



Potencial de Exploración y Explotación de Recursos Minerales de Cobalto en Chile

Brian Townley, Alejandro Díaz y Rodrigo Luca

Resumen Ejecutivo

El presente informe del estado del arte sobre recursos minerales de cobalto en Chile se realiza dentro del estudio “Potencial de Exploración y Explotación de Recursos Minerales de Cobalto en Chile” solicitado por el Comité de Minería No Metálica – Corfo. En este se abordan las temáticas siguientes: Minería del Cobalto en Chile, pasado y presente; Evolución metalogénica y yacimientos minerales metálicos en Chile; Distritos mineros cobaltíferos históricos en Chile; Recursos minerales por Cobalto en yacimientos Chilenos; y Exploración minera y potenciales mineros en distritos históricos de producción de Cobalto.

Minería del Cobalto en Chile, pasado y presente

Chile tiene una larga historia en minería, en el pasado un productor global de salitre y al presente el primer productor mundial de cobre. Este enfoque mono productor hace que el país sea económicamente vulnerable y muy dependiente de su principal recurso y de las variaciones del precio de este en los mercados internacionales. La dependencia actual del cobre está intrínsecamente relacionado con las características del margen Andino Chileno, un ambiente del tipo arco volcánico continental de subducción en el cual procesos geológicos favorecieron la formación de yacimientos del tipo pórfido cuprífero de clase mundial, así como también la formación de yacimientos más pequeños del tipo estrato ligados de cobre, oxidados de hierro cobre-oro (IOCG) y skarns de cobre. Otros metales, oro, plata, hierro y menor cobalto, ocurren en yacimientos de vetas y brechas epitermales de metales preciosos, en yacimientos de hierro – apatito (IOA), y yacimientos de vetas y mantos de cobre-oro-cobalto, respectivamente. Se debe notar que metales como molibdeno, oro, plata y algunos otros metales se recuperan como sub productos de la minería del cobre, principalmente de pórfidos cupríferos.

La explotación de cobalto en Chile comenzó en 1865, inicialmente a partir de yacimientos de vetas y mantos con mineralización de cobre-oro-cobalto en el distrito San Juan, cercano a la ciudad de Huasco, como también de cuerpos de vetas cercanas a la ciudad de Copiapó, ambos en la región de Atacama. Producción adicional fue extraído de yacimientos de tipo manto, vetas y brechas con mineralización de cobre-oro-cobalto en el distrito Tambillos, región de Coquimbo. Producción de cobalto también se reportó en yacimientos de vetas en el sector El Volcán – Cajón del Maipo, región Metropolitana. La producción de cobalto cesó en 1944 con el cierre de La Cobaltera, distrito de San Juan. La máxima producción fue alcanzada durante la II Guerra Mundial, esto dado su uso en aleaciones de aceros.

Evolución metalogénica y yacimientos minerales metálicos en Chile

Chile posee gran riqueza en yacimientos minerales metálicos, principalmente de cobre, estos comenzando desde los inicios de la evolución tectónica – magmática del margen Andino en tiempos paleozoicos. Los yacimientos minerales y la evolución metalogénica se relacionan con una

larga historia de subducción a lo largo del margen convergente de placas tectónicas de Chile, los tipos de yacimientos y su distribución controlados por condiciones tectónicas y magmáticas en el tiempo y espacio. Los principales tipos de yacimientos y la distribución, desde los más antiguos a los más jóvenes son descritos a continuación (Maksaev et al., 2007):

- Paleozoico: Pórfidos cupríferos, todos pequeños y de baja ley, no económicos en Chile.
- Jurásico Superior: Yacimientos estrato ligados de cobre, yacimientos de vetas de cobre y de vetas de oro y plata.
- Cretácico Inferior: Pórfidos cupríferos de ocurrencia discreta; yacimientos del tipo hierro-apatito (IOA), yacimientos del tipo oxidados de hierro cobre-oro (IOCG), estrato ligados de cobre, skarns de cobre y hierro, y yacimientos del tipo vetas epitermales y mesotermiales de oro-cobre (metales base).
- Cretácico Superior: Yacimientos de vetas de oro-cobre y de plata de ocurrencia discreta, y ocurrencias menores de pórfidos cupríferos, pequeños y de baja ley.
- Paleoceno: Yacimientos de clase mundial del tipo pórfidos cupríferos, yacimientos de vetas epitermales de oro y plata, y ocurrencias menores de chimeneas de brecha de cobre.
- Eoceno Superior – Oligoceno Inferior: Yacimientos súper gigantes a monstruosos del tipo pórfido cuprífero.
- Mioceno: Yacimientos epitermales de metales preciosos y pórfidos de oro, y yacimientos súper gigantes a monstruosos del tipo pórfido cuprífero.

La distribución de la mineralización de Cobalto conocida y extraída en Chile ocurre dentro de la Franja Ferrífera de Chile, yacimientos hospedados en rocas metamórficas paleozoicas como también en rocas intrusivas, volcánicas y en menor medida sedimentarias de edad Cretácico Inferior, en un ambiente de arco volcánico a lo largo de la Cordillera de la Costa de las regiones de Atacama y Coquimbo. También se conoce de mineralización de Cobalto en la zona de El Volcán – Cajón del Maipo, Región Metropolitana, estos yacimientos probablemente de edad similar, formados en un ambiente de tras arco.

