácico Inferior que se distribuyen en una franja de orientación norte-sur, que abarca desde la región de Atacama hasta la de Coquimbo, entre las latitudes 28°19' y 30°30' S. Esta franja fue denominada por Biese (1956) Cuenca del Manganeso, y es coincidente con la franja metalogénica del Cretácico Inferior para el cobre (algunos mantos de manganeso presentan contenidos de cobre). La mineralización de manganeso se encuentra en cuerpos estratiformes de formas lenticulares, que contienen óxidos de manganeso, concordantes con la estratigrafía local e intercalados en areniscas y, en menor proporción, en travertinos (Arredondo *et al.*, 2017).

El distrito Lambert, por su parte, tiene depósitos estratiformes de manganeso y cobre-manganeso concordantes con la estratificación. En algunas minas de los distritos Lambert y Talcuna existe mineralización de cobre estratiforme, sobre el manto de manganeso, o bajo este, mientras que en el distrito Arqueros se reconocen mantos de manganeso en forma de lentes poco homogéneos (Arredondo *et al.*, 2017).

La mineralogía de mena está constituida por óxidos de manganeso, principalmente braunita y pirolusita, con psilomelano, criptomelano, manganita y, en menor proporción, hausmanita. Estos depósitos tendrían un origen singenético-sedimentario, según el cual el manganeso habría sido aportado por el volcanismo que generó la secuencia que lo hospeda y se habría concentrado y depositado en una cuenca lacustre (Arredondo *et al.*, 2017).

#### **4.4.1.2. Producción mundial y nacional de manganeso**

En la actualidad, los principales productores mundiales son Sudáfrica, Australia, China, Brasil y Gabón (Tabla 47).

**TABLA 47. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE MANGANESO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Producción (kt)	Participación (%)	Producción (kt)	Participación (%)
Sudáfrica	7.300	36,87	7.200	36,76
Australia	3.040	15,35	3.000	15,32
China	743	3,75	740	3,78
Brasil	624	3,15	620	3,17
Gabón	4.670	23,59	4.600	23,49
Otros países	3.423	17,29	3.424	17,48
Total mundial	19.800	100	19.584	100

Fuente: USGS (2023, 2024).  
kt: miles de toneladas.

El último año en que se informó producción de manganeso en Chile fue el 2009, en la región de Coquimbo, cuando se registraron 1.642 tnf (Sernageomin-INE, 2009). Esta cifra correspondió a un 0,017% de la producción mundial de ese año, la que alcanzó a 9.600 Mt (USGS, 2010).

La producción nacional histórica de este mineral provenía principalmente de las regiones de Atacama y Coquimbo, en especial desde los yacimientos ubicados en el sector centro-norte de esta última región, los que fueron explotados económicamente por más de un siglo. En efecto, la explotación de manganeso en la región de Coquimbo es conocida desde el año 1884, principalmente en el distrito Corral Quemado, en las minas Corral Quemado, Loma Negra y Toda La Vida, con leyes del material explotado que variaban entre 46 y 50% de Mn. Aunque estas paralizaron en el año 1936, se reactivaron a mediados del siglo XX impulsadas por los conflictos bélicos de la época (Arredondo *et al.*, 2017).

#### **4.4.1.3. Recursos y reservas de manganeso en el mundo y en Chile**

En la actualidad, los países con las mayores reservas de manganeso son Sudáfrica, China Australia, Brasil y Ucrania (Tabla 48; USGS, 2023, 2024).



**TABLA 48. RESERVA MUNDIAL DE MANGANESO, AÑOS 2022 Y 2023.**

País/año	2022		2023	
	Reservas (kt)	Participación (%)	Reservas (kt)	Participación (%)
Sudáfrica	640.000	37,25	600.000	31,45
China	280.000	16,30	280.000	14,68
Australia	270.000	15,72	500.000	26,20
Brasil	270.000	15,72	270.000	14,15
Ucrania	140.000	8,15	140.000	7,34
Otros	118.000	6,87	118.000	6,18
Total mundial	<b>1.718.000</b>	<b>100,00</b>	<b>1.908.000</b>	<b>100,00</b>

Fuente: USGS (2023, 2024).  
kt: miles de toneladas.

Actualmente, se estiman reservas de 7,25 Mt con 12% de Mn (Arredondo *et al.*, 2018) para algunas minas del distrito Corral Quemado. Además, en el extremo norte del país, se conoce el proyecto Metal y Manganese para Baterías Los Pumas (Southern Hemisphere Mining Limited, 2024), que no ha entrado en producción, y que tiene recursos estimados de 30,26 Mt, lo que podría significar la cantidad de 1,88 Mt de Mn contenido (Tabla 49), pero con una ley de solo 6,84%. No obstante, si la exploración permitiera pasar estos recursos a reservas, estas alcanzarían a 2,83 Mt de Mn, lo que representaría el 0,15% de las reservas mundiales.

**TABLA 49. ESTIMACIÓN DE RECURSOS DE MANGANESO DEL PROYECTO METAL Y MANGANESO PARA BATERÍAS LOS PUMAS.**

Nombre del depósito	Latitud	Longitud	Mineral	Categoría de recursos	Tonelaje (Mt)	Ley (%)	Contenido Mn (Mt)
Los Pumas	-18,04	-69,63	Manganese	Indicado+inferido	30,26	6,84	1,88

Fuente: Southern Hemisphere Mining Limited (2024).  
Mt: millones de toneladas.

Independiente de lo anterior, existe una fuente potencial de este mineral en los nódulos de manganeso del fondo oceánico, que se encuentran en planicies abisales alrededor de islas volcánicas y a profundidades entre 2.800 y 4.400 m (Valenzuela, 1986), pero que aún no ha sido explorada ni tampoco se han estimado sus reservas y que, además, tiene estudios limitados solo a temas geoquímicos y mineralógicos.

#### **4.4.1.4. Prospectos y cartera de proyectos de manganeso**

El único proyecto conocido actualmente en Chile es el ya mencionado proyecto Metal y Manganeso para Baterías Los Pumas (Southern Hemisphere Mining Limited, 2024), cuyos recursos estimados en 30,26 Mt tienen una ley de 6,84%, muy baja para depósitos de este tipo.

### **4.5. QUINTO GRUPO**

El quinto grupo comprende el níquel y el cromo, minerales nunca explotados y de los cuales no se conocen depósitos de potencial interés en el país, debido a que las características geológicas del territorio (procesos genéticos, tipo y distribución de las rocas hospedantes) no son favorables para su formación y, las pocas ocurrencias individualizadas, son de escaso interés.

