

YACIMIENTOS DE HIERRO CHILENOS

Los yacimientos de hierro chilenos más importantes de Chile se encuentran en la Cordillera de la Costa de las regiones de Atacama y Coquimbo (III y IV Regiones) constituyendo la denominada **Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa o Franja Ferrífera Chilena (Fig.1)**; esta es una franja longitudinal de depósitos ferríferos que se extiende por más de 600 km entre las latitudes de 26° y 32°S y que coincide con la posición de una faja de intrusivos del Albiano (~110-100 Ma; Cretácico Inferior alto) y con la posición de la Zona de Falla de Atacama en su extremo sur.



Fig. 1. Franja Ferrífera de la Cordillera de la Costa.

Las minas de Fe chilenas más importantes son:

- Mina **Los Colorados**: inaugurada en 1998 y ubicada al interior del Valle del Huasco en la III Región y viene a reemplazar al antiguo yacimiento El Algarrobo, que debe cerrar por agotamiento del mineral. Sus reservas son 245 Mt con ley media de 48% Fe.
- Mina **El Algarrobo**: ubicada en la III Región y en explotación desde 1959. Sus reservas medidas alcanzan a 3,6 Mt con 47,5% Fe (ley de corte 26% de Fe magnético).
- Mina **El Romeral**: ubicada en la IV Región, sus reservas medidas alcanzan a 44,5 Mt con 49,1% Fe (ley de corte 30% Fe).

Todas estas minas son explotadas por la Compañía Minera del Pacífico, filial de la empresa privatizada CAP. La producción chilena de mineral de Fe en 1998 alcanzó a 9.112.055 toneladas de mineral, pero este gran tonelaje se tradujo en 163,3 millones de US\$, lo que representa solo un 2,7% del total del valor las exportaciones mineras chilenas del mismo año (US\$ 6.097,7).

La escasa participación porcentual del mineral de Fe en el mercado minero chileno refleja el bajo precio del hierro en los mercados internacionales. Por otra parte, cabe señalar que la mayor parte del hierro producido en el mundo proviene de la explotación masiva de enormes depósitos sedimentarios de hierro bandeado (BIF) proterozoicos como las **itabiritas** de Brasil; este tipo de yacimientos representan una dura competencia para depósitos más pequeños como los chilenos. Brasil es el mayor productor de hierro de Latinoamérica y en 1998 produjo 199,5 millones de toneladas de mineral de hierro (además de 25.7 Mt de acero y 25 Mt de hierro en barras) y exportó 150 Mt de mineral de hierro con un valor de US\$ 3.250 millones. Además, Brasil es el líder sudamericano en minería, sus exportaciones mineras de 1998 alcanzaron a US\$ 11.122 millones (casi el doble del valor de las exportaciones mineras chilenas) y una parte importante de la producción minera brasileña es para consumo interno (no se exporta).

Los depósitos de hierro chilenos han sido también denominados:

Yacimientos de magnetita-apatito (Ruiz et al., 1965)

Magnetita hospedada en rocas volcánicas (Cox y Singer, 1986)

Yacimientos tipo Kiruna (Vivallo y Henríquez, 1997)

Los cuerpos de menas corresponden a principalmente a magnetita masiva y forman lentes o bolsonadas irregulares, pero muchos son vetiformes o mantiformes. Las dimensiones de los principales cuerpos individuales varían entre 100-1000 m de longitud y desde decenas a 200 m de ancho y su extensión vertical varía desde pocas decenas de metros hasta 650 m.