Su inclusión en este documento tiene como finalidad dejar establecido que no existen antecedentes geológicos que pudieran sustentar la existencia de depósitos de interés económico de estos minerales en el territorio nacional.

#### **4.5.1. Níquel (Ni)**

Las mayores reservas de níquel en el mundo (54%) están asociadas a yacimientos lateríticos formados por procesos de meteorización de rocas ultramáficas, durante millones de años, principalmente en climas tropicales, cálidos y húmedos (USGS, 2024).

Otros tipos de depósitos que son fuente de níquel son los de sulfuros de origen magmático (35% de las reservas mundiales) y, en menor proporción, los hidrotermales de Fe-Ni, yacimientos polimetálicos en rocas sedimentarias y depósitos de sulfuros masivos, así como nódulos polimetálicos de fondo oceánico, que podrían llegar a aportar un 10% del total mundial (USGS, 2024).

El principal productor y poseedor de reservas de este mineral, a nivel mundial, en la actualidad es Indonesia, con un 50% de la producción y un 43% de las reservas (USGS, 2024).

En el norte de Chile, en el distrito de Sierra Esmeralda, región de Antofagasta, se ubica el depósito Don Rigoberto, el único reconocido en el país con contenidos de níquel, que corresponde a vetas alojadas en rocas calcáreas del Jurásico, intruidas por un plutón del Jurásico Inferior. Estas vetas, de escaso desarrollo, con 30 m de longitud y espesores entre 0,3 y 0,6 m, son explotables solo a escala artesanal, razón por la cual no existe registro histórico del destino del mineral extraído, aunque se estima que mayoritariamente se usó en aleaciones de acero (Piñana *et al.*, 2020).

#### **4.5.2. Cromo (Cr)**

En el mundo se conocen dos tipos de depósitos de cromo:

- Yacimientos de cromita estratiformes, asociados a grandes complejos ígneos estratificados máficos-ultramáficos, normalmente de edad proterozoica.
- Yacimientos podiformes asociados a complejos ofiolíticos, normalmente de edad fanerozoica.

La principal disponibilidad de cromo se concentra en Kazajstán y Sudáfrica, que suman reservas de 430.000 kt, lo que representa un 95% de los recursos mundiales (USGS, 2024).

En el sur de Chile, en la zona de La Cabaña, región de La Araucanía, se han identificado serpentinitas (dunitas de grano grueso parcial a totalmente serpentinizadas) que se asocian a la Serie Occidental del Basamento Metamórfico de la cordillera de la Costa. Contienen cromita diseminada y, en menor medida, lentes y podos de cromita, afectados por un intenso fracturamiento polidireccional (Alfaro, 1980; Barra *et al.*, 1998). Sin embargo, estudios preliminares en algunos cuerpos serpentiniticos indicaron que son subeconómicos (Guzmán, 1977; Karzulovic *et al.*, 1979). Con el objetivo de conocer sus reales posibilidades económicas, Alfaro (1980) recomendó efectuar estudios de mayor detalle en los afloramientos de La Cabaña. Estudios posteriores han determinado que las rocas ultramáficas del sur del país no tienen posibilidades de constituirse en fuente de interés económico de cromitas.

Tanto para el níquel como para el cromo, las características geológicas del territorio nacional no son favorables para el desarrollo de depósitos de interés, razón por la cual no se han determinado reservas ni recursos para estos minerales. Por tal motivo, no es posible evaluar el impacto de una producción en la oferta mundial, ya que la probabilidad de satisfacer eventuales requerimientos nacionales e internacionales por estos minerales es prácticamente nula.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

La creciente importancia de los minerales críticos y/o estratégicos en el país y el mundo requiere un mejor conocimiento de las características geológicas y metalogénicas así como de la distribución de los depósitos que los contienen. Esto permitirá tanto conocer los factores geológicos, geomorfológicos, estructurales y climáticos que determinan la formación de sus depósitos como identificar nuevas fuentes de tales minerales, que puedan contribuir a satisfacer los crecientes requerimientos en materias ambientales de la sociedad actual y futura.

De acuerdo con lo expuesto en este trabajo respecto de la producción y recursos minerales nacionales, Chile tiene perspectivas desde “muy buenas” a “excelentes” para la existencia de un número importante de minerales críticos y/o estratégicos descritos a nivel mundial. Ello podría permitirle al país ser parte de la línea de suministro de una cantidad significativa de minerales críticos y/o estratégicos que serán objeto de un fuerte incremento en su demanda, debido a los requerimientos de la transición energética y la seguridad alimentaria, entre otros, en el corto, mediano y largo plazo.

El análisis del potencial geológico-minero de estos minerales ha permitido establecer la siguiente agrupación (Tabla 50):

**Primer grupo:** corresponde al cobre, molibdeno, renio, litio, potasio y boro. Los cuatro primeros, están relacionados con el requerimiento mundial para la transición energética, según las listas elaboradas por países industrializados demandantes de recursos minerales. Estos

cuatro minerales son relevantes y competitivos a escala mundial, tanto por su producción minera actual como por sus reservas y recursos geológicos. Por su parte, el potasio y el boro tienen una importante producción actual y sus reservas aseguran un bajo riesgo de agotamiento; su incidencia en la economía nacional es comparativamente menor y son considerados estratégicos desde el punto de vista de la seguridad alimentaria.

**Segundo grupo:** incluye el cinc, los nitratos y el yodo. El primero, mineral crítico en la transición energética, tiene una producción nacional que se limita a un par de distritos mineros, aunque con posibilidades de aumentarla según el catastro de proyectos y los recursos estimados. Además, existen buenas perspectivas para su exploración en depósitos tipo vetas polimetálicas de tipo epitermal. Por su parte, los nitratos y el yodo tienen bajo riesgo de agotamiento y un moderado impacto en la economía nacional; son minerales estratégicos con incidencia en la seguridad alimentaria.

**Tercer grupo:** considera el cobalto, tierras raras y titanio, minerales que están incluidos en los listados de minerales críticos de los países industrializados. El primero fue explotado hasta mediados de la década del 40 y los dos últimos nunca lo fueron. Por otra parte, todos han sido objeto de una exploración activa en los últimos años, con algunos prospectos o proyectos identificados, los que podrían llegar a constituir faenas mineras en el futuro, ya sea como recursos principales o como subproductos de menas de mayor interés.

**Cuarto grupo:** incluye el manganeso, mineral sin producción actual, aunque con registros históricos de actividad minera. Para confirmar su potencial como mineral crítico se requiere avanzar en el reconocimiento y evaluación de sus recursos y reservas mediante renovados programas de exploración.

**Quinto grupo:** corresponde a níquel y cromo, minerales nunca explotados y con escaso interés prospectivo, debido a que las características geológicas del territorio nacional no son favorables para el desarrollo de depósitos de interés económico.

**TABLA 50. POTENCIAL DE MINERALES CRÍTICOS Y/O ESTRATÉGICOS EN CHILE RELACIONADOS CON LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y LA SEGURIDAD ALIMENTARIA.**

Ámbito	Elemento	Grupo				
		1.er	2.º	3.er	4.º	5.º
<b>Transición energética</b>	Cobre (Cu)	x				
	Molibdeno (Mo)	x				
	Renio (Re)	x				
	Litio (Li)	x				
	Cinc (Zn)		x			
	Cobalto (Co)			x		
	Elementos de tierras raras (ETR)			x		
	Titanio (Ti)			x		
	Manganeso (Mn)				x	
	Níquel (Ni)					x
	Cromo (Cr)					x
<b>Seguridad alimentaria</b>	Potasio (K)	x				
	Boro (B)	x				
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )		x			
	Yodo (I)		x			

Fuente: este trabajo

## 5.2. RECOMENDACIONES

La existencia de diversos tipos de depósitos minerales en el país, como pórfidos Cu-Mo-Au, depósitos tipo óxidos de Fe-Cu-Au (IOCG), depósitos tipo magnetita-apatito (IOA), depósitos vetiformes epitermales polimetálicos y depósitos volcano-sedimentarios, se traduce en una importante variedad de minerales contenidos por tipo de depósito, lo que amplía la factibilidad de contar con un mayor potencial de minerales críticos y/o estratégicos, como Cu, Mo, Re, Zn, Co, ETR, Ti y Mn.

Respecto de litio, potasio, boro, nitratos y yodo, su exploración y explotación está centrada solo en sistemas salinos, no obstante que, para el caso del litio, existe evidencia geológica de que su presencia está relacionada, además, con depósitos en roca, en campos geotérmicos y en arcillas. Estos depósitos forman parte de ambientes geológicos también reconocidos en Chile, que tendrían posibilidades de contener depósitos de litio de interés económico, lo que demuestra la conveniencia de ampliar la cartera de exploración a estos ambientes en el país. Con una decisión de esta naturaleza, es posible incrementar tanto los recursos y reservas de litio en Chile como diversificar las fuentes nacionales de producción, lo

que contribuiría a una mayor seguridad y continuidad en el suministro de este recurso, para satisfacer los requerimientos de la transición energética en el mundo. Asimismo, una exploración y explotación diversificada contribuirá a disminuir la presión ambiental y social generada por la extracción de litio desde salares, los que constituyen ecosistemas altamente complejos y de gran fragilidad, cuya protección, conservación y manejo debe ser prioritaria para el Estado de Chile.

Si bien el conocimiento de la evolución geológica y de los eventos metalogénicos en el territorio, y el análisis de la producción minera actual, son importantes para identificar minerales críticos y/o estratégicos de interés, con base en los listados internacionales de estos minerales, también es necesario desarrollar un programa de estudio orientado a evaluar el potencial interés de minerales reconocidos como anomalías geoquímicas asociadas a depósitos de diferentes tipos, los que podrían recuperarse como subproductos, p. ej., vanadio, uranio, arsénico, baritina, wolframio.

Con base en lo expuesto, se recomienda fortalecer los programas orientados al estudio de recursos minerales en Sernageomin (Recursos Minerales, Geoquímica, Geofísica, Laboratorio), que permitan poner a disposición de la industria minera y de la comunidad en general, información geocientífica precompetitiva, con la finalidad de promover la inversión para la exploración de minerales críticos y/o estratégicos, objetivo asociado a la Política Minera 2050 del Gobierno de Chile.

## **6. AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a los y las colegas que colaboraron en la preparación de este documento, ya fuera aportando información, entregando una opinión técnica o efectuando una lectura crítica que contribuyera a mejorarlo. Asimismo, agradecen a M. Ávalos y P. Fuentes la elaboración de las figuras diseñadas por dos de los autores/as, y al colega Felipe Espinoza por su aporte y difusión de este estudio.

## 7. REFERENCIAS

- Aclara. 2024. Modelos geológicos de proyectos de depósitos de REE-HR en Aclara Chile. *In* Seminario internacional, Yacimientos de tierras raras hospedadas en regolito (REE-HR): elementos estratégicos y perspectivas globales: 10 p. Santiago.
- Albemarle Corporation. 2023. Anual report 2023. Albemarle Corporation. [https://s201.q4cdn.com/960975307/files/doc\\_financials/2023/q4/9aefa2f5-78dc-4015-bf20-b71aba0bb593.pdf](https://s201.q4cdn.com/960975307/files/doc_financials/2023/q4/9aefa2f5-78dc-4015-bf20-b71aba0bb593.pdf) (Última visita 24/08/2024).
- Alfaro, G. 1980. Antecedentes preliminares sobre la composición y génesis de las cromitas de La Cabaña (Cautín). *Revista Geológica de Chile* 11: 29-41.
- Alonso, H.; Risacher, F. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. *Revista Geológica de Chile* 23 (2): 113-122.
- Angloamerican plc. 2023. Ore reserves and mineral resources. Report 2023. Angloamerican plc. <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-Group-v5/PLC/investors/annual-reporting/2023/ore-reserves-and-mineral-resources-report-2023.pdf> (Última visita 31/07/2024).
- Antofagasta plc. 2022. Developing mining for a better future. Annual report and financial statements 2022. Antofagasta plc. <https://www.aminerals.cl/docs/default-source/archivo/reportes/annual-report-2022.pdf> (Última visita 31/07/2024).
- Aracena, I.; Triviño, T.; Rayo, J. 2019. Chemical and mineralogical characterization method for tailings deposit. *In* International Mineral Processing Conference, No. 15, International Seminar on Geometallurgy, No. 6: 9 p. Santiago.
- Arredondo, C.; Moscoso, R.; Prieto, X.; Ortega, R.; Carrasco, R.; Vivallo, W.; Mateo, L.; Pantoja, G.; Ulloa, M.; Ercilla, O.; Ridelle, E. 2017. Depósitos Minerales de la región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie de Recursos Minerales y Energéticos 35: 134 p. Santiago.
- Arredondo, C.; Mateo, L.; Ortega, R.; Prieto, X.; Ulloa, M.; Ercilla, O.; Ridelle, E. 2018. Base de datos de depósitos metalíferos de la región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Base de Datos 6: 34 p., 2 bases de datos (1 DVD versión 1.0). Santiago.
- Atex Resources. 2023. Independent technical report. Valeriano copper-gold project, Atacama region, Chile. Atex Resources. [https://www.atexresources.com/\\_resources/reports/SRK\\_ATEX\\_NI\\_43-101\\_Valeriano.pdf?v=053108](https://www.atexresources.com/_resources/reports/SRK_ATEX_NI_43-101_Valeriano.pdf?v=053108) (Última visita 31-07-2024).