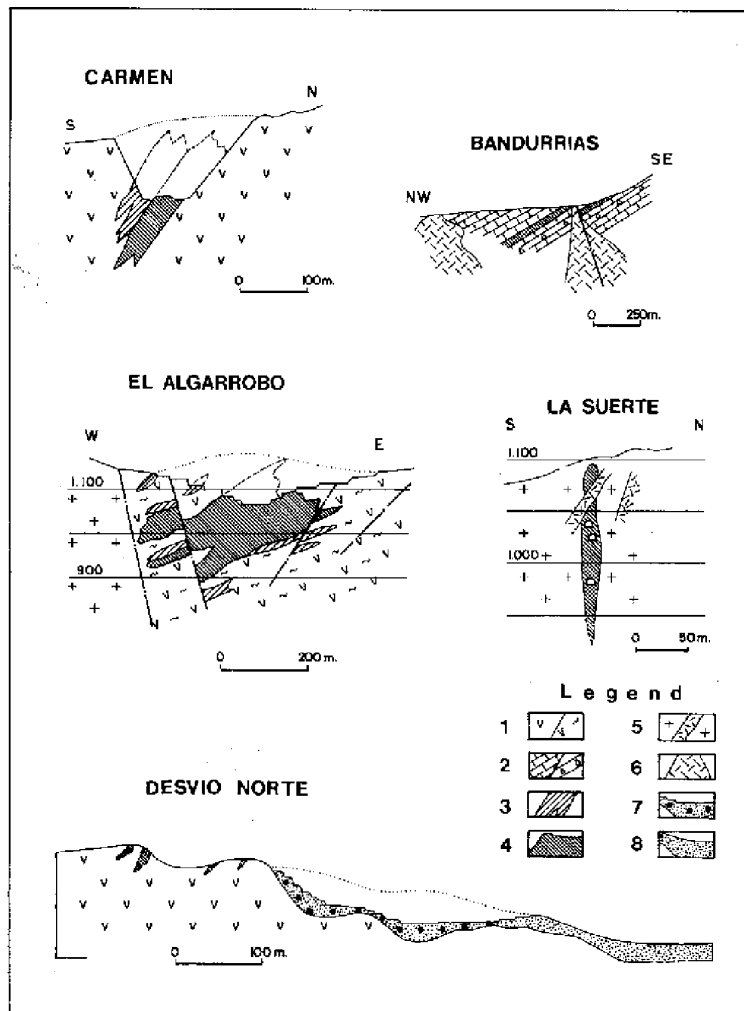


Fig. 2. Tipos de depósitos de Fe chilenos según Espinoza (1990). 1. Andesitas neocomianas y metaandesitas; 2. Rocas sedimentarias del Grupo Chañarcillo; 3. Pseudobrecha con mineralización de baja ley; 4. Cuerpos masivos de alta ley; 5. Dioritas neocomianas del batolito costero con diques andesíticos; 6. Stocks dioríticos y apófisis; 7. Aluvio Plio-Pleistoceno con clastos de magnetita; 8. Aluvio.

Espinoza (1990) presento una clasificación de los yacimientos de Fe chilenos, basado en la forma y rocas encajadoras de los mismos, a saber:

- Tipo Carmen: masas de magnetita aproximadamente lenticulares o de variadas formas y actitudes hospedados por rocas volcánicas.
- Tipo Bandurrias: estratos ferríferos intercalados en secuencias sedimentarias.
- Tipo Algarrobo: depósitos irregulares emplazados en rocas volcánicas en zonas de contacto con cuerpos intrusivos. Estos son los cuerpos de mayor tamaño y **los únicos en explotación** pertenecen a este grupo.
- Tipo La Suerte: vetas de magnetita emplazadas en rocas intrusivas.

- Tipo Desvío Norte: depósitos aluviales con rodados (clastos) de mineral de Fe.

Los depósitos más relevantes desde el punto de vista económico son los de tipo Algarrobo, es decir los depósitos irregulares hospedados por rocas volcánicas o metavolcánicas en la vecindad de cuerpos intrusivos. En estos yacimientos el mineral de mena primario más abundante es la magnetita con especularita subordinada (hematita en hojas). La magnetita ha experimentado oxidación secundaria o martitización¹ en distintos grados, la que en casos extremos ha transformado toda la magnetita a hematita. Los minerales de ganga son escasos, principalmente apatito (clorapatito), actinolita y clorita. La mena es compacta y dura de color negro, pero en parte tiene textura granular debido a que está constituida por octaedros de magnetita.

Las andesitas que hospedan a los cuerpos de óxido de hierro presentan coloración gris verdosa oscura o negra y una fuerte alteración/metamorfismo de contacto que incluye:

Actinolita
Escapolita
Biotita
Turmalina
Clorita
Clorapatito
Turmalina
Titanita
Escaso granate
Escasa piritita

Esta asociación de minerales representa una alteración de alta temperatura que frecuentemente oblitera completamente la textura original de las rocas volcánicas. Además existen amplios halos externos de rocas blanqueadas con alteración de sílice-arcillas-sericita; estas rocas alteradas frecuentemente presentan anomalías geoquímicas de Cu y Au, con algunas vetas mesotermales menores de magnetita con calcopirita o minerales oxidados de cobre, pero sin yacimientos de relevancia económica.