- Ausenco Engineering Chile Ltda. 2021. Preliminary economic assessment for Penco Module Project. Amended and restated NI 43-101. Technical Report (Prepared for Aclara Resources Inc.): 420 p.
- Australian Government. 2023. Critical Minerals Strategy 2023-2030. Australian Government Department of Industry, Science and Resources. <https://www.industry.gov.au/publications/critical-minerals-strategy-2023-2030> (Última visita 21/08/2024).
- Barra, F.; Rabbia, O.; Alfaro, G.; Miller, H.; Hofer, C.; Kraus, S. 1998. Serpentinitas y cromititas de La Cabaña, Cordillera de la Costa, Chile central. *Revista Geológica de Chile* 25 (1): 16 p. Santiago.
- Benson, T.R.; Coble, M.A.; Rytuba, J.J.; Mahood, G.A. 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications* 8 (1): 19 p. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00234-y>
- BHP. 2023. Annual Report 2023. [https://www.bhp.com/-/media/documents/investors/annual-reports/2023/230822\\_bhpannualreport2023.pdf](https://www.bhp.com/-/media/documents/investors/annual-reports/2023/230822_bhpannualreport2023.pdf) (Última visita 31/07/2024).
- Biese, W. 1956. Los yacimientos de manganeso de Chile. *In* Congreso Geológico Internacional, No. 20: 337-416. México.
- Boric, R.; Díaz, F.; Maksaev, V. 1990. Geología y yacimientos metalíferos de la región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 40: 246 p., 2 mapas metalogénicos escala 1:500.000. Santiago.
- Bowell, R.J.; Lagos, L.; De los Hoyos, C.R.; Declercq, J. 2020. Classification and characteristics of natural lithium resources. *Elements* 16 (4): 259-264.
- Bradley, D.C.; Stillings, L.L.; Jaskula, B.W.; Munk, L.; McCauley, A.D. 2017. Lithium. *In* Critical Mineral Resources of the United States-Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply (Schulz, K.J.; DeYoung, J.H.; Seal, R.R.; Bradley, D.C.; editors). United States Geological Survey, Professional Paper 1802-0. <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/o/pp1802o.pdf> (Última visita 07/08/2024).
- Camus, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería: 267 p. Santiago.
- Camus, F.; Castelli, J. 2021. Historia, Exploración y Geología de los Yacimientos Metalíferos de Chile. Origo Ediciones: 1340 p.

- Capstone Copper. 2024. News Release. Capstone Copper Provides 2024 Guidance and Announces 2023 Production Results. <https://capstonecopper.com/es/news/capstone-copper-provides-2024-guidance-and-announces-2023-production-results?action=genpdf&id=2413> (Última visita 31/07/2024).
- Capstone Mining Corp. 2020. Santo Domingo Project. Region III, Chile. NI 43-101 Technical Report. [https://minedocs.com/20/SantoDomingo\\_PEA\\_02192020.pdf](https://minedocs.com/20/SantoDomingo_PEA_02192020.pdf) (Última visita 31/07/2024)
- Carrasco, R.; Cádiz, N. 2019. Potencial de litio en el salar de La Isla, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-19-74 (Inédito): 95 p. Santiago.\*
- Carrasco, R.; Cádiz, N. 2020. Potencial de litio en el salar de Pajonales, región de Antofagasta, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-20-85 (Inédito): 95 p. Santiago.\*
- Carrasco, R.; Cádiz, N. 2021. Potencial de litio en el salar de Las Parinas, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-94 (Inédito): 88 p. Santiago. \*
- Carrasco, R.; Cádiz, N. 2022. Potencial de litio en el salar de Aguilar, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-22-101 (Inédito): 100 p. Santiago. \*
- Chadha, R.; Sivamani, G. 2022. Critical Minerals for India: Assessing their Criticality and Projecting their Needs for Green Technologies. Centre for Social and Economic Progress (CSEP), Working Paper 19: 44 p. New Delhi.
- Chepillo, J. 2019. Ocurrencia de cobalto y su asociación en la mineralización de hierro en el yacimiento Bronce Sur, Distrito Pleito, Región de Atacama. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Memoria de título (Inédito): 126 p. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170760> (Última visita 01/07/2024).
- Chilean Cobalt Corp. 2024. Proyecto La Cobaltera, distrito de San Juan, norte de Chile. Chilean Cobalt Corp. <https://www.chileancobaltcorp.com/project> (Última visita 04/07/2024).
- Chilepolimetálico. 2021. Chilepolimetálico, diversificando la minería chilena: 46 p. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/<https://chilepolimetalico.cl/wp-content/uploads/2021/04/Libro-Chilepolimetalico.pdf> (Última visita 06-07-2024).
- Chong, G. 1984. Die salare in Nordchile-Geologie, Struktur und Geochemie. Geotekt Forschungen 67 (1-2): 1-146. Stuttgart.

- Chong, G. 1988. The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18°00' and 27°00' south latitude. *In* the Southern Central Andes: contribution to structure and evolution of an Active Continental Margin (Bahlburg, H.; Breitskreutz, C.; Giese, P.; editors). Lecture notes in Earth Sciences, Springer Verlag 17: 137-151. Heidelberg.
- Cochilco. 2013. Monitoreo de los minerales industriales de Chile, análisis de los recursos salinos 2013. Comisión Chilena del cobre: 57p. Santiago. <https://www.cochilco.cl/web/litio/> (Última visita 01/07/2024).
- Cochilco. 2016. Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera. Comisión chilena del cobre: 55 p. Santiago.
- Cochilco. 2023. El mercado de litio: desarrollo reciente y proyecciones al 2035 (actualización a mayo 2023). Comisión Chilena del Cobre: 40 p.
- Codelco. 2023. Memoria Anual 2023. Corporación Nacional del Cobre de Chile. [https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/docs/20240404/20240404191040/memoria\\_codelco\\_2023.pdf](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20240404/20240404191040/memoria_codelco_2023.pdf) (Última visita 31/07/2024).
- Codelco. 2024. Codelco educa. Corporación Nacional del Cobre de Chile. [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/como\\_sevende.html](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/como_sevende.html). (Última visita 03/07/2024).
- Cohen, K.M.; Finney, S.C.; Gibbard, P.L.; Fan, J.-X. 2013 (updated). The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 199-204. <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2023-09.pdf> (Última visita 06/07/2024).
- Consejo Minero. 2024. Centinela. <https://consejominero.cl/nosotros/mapa-minero/centinela/> (Última visita 31/07/2024).
- Consejo Minero. 2024. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. <https://consejominero.cl/nosotros/mapa-minero/compania-minera-dona-ines-de-collahuasi/> (Última visita 31/07/2024).
- Consejo Minero. 2024. El Soldado. <https://consejominero.cl/nosotros/mapa-minero/el-soldado/> (Última visita 31/07/2024).
- Crisóstomo, E.; Rabbia, O. 2018. Revisión y síntesis de la metalogénesis asociada al magmatismo Carbonífero del centro-sur de Chile. *In* Congreso Geológico de Chile, No. 15: p. 318. Concepción.
- Cruzat, A. 1968. Monografía sobre los yacimientos de cobalto chilenos (Inédito). Corporación de Fomento de la Producción-Instituto de Investigaciones Geológicas-Naciones Unidas: 30 p.

- Elzea, k.; Trivedi, N.; Barker, J. (Editores). 2006. *Minerales y rocas industriales: productos básicos, mercados y usos*. Sociedad de Minería, Metalurgia y Exploración (Colorado, EE. UU.): 1548 p.
- Ericksen, G.E. 1981. *Geología y origen de los depósitos de nitrato chilenos*. United States Geological Survey, Professional Paper 1188: 37 p. chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://pubs.usgs.gov/pp/1188/report.pdf (Última visita 31/07/2024).
- European Commission. 2023. *Study on the Critical Raw Materials for the EU, Final Report*. chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.eunews.it/wp-content/uploads/2023/10/study-on-the-critical-raw-materials-for-the-eu-2023-ET0723116ENN.pdf (Última visita 21/08/2024).
- Fay, I.; Barton, M.D. 2012. *Alteration and ore distribution in the Proterozoic Mines Series, Tenke-Fungurume Cu-Co district, Democratic Republic of Congo*. *Mineralium Deposita* 47: 501-519. [https://www.researchgate.net/publication/257331100\\_Alteration\\_and\\_ore\\_distribution\\_in\\_the\\_Proterozoic\\_Mines\\_Series\\_Tenke-Fungurume\\_Cu-Co\\_district\\_Democratic\\_Republic\\_of\\_Congo](https://www.researchgate.net/publication/257331100_Alteration_and_ore_distribution_in_the_Proterozoic_Mines_Series_Tenke-Fungurume_Cu-Co_district_Democratic_Republic_of_Congo) (Última visita 24/08/2024).
- Fortín, H.; Serrano, M. 2000. *Geología y estimación preliminar de recursos Prospecto Cerro Carmen, comuna de Diego de Almagro. Proyecto de investigación geológica de la presencia de tierras raras en la Cordillera de la Costa, regiones de Atacama y Coquimbo*. Corporación Chilena de Energía Nuclear y Empresa Nacional de Minería: 125 p.
- Gajardo, A.; Gutiérrez, A. 1993. *Estudio de recursos no metálicos en la VIII región. Informe (Inédito)*, Ministerio de Minería-Intendencia VIII Región-Servicio Nacional de Geología y Minería: 123 p.
- Gajardo, A.; Carrasco, R. 2010. *Salares del norte de Chile: potenciales fuentes de litio*. *In Ponencia en reunión del grupo de expertos senior sobre el desarrollo sostenible del litio en américa latina: asuntos emergentes y oportunidades*. Santiago. <https://docplayer.es/22665806-Salares-del-norte-de-chile-potenciales-fuente-de-litio.html> (Última visita 22/09/2022).
- Gajardo, A.; López, M.C.; Carrasco, R.; Mendoza, J.L. 2003. *Mapa de yacimientos de rocas y minerales industriales de Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 7, 1 mapa en 6 hojas, escala 1:1.000.000. Santiago.

- Gobierno de Chile. 2023. Estrategia Nacional del Litio. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://s3.amazonaws.com/gobcl-prod/public\_files/Campa%C3%B1as/Litio-por-Chile/Estrategia-Nacional-del-litio-ES\_14062023\_2003.pdf (Última visita 06/08/2024).
- Government of Canada. 2023. Critical Minerals Centre of Excellence. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/campaign/critical-minerals-in-canada.html> (Última visita 03/07/2024).
- Guzmán, R. 1977. Sondajes preliminares del prospecto Quitratué. Informe (Inédito). Instituto de Investigaciones Geológicas: 51 p. Santiago.
- Hitzman, M.W.; Broughton, D.; Selley, D.; Woodhead, J.; Wood, D.; Bull, S. 2012. The Central African Copperbelt: Diverse Stratigraphic, Structural, and Temporal Setting in the World's Largest Sedimentary Copper District. Society of Economic Geologists, Inc., Special Publication 16: 487-514.
- Hot Chili Limited. 2024. Quarterly Report period ending 30 June 2024. <https://www.hotchili.net.au/investors/reports> (Última visita 31/07/2024).
- Houston, J.; Butcher, A.; Ehren, P.; Evans, K.; Godfrey, L. 2011. The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards. *Economic Geology* 106: 1225-1239.
- IEA. 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (Última visita 21/08/2024).
- IEA. 2024. Global Critical Minerals Outlook, 2024. International Energy Agency. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://iea.blob.core.windows.net/assets/ee01701d-1d5c-4ba8-9df6-abeeac9de99a/GlobalCriticalMineralsOutlook2024.pdf (Última visita 21/08/2024).
- Jobin-Bevans, S. 2021. Independent Technical Report on the Carrizal Cu-Co-Au Property. <https://www.redmetalsresources.com/investors/technical-report/> (Última visita 03/07/2024).
- Jorge, S.; Melgarejo, J.C.; Alfonso, P. 2003. Asociaciones minerales en sedimentos exhalativos y sus derivados metamórficos. *In Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada* (Melgarejo, J.C.; editor). Publicaciones de la Universidad de Barcelona: 287-308. Barcelona.