Los depósitos de hierro de la Franja Ferrífera se localizan dentro del dominio de la Zona de Falla de Atacama; que es un sistema de falla regional mayor de tipo transcurrente sinistral desarrollado en el Cretácico Inferior y que incluyó el desarrollo de fajas miloníticas a lo largo de la Cordillera de la Costa de las Regiones II a IV y con movimientos verticales durante el Cenozoico. Algunos cuerpos de mena de Fe presenta control estructural por fallas pertenecientes a este sistema regional.

Las rocas metavolcánicas que constituyen la roca huésped de los cuerpos de magnetita se ubican a corta distancia de cuerpos intrusivos tonalíticos, monzoníticos, dioríticos o granodioríticos; en muchos casos las volcanitas son roof-pendants elongados longitudinalmente e incluidos en los intrusivos.

¹ Martita: hematita que se presenta en cristales octaédricos negros pseudomorfos de magnetita.

Génesis de la mineralización ferrífera chilena

Existe una controversia clásica y no concluyente respecto al origen de los depósitos de magnetita-apatito chilenos. Algunos autores (Ej. Nyström and Henríquez, 1994, 1995) los interpretan como derivados de cristalización de magmas (magmas de mena de óxido de hierro), mientras otros indican que son depósitos de reemplazo hidrotermal (metasomático; Ej. Hirtzman et al., 1992; Bookstrom, 1995) y también que posiblemente se formaron a partir de fluidos que tuvieron poca o ninguna interacción con magmas (Barton and Johnson, 1996, Rhodes and Oreskes, 1999). Los yacimientos de magnetita-apatito chilenos se han comparado con los depósitos de Fe de Kirunavaara, Suecia e internacionalmente las menas de Fe-P se conocen como **Tipo Kiruna**. Aunque también hay controversia, la interpretación tradicional para las menas de hierro suecas es de inyección magmática de óxidos de Fe, los que son explicados como un líquido inmiscible (masa fundida) separado dentro de una cámara magmática y el mismo origen se asignó a los yacimientos chilenos Algarrobo y El Tofo por Geiger (1931). En ésta hipótesis los óxidos de Fe constituirían un magma residual que se mantendría líquido después que la masa principal del magma se habría solidificado formando intrusiones (y posibles efusivos) de magnetita. La intrusión del magma de Fe-P produciría la alteración/metamorfismo de contacto de las rocas huéspedes formándose actinolita y biotita, escapolita, apatito y magnetita; la clorita sería ya sea del mismo origen o un reemplazo retrógrado de la actinolita y biotita.

Brüggen (1934) también planteó un origen de los depósitos derivado de la inyección de óxido de Fe fundido y atribuyó a gases y soluciones posteriores la alteración de las rocas de caja a clorita, caolinita, especularita e inyección de guías de feldespatos en la roca cloritizada.

Los investigadores chilenos que trabajan en yacimientos de Fe (Fernando Henríquez, Waldo Vivallo, Sergio Espinoza) siguen sosteniendo que la génesis de los yacimientos de hierro chilenos deriva de **magmas de mena**. Por ejemplo, Vivallo et al. (1994) plantean para el distrito Cerro Imán en Copiapó que la mineralización ferrífera se origina en el emplazamiento de un magma de mena en o muy cerca de la paleosuperficie, emplazamiento que sería contemporáneo con la actividad volcánica del Cretácico y que habría originado una actividad hidrotermal que dio por resultado la zonación de alteración en las rocas de caja andesíticas, a saber:

- Actinolita con venillas de magnetita y magnetita-actinolita cerca de la mena de óxidos de Fe originando un stockwork.
- Hacia fuera se extiende roca actinolitizada sin mineralización.
- Sobreimpuesta a la actinolita hay silicificación y turmalinización en un halo externo.

Por otra parte, Ruiz, (1943, 1965) planteó que los yacimientos de hierro son de tipo metamórfico de contacto relacionados genéticamente a intrusiones de granitoides en las rocas volcánicas neocomianas. En esta concepción los cuerpos de magnetita y otros minerales acompañantes se habrían formados **por reemplazo metasomático** y relleno de fracturas principalmente en las rocas volcánicas; los fenómenos de reemplazo y relleno habrían sido causados por el desarrollo de una fase **pneumatolítica** e hidrotermal,

proveniente del magma silicatado intrusivo y cuya acción habría comenzado cuando la mayor parte del magma estaba líquido o solo con cristales en suspensión, terminando antes de completarse la solidificación.