- JRI Ingeniería S.A.-EcoMetales Limited. 2020. Manual de Uso Público. Reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor D288-MAN-GN-P2-001. Relaves con Valor: 52 p. [https://relavesconvalor.cl/wp-content/uploads/2022/04/MANUAL\\_USO\\_PUBLICO-2.pdf](https://relavesconvalor.cl/wp-content/uploads/2022/04/MANUAL_USO_PUBLICO-2.pdf) (Última visita 01/07/2024).
- Karzulovic, J.; Hauser, A.; Velasco, L. 1979. Informe del potencial de recursos mineros y energéticos de la Provincia de Valdivia, X Región Geográfica. Corporación de Fomento de la Producción (Inédito): 77 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.
- Kelley, K.D. 2020. International geoscience collaboration to support critical mineral discovery. Fact Sheet 2020-3035, 2. [chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pubs.usgs.gov/fs/2020/3035/fs20203035.pdf](https://pubs.usgs.gov/fs/2020/3035/fs20203035.pdf) (Última visita 21/08/2024).
- Kotthoff, K. 2020. Mineralogía de depósitos de relave en Chile y relación con yacimientos de origen: potencial para la recuperación de elementos de valor. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Memoria de título (Inédito): 143 p. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175220> (Última vista 01/07/2024).
- Kuyvenhoven, R.; Townley, B. 2020. Challenges and opportunities for cobalt recovery at copper plants. *In* Conference Flotation 19. Cape Town. [https://www.researchgate.net/publication/340983294\\_Challenges\\_and\\_opportunities\\_for\\_cobalt\\_recovery\\_at\\_copper\\_plants](https://www.researchgate.net/publication/340983294_Challenges_and_opportunities_for_cobalt_recovery_at_copper_plants) (Última visita 01/07/2024).
- Lacassie, J.P.; Vivallo, W.; Díaz, A. 2016. Caracterización geoquímica de yacimientos metalíferos de la región de Atacama mediante el uso de redes neuronales artificiales. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-16-61 (Inédito): 177 p., 1 CD. Santiago.\*
- Liu, S.; Fan, H.; Liu, X.; Butcher, A. 2023. Global rare earth elements projects: New developments and supply chains. *Ore geology reviews* 157: 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105428>
- López Steinmetz, R.L.; Salvi, S. 2021. Brine grades in Andean salars: When basin size matters a review of the Lithium Triangle. *Earth-Science Reviews* 217. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103615>
- Los Andes Copper Ltd. 2024. Reserve and resource statement. Los Andes Copper Ltd. <https://losandescopper.com/projects/reserve-resource-statement/> (Última visita 31/07/2024).

- Lundin Mining. 2024. News Release. Lundin Mining Provides 2024 Guidance and Announces 2023 Production Results. [https://lundinmining.com/site/assets/files/9233/240111\\_-\\_lundin\\_mining\\_-\\_2023\\_production\\_results\\_and\\_20.pdf](https://lundinmining.com/site/assets/files/9233/240111_-_lundin_mining_-_2023_production_results_and_20.pdf) (Última visita 31/07/2024).
- Maksaev, V. 2001. Sulfuros masivos volcanogénicos (VMS). *In* Apuntes Metalogénesis. Universidad de Chile: 8 p. Santiago.
- Maksaev, V.; Townley, B.; Palacios, C.; Camus, F. 2007. Metallic ore deposits. *In* The Geology of Chile (Moreno, T.; Gibbons, W.; editors). The Geological Society: 179-199. London.
- Marquardt, C.; Navarro, J.P.; Henríquez, R.; Bustos, N.; Vergara, P.; Roquer, T.; Pavez, I.; Jara, N.; Monares, D.; Delgado, D.; Iribarra, P. 2023. Génesis de depósitos de tierras raras hospedados en regolitos, cordillera de la Costa, Chile Central. *In* Congreso Geológico Chileno No. 16: 1 p. Santiago.
- Maycock, J.; Luraschi, A.; Mendoza, M.; Bianchin, M.; Rennie, D.; Guzmán, C.; Amelunxen, R.; Gingles, M.; Kerr, T.; Betinol, R.; Jones, L.; Bush, G. 2020. Santo Domingo Project, Region III, Chile. NI 43-101 Technical Report: 516 p. <https://capstonecopper.com/operations/santo-domingo/#h-technical-report> (Última visita 01/08/2024).
- MVC. 2024. Minera Valle Central. <https://mineravallecentral.cl/> (Última visita 07-08-2024).
- Ministerio de Minería. 2020. Chile, líder en metales que facilitan el futuro. Ministerio de Minería: 71 p. [https://participa.minmineria.gob.cl/uploads/b14cf0ec-39fd-4640-911f-fc1969e0f860/project\\_file/file/c7ea099d-0f85-43a9-9eff-2d1585026ae2/2020\\_-\\_Chile\\_\\_%C3%ADder\\_en\\_metales\\_que\\_facilitan\\_el\\_futuro.pdf](https://participa.minmineria.gob.cl/uploads/b14cf0ec-39fd-4640-911f-fc1969e0f860/project_file/file/c7ea099d-0f85-43a9-9eff-2d1585026ae2/2020_-_Chile__%C3%ADder_en_metales_que_facilitan_el_futuro.pdf)
- Ministerio de Minería. 2022. Potencial de minerales críticos en Chile. Ministerio de Minería: 32 p. <https://www.minmineria.gob.cl/media/2022/01/MinMineri%CC%81a-2022-Minerales-Cri%CC%81ticos.pdf>
- Ministerio de Minería. 2024. Ediciones PDAC años 2021-2024. Ministerio de Minería. <https://www.minmineria.cl/pdac/> (Última visita 01/07/2024).
- Murty, Y.; Alvin, M.A.; Lifton, J. 2023. Rare earth metals and mineral industries. Status and Prospects. Springer: 518 p.
- Naranjo, J.A.; Villa, V.; Ramírez, C.; Pérez de Arce, C. 2018. Volcanism and tectonism in the southern Central Andes: Tempo, styles, and relationships. *Geosphere* 14 (2): 626-641. <https://doi.org/10.1130/GES01350.1>
- Naranjo, J.A.; Hevia, F.; Villa, V.; Ramírez, C. 2019. Miocene to Holocene geological evolution of the Lazufre segment in the Andean volcanic arc. *Geosphere* 15 (1): 47-59. <https://doi.org/10.1130/GES01352.1>