El estudio de Bookstrom (1977) del yacimiento El Romeral concluyó que la depositación de la magnetita fue **hidrotermal** y fue acompañada de actinolitización pervasiva principalmente en el rango de temperatura de 475°-550°C. El cizalle sinistral de la falla Romeral (Sistema de Falla de Atacama) fue contemporáneo con la depositación de la mena y con el emplazamiento de diques aplíticos de rumbo NW. La depositación de la mena de Fe fue seguida de cloritización, emplazamiento de diques menores y por albitización (An 8-25) acompañada de cuarzo, microclina y turmalina subordinada sobreimpuesta a la diorita actinolizada originando “aplitita”. Posteriormente se emplazaron varios diques intrusivos y algunas vetas tardías de actinolita-magnetita-apatito y localmente se produjo una fuerte argilización y martitización.

En base a consideraciones teóricas y a las asociaciones minerales Bookstrom (1977) concluyó que la mineralización de Fe de El Romeral debió ocurrir a una presión de 2 Kb, es decir alrededor de ~7,6 km de profundidad y a temperaturas entre 475°-550°C, mientras Vivallo et al. (1994) sugieren para el depósito Cerro Imán un emplazamiento a nivel volcánico o subvolcánico, es decir muy cercano a la paleosuperficie.

Por su parte, Ménard (1992, 1995) propuso que la mineralización de magnetita-apatito chilena se produjo por el emplazamiento de cuerpos intrusivos relativamente profundos (>4 km), de gabros y dioritas anhidros (con piroxeno), relacionados a subducción. Estas intrusiones máficas evolucionaron en condiciones de fugacidad de oxígeno relativamente elevadas y desarrollaron la mineralización de óxidos de hierro y alteración sódica asociada a alta temperatura (660°-450°C). Adicionalmente, Ménard (1992) postuló la existencia de un tipo de mineralización intermedio relacionado a intrusivos poco diferenciados (dioritas de hornblenda), los cuales desarrollaron mineralización de óxidos de hierro en profundidad y de sulfuros de cobre en niveles más altos, caracterizados por una alteración sódica temprana y alteración potásica subsecuente.

El yacimiento de hierro de El Laco; un depósito de Magnetita-Apatito asociado a un complejo volcánico Plioceno.

El yacimiento de hierro **El Laco** se ubica en la Cordillera Principal de la II Región de Antofagasta (23°48'S – 67°30'W) está formado por 7 cuerpos de mena que rodean al Pico Laco un aparato volcánico andesítico a ríodacítico que ha sido datado en $2,0 \pm 0,3$ Ma (K-Ar roca total; Gardeweg y Ramírez, 1985) y $2,1 \pm 0,1$ Ma (trazas de fisión en apatito; Maksiyev et al., 1988) y constituye un ejemplo a nivel mundial de mineralización de Fe ligada a actividad volcánica. Los cuerpos denominados Laco Norte, Laco Sur, San Vicente Alto y parte de Rodados Negros son estratoligados y aparecen intercalados, en forma concordante con las volcanitas del complejo volcánico, su espesor máximo es de 60 m y en planta son circulares, lenticulares o de media Luna con diámetros de 300 a 900 m; el cuerpo denominado San Vicente Bajo es irregular elongado en sentido NW-SE con 350 m de

largo, 250 m de ancho y 45 m de profundidad conocida; los cuerpos denominados Laquito, Cristales Grandes y parte de Rodados Negros son vetiformes. De acuerdo a la Compañía Minera del Pacífico las reservas de El Laco alcanzan a 224 Mt de mineral con 80 a 98% de óxido de Fe masivo. Este está constituido principalmente por magnetita (parcialmente martitizada) y escasa hematita, con una proporción menor de minerales de ganga que incluye apatito, cuarzo, alunita, rutilo, plagioclasa y sanidina.

Las rocas volcánicas huésped de los cuerpos de hierro presentan una intensa alteración hidrotermal relacionada a actividad de fuentes termales y solfataras; las rocas están blanqueadas y lixiviadas y sus minerales componentes originales han sido reemplazados por cuarzo, tridimita, alunita, natroalunita, limonita, sericita, clorita y arcillas. Además, se han depositado abundantes sulfatos (yeso, alunita), sílice y azufre nativo, como producto de la actividad solfatárica. En torno a los cuerpos vetiformes e irregulares existe una delgada aureola caracterizada por cuarzo-escapolita-actinolita-magnetita.