- Ngex Minerals. 2024. Mineral resource estimate. Ngex Minerals <https://ngexminerals.com/projects/vicuna-district/los-helados/los-helados-overview/> (Última visita 31/07/2024).
- Ortega, R.; Moscoso, R.; Arredondo, C.; Águila, B.; Mateo, L.; Pantoja, G. 2021. Depósitos Metalíferos de la región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie de Recursos Minerales y Energéticos 36: 219 p., 1 mapa escala 1:500.000. Santiago.
- Ortega, R.; Arredondo, C.; Águila, B.; Mateo, L.; Ercilla, O. 2022. Base de datos de depósitos metalíferos de la región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Base de Datos 12: 24 p., 1 base de datos (1 DVD versión 1.0). Santiago.
- Oyarzún, R.; Clemmey, H. 1986. Las mineralizaciones bandeadas de hierro y de sulfuros masivos estratoligados. *In* Geología y recursos minerales de Chile (Frutos, J.; Oyarzún, R.; Pincheira, M.; editores). Universidad de Concepción: 754-766. Concepción.
- Palma, G.; Barra, F.; Reich Morales, M.; Valencia, V.; Simon, A.; Vervoort, J.; Leisen, M.; Romero, R. 2019. Halogens, trace element concentrations, and Sr-Nd isotopes in apatite from iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: Evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 246: 515-540. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.12.019>
- Pan American Silver. 2023. Mineral reserves and mineral resources. <https://panamericansilver.com/operations/reserves-and-resources/> (Última visita 01/07/2024).
- Pavez, I. 2020. Proceso de extracción de elementos de tierras raras (lantánidos, neodimio y disprosio) de bajo impacto ambiental a partir de relaves geoquímicamente catastrados. Universidad de Concepción, Departamento de Geología. Memoria de título (Inédito): 135 p. Concepción.
- Piñana, X.; Munster, H.; Vivallos, J. 2020. Geología, geofísica y metalogénesis de la cordillera de la Costa y el flanco occidental de la cordillera de Domeyko, 25-26° S, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-20-79 (Inédito): 188 p., 1 mapa escala 1:25.000, 1 DVD con 2 anexos. Santiago.\*
- Proenza, J. 2015. Mineralogía y Geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en yacimientos lateríticos. *Macla* 20: 3-9.



- Pueyo, J.J.; Chong, G.; Vega, M. 1998. Mineralogía y evolución de las salmueras madres en el yacimiento de nitratos Pedro de Valdivia, Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile* 25 (1): 15 p. <http://www.andeangeology.cl/index.php/revista1/article/view/V25n1-a01/769> (Última visita 13/08/2024).
- Quevedo, J. 2020. Concentración y distribución de Cobalto en piritas del depósito mineral IOCG La Estrella, región de Atacama, Chile. Universidad Mayor. Memoria de título (Inédito): 120 p. Santiago.
- Quevedo, J.; Kuyvenhoven, R. 2023. Concentración y distribución de cobalto en piritas, caso de estudio de un depósito mineral del tipo IOCG en Chile. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 16, Actas: 1 p. Santiago.
- Risacher, F.; Alonso, H.; Salazar, C. 1999. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones. Ministerio de Obras Públicas-Universidad Católica del Norte-Institut de Recherche pour le Développement, 4 Vol.: 296 p. Santiago.
- Risacher, F.; Alonso, H.; Salazar, C. 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews* 63 (3-4): 249-293. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00037-0)
- Risacher, F.; Fritz, B.; Hauser, A. 2011. Origin of components in Chilean thermal waters. *Journal of South American Earth Sciences* 31 (1): 153-170.
- Rivera, O.; Yáñez, G. 2007. Geotectonic Evolution of the Central Chile Oligo-Miocene Volcanic Arc, 33-34°S: Towards a Multidisciplinary Re-interpretation of the Inherited Lithospheric Structures. *In Congreso Internacional sobre Geología y Geofísica del Hemisferio Sur (Geosur)*, Libro de Resúmenes: 138 p. Santiago.
- Rivera, O.; Yáñez, G. 2009. Naturaleza y rol de estructuras translitosféricas en la evolución del arco volcánico oligo-mioceno de Chile Central entre los 32 y 34°S. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 12: 4 p. Santiago.
- Rivera, O.; Cerda, A. 2012. Los Pórfidos Cupríferos de Chile Central: Significado de Estructuras Translitosféricas y Anomalías Gravimétricas en la Metalogénesis Andina. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 13, Actas ST1: 3 p. Antofagasta.
- Rowan, L. 2024. Critical Mineral Resources: National Policy and Critical Minerals List. Congressional Research Service: R47982. [chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R47982](https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R47982) (Última visita 01/07/2024).

- Schulz, K.; De Young, J.; Seal, R.; Bradley, D. 2017. Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply. United States Geological Survey: 44 p.
- SCW White Mountain Titanium Corporation. s.f. Estudio de impacto Ambiental, Proyecto Cerro Blanco. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://seia.sea.gob.cl/archivos/f15\\_Resumen\\_Ejecutivo.pdf](https://seia.sea.gob.cl/archivos/f15_Resumen_Ejecutivo.pdf) (Última visita 22/08/2024).
- Segerstrom, K. 1960. Cuadrángulo Quebrada Paipote. Provincia de Atacama. Instituto Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 2 (1): 55 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- Sernageomin. 2023a. Anuario de la Minería de Chile 2022. Servicio Nacional de Geología y Minería: 235 p. Santiago. <https://www.sernageomin.cl/anuario-de-la-mineria-de-chile/> (Última visita 01/07/2024).
- Sernageomin. 2023b. Catastro de Depósitos de Relaves en Chile. Datos Públicos Depósito de Relaves. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/> (Última visita 24/08/2024).
- Sernageomin. 2024. Anuario de la Minería de Chile 2023. Servicio Nacional de Geología y Minería: 243 p. Santiago. <https://www.sernageomin.cl/anuario-de-la-mineria-de-chile/> (Última visita 01/07/2024).
- Sernageomin-CMNM. 2017. Priorización de salares del norte de Chile con relación a su potencial en litio: resultados del taller de trabajo Sernageomin-CMNM, 10 de enero 2017. Servicio Nacional de Geología y Minería-Comité de Minería No Metálica, 79 Documento Interno (Inédito), SNGM-1000-QA-001/CMNM-REP-GC-002: 327 p., 1 anexo. Santiago.
- Sernageomin-INE. 2009. Anuario de la Minería de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería-Instituto Nacional de Estadísticas: 228 p. Santiago. <https://www.sernageomin.cl/anuario-de-la-mineria-de-chile/> (Última visita 01/07/2024).
- SGB. 2024. An overview of Critical e Strategic Minerals Potential of Brazil. Serviço Geológico do Brasil. [https://www.sgb.gov.br/pdac/media/critical\\_and\\_strategic\\_minerals.pdf](https://www.sgb.gov.br/pdac/media/critical_and_strategic_minerals.pdf) (Última visita 21/08/2024).
- SMM. 2024. China Cobalt Market Report 2024. Shanghai Metals Market. <https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2024/05/China-cobalt-report-2024.pdf> (Última visita 09/08/2024).