REFERENCIAS

- Barton, M.D. and Johnson, D.A., 1996. Evaporitic source model for igneous related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization. *Geology*, V. 24, p. 259-262.
- Bookstrom, A.A., 1977. The magnetite deposits of El Romeral, Chile. *Economic Geology*, V. 64, pp. 1101-1130.
- Bookstrom, A.A., 1995. Magmatic features of iron ores of the Kiruna-type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry: a discussion. *Economic Geology*, V. 90, p. 469-473.
- Brüggen, J., 1934. Grundzüge der Geologie und Lagerstättenkunde Chiles. Tübingen, Math. Nat. Kl. D. Heidelberger Akad. D. Wiss., 362 p.
- Cox, D.P. and Singer, D.A., 1986. Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 379 p.
- Espinoza, S., 1990. The Atacama-Coquimbo Ferriferous Belt, Northern Chile. In: Fontboté, L.; Amstutz, G.C.; Cardozo, M.; Cedillo, E. and Frutos, J. (Editores) Stratabound Ore Deposits in the Andes. Special Publication N° 8 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Springer-Verlag, p. 353-364.
- Gardeweg, M. y Ramirez, C., 1985. Hoja Río Zapaleri. Carta Geológica de Chile N°66, SERNAGEOMIN, Santiago, Chile, 89 p.
- Geiger, P., 1931. The iron ores of the Kiruna type. Stockholm, Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. C, Ahandlingar och uppsatser, N° 367, Arsbok 24 (1930), N° 4.
- Hirtzman, M.W., Oreskes, N., and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, V. 58, p. 241-287.
- Maksaev, V., Gardeweg, M., Ramirez, C. y Zentilli, M., 1988. Aplicación del método trazas de fisión (fission-track) a la datación de cuerpos de magnetita de El Laco e Incahuasi en el Altiplano de la Región de Antofagasta. In: Quinto Congreso Geológico Chileno, Actas, Vol. 1, pp. B1-B23, Santiago.

- Ménard, J.J., 1992. Comparaison entre les roches plutoniques associées à la ceinture de Fer du Chili et aux porphyres cuprifères: arguments pétrologiques. Paris, Comptes Rendus Académie Sciences, V. 315, p. 725-731.
- Ménard, J.J., 1995. Relationship between altered pyroxene diorite and the magnetite mineralization in the Chilean Iron Belt, with emphasis on the El Algarrobo iron deposits (Atacama Region, Chile). *Mineralium Deposita*, V. 30, p. 268-274.
- Nyström, J.O., and Henríquez, F., 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry. *Economic Geology*, V. 89, p. 820-839.
- Nyström, J.O., and Henríquez, F., 1995. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry – A Reply. *Economic Geology*, V. 90, p. 473-457.
- Oreskes, N. and Hirtzman, M.W., 1993. A Model for the origin of Olympic Dam-type deposits. In: Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I. and Duke, J.M. (Editors) *Mineral Deposit Modeling*, Geological Association of Canada, Special Paper 40, pp. 615-634.
- Rhodes, A.L. and Oreskes, N., 1999. Oxygen Isotope Composition of Magnetite Deposits of El Laco, Chile: Evidence of Formation from Isotopically Heavy Fluids. In: Skinner, B.J. (editor), *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*, SEG Special Publication Number 7, p. 333-351.
- Ruiz, C., C., 1943. Los yacimientos de hierro de la región noroccidental de Copiapó, un tipo no descrito de yacimientos de contacto metamórfico. *Boletín Minero*, Sociedad Nacional de Minería, N° 522, p. 820-887; N° 523, p. 906-915.
- Ruiz, C., Aguirre, L., Corvalán, J., Klohn, C., Klohn, E., y Levi, B., 1965. *Geología y yacimientos metalíferos de Chile*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago. 302 p.
- Sillitoe, 1996. *Granites and metal deposits, Episodes*, V. 19, pp. 126-133.
- Vivallo, W., Espinoza, S. Y Henríquez, F., 1994. Geología y mineralización del distrito ferrífero Cerro Imán, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, V. 21, N° 2, pp. 197-212.
- Vivallo, W. y Henríquez, F., 1997. Relación genética entre los yacimientos estratoligados de Cu (“Tipo Manto”), de Cu-Fe±Au y de hierro del Tipo Kiruna. *Actas del VIII Congreso Geológico Chileno*, V. II, p. 1189-1193.