- Sillitoe, R.H. 1992. Gold and copper metallogeny of the central Andes-Past, Present, and Future Exploration Objectives. *Economic Geology* 87: 2205-2216.
- Sillitoe, R.H. 2000. Gold-Rich-Porphyry-Deposits: Descriptive and Genetic Models and Their Role in Exploration and Discovery. *Society of Economic Geologists Reviews* 13: 315-343.
- Sillitoe, R.H. 2012. Copper provinces. *Society of Economic Geologist, Special Publications* 16: 1-18.
- SQM. 2023. Memoria anual 2023. Sociedad Química y Minera. [https://s25.q4cdn.com/757756353/files/doc\\_financials/2023/ar/memoria-sqm-2023\\_esp\\_vf.pdf](https://s25.q4cdn.com/757756353/files/doc_financials/2023/ar/memoria-sqm-2023_esp_vf.pdf) (Última visita 09/08/2024).
- Southern Hemisphere Mining Limited. 2024. Proyecto de metal y manganeso para baterías Los Pumas. Southern Hemisphere Mining Limited. <https://www.shmining.com.au/investor-centre/los-pumas-project> (Última visita 04/07/2024).
- SRK Consulting. 2019. Estimación de recursos minerales en sistemas de vetas mesotérmicas de cobalto y cobre. SRK Consulting. <https://www.srk.com/en/projects/rosa-amelia-mineral-resource-estimation> (Última visita 09/08/2024).
- Stoertz, G.E.; Ericksen, G.E. 1974. Geology of salars in northern Chile. United States Geological Survey, Professional Paper: 70 p. Washington. <https://pubs.usgs.gov/publication/pp811>. (Última visita 09/08/2024).
- SUNRESIN. s.f. Descripción general de la extracción directa de litio (DLE) a partir de salmuera de salar y salmuera geotérmica. SUNRESIN. <https://www.seplite.com/sunresin-direct-lithium-extraction/> (Última visita 09/10/2024).
- Sutulov, A. 1976. Minería chilena 1545-1975. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM): 260 p. Santiago.
- Townley, B.; Díaz, A.; Luca, R. 2017. Estado del arte y potenciales recursos de Co y Mn en Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Advanced Mining Technology Center: 52 p.
- Tracking Exploraciones. 2024. Proyecto Playa-Playa Este de Tracking Exploraciones. <https://trackingexploraciones.cl>

- Troncoso, R.; Ercilla, O. 2016. Caracterización geoquímica superficial de aguas y sales de los principales salares andinos (22°50'-26°05'S), regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-16-65 (Inédito), 2 vols.: 427 p. Santiago. \*
- Troncoso, R.; Ercilla, O.; Carrasco, R.; Vivallo, W. 2013. Estudio del Potencial de litio en Salares del Norte de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-13-55 (Inédito): 251 p. \*
- USGS. 2010. Mineral commodity summaries 2010. United States Geological Survey: 193 p. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2010.pdf> (Última visita 24/08/2024).
- USGS. 2021. Mineral commodity summaries 2021. United States Geological Survey: 200 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2021> (Última visita 24/08/2024).
- USGS. 2022. Mineral commodity summaries 2022. United States Geological Survey: 202 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2022> (Última visita 24/08/2024).
- USGS. 2023. Mineral commodity summaries 2023. United States Geological Survey: 210 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2023> (Última visita 24/08/2024).
- USGS. 2024. Mineral commodity summaries 2024. United States Geological Survey: 212 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2024> (Última visita 24/08/2024).
- Valenzuela, E. 1986. Recursos metálicos del suelo y del subsuelo de la zona económica exclusiva chilena. Universidad de Playa Ancha de Ciencias de la Educación, Jornadas Nacionales de Cultura 11: 492-504. Viña del Mar.
- Van Gosen, B.S.; Verplanck, P.L.; Seal II, R.R.; Long, K.R.; Gambogi, J. 2017. Rare-earth elements. *In* Critical mineral resources of the United States-Economic and environmental geology and prospects for future supply (Schulz, K.J.; DeYoung, J.H. Jr.; Seal, R.R. II; Bradley, D.C.; editors). United States Geological Survey, Professional Paper 1802: 797 p. <https://pubs.usgs.gov/publication/pp1802O> (Última visita 11/08/2024).
- Velásquez, G.; Carrizo, D.; Salvi, S.; Vela, I.; Pablo, M.; Pérez, A. 2020. Tracking Cobalt, REE and Gold from a Porphyry-Type Deposit by LA-ICP-MS: A Geological Approach towards Metal-Selective Mining in Tailings. *Minerals* 10: 17 p. <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/2/109>
- Vila, T. 1973. Geología y Geoquímica de los depósitos salinos andinos, provincia de Antofagasta. Universidad de Chile, Departamento de Geología. Memoria de título (Inédito): 201 p. Santiago.

- Vila, T. 1986. Geología de los depósitos salinos del norte de Chile: antecedentes geoquímicos y pautas de prospección de litio. *In* Geología y Recursos minerales de Chile. Vol. 2 (Frutos, J.; Oyarzún, R.; Pincheira, M.; editores). Universidad de Concepción: 799-819.
- Vivallo, W.; Díaz, A.; Jorquera, R. 2008. Yacimientos metalíferos de la región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos 27: 72 p., 1mapa escala 1: 500.000. Santiago.
- Zappettini, E.O. 2021. Minerales y metales críticos y estratégicos-Análisis de situación y metodología de clasificación para la República Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Serie Contribuciones Técnicas, Recursos Minerales 45: 17 p.

\* Documento inédito disponible en la Biblioteca del Servicio Nacional de Geología y Minería.