Basados en los principales tipos de yacimientos minerales metálicos en Chile, las únicas ocurrencias documentadas de yacimientos con mena primaria por cobalto se encuentran en el ambiente de arco y tras arco del Cretácico Inferior. Estos ocurren en la Franja Ferrífera de Chile, a lo largo de la cordillera de la costa de las regiones de Atacama y Coquimbo, hospedados principalmente en el Sistema de Falla de Atacama, y en menor medida se extienden en rocas volcánicas y sedimentarias del ambiente de tras arco de Chile Central (El Volcán – Cajón del Maipo, Región Metropolitana; Fig. 1, marcados en rectángulos rojos).

El Cobalto y minerales de cobalto presentan afinidad por sulfuros de cobre, níquel, arsénico y hierro, minerales que comúnmente forman asociaciones minerales en depósitos hidrotermales. Dada esta afinidad todos los depósitos de hierro pudieran tener potencial por minerales sulfuros /arseniuros de cobalto, en particular aquellos que presentan zonas muy ricas en minerales sulfuros de arsénico. Los principales tipos de depósitos en los cuales se puede evaluar un potencial de cobalto como subproducto son los yacimientos del tipo IOCG, seguidos por los IOA (Fig. 1 ambos tipos marcados en rectángulo rojo) y en menor medida, yacimientos del tipo pórfidos de cobre (Fig. 2 marcado en rectángulo azul). La evaluación de créditos por cobalto como sub producto es altamente dependiente de la ocurrencia mineral y metalurgia.

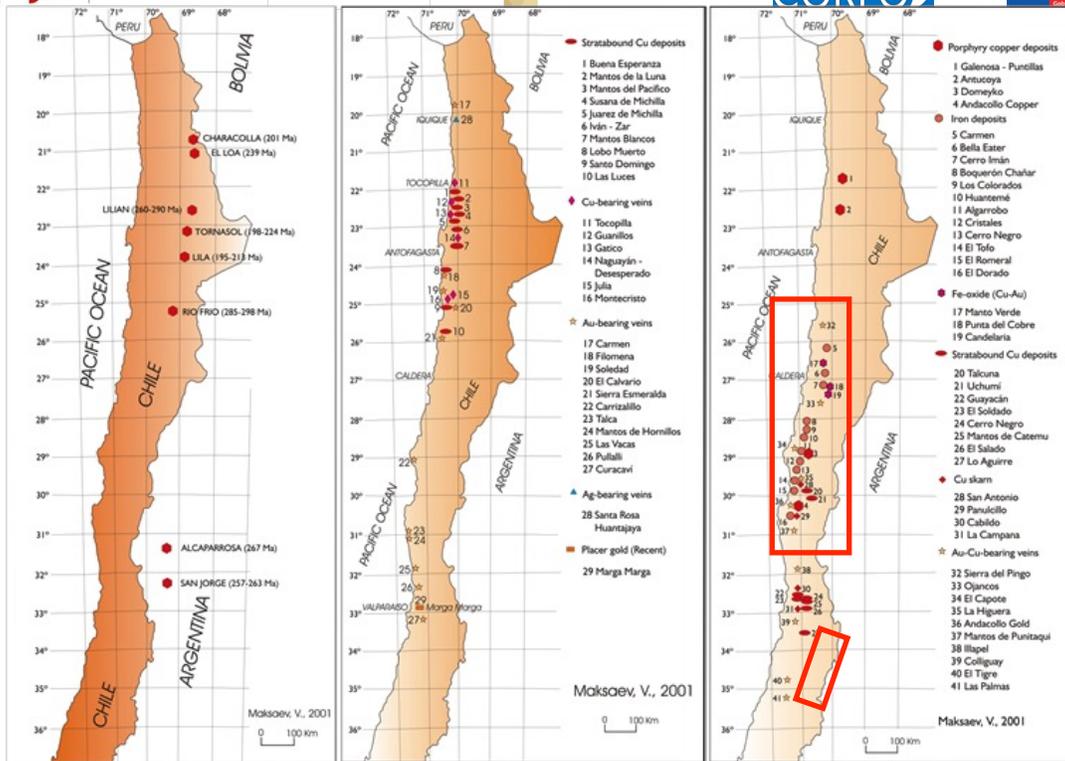


Figura 1. Cinturones metalogénicos, tipos y distribución de los principales depósitos metálicos en Chile (Maksaev et al., 2007; Maksaev, 2001). Desde izquierda a derecha: Paleozoico; Cretácico Inferior; Cretácico Superior. Rectángulos rojos: regiones en las cuales, se conoce la ocurrencia de depósitos de Cobalto como mena principal, documentados desde extracciones pasadas y/o en las cuales el depósito principal pudiera ser evaluado por cobalto como sub producto.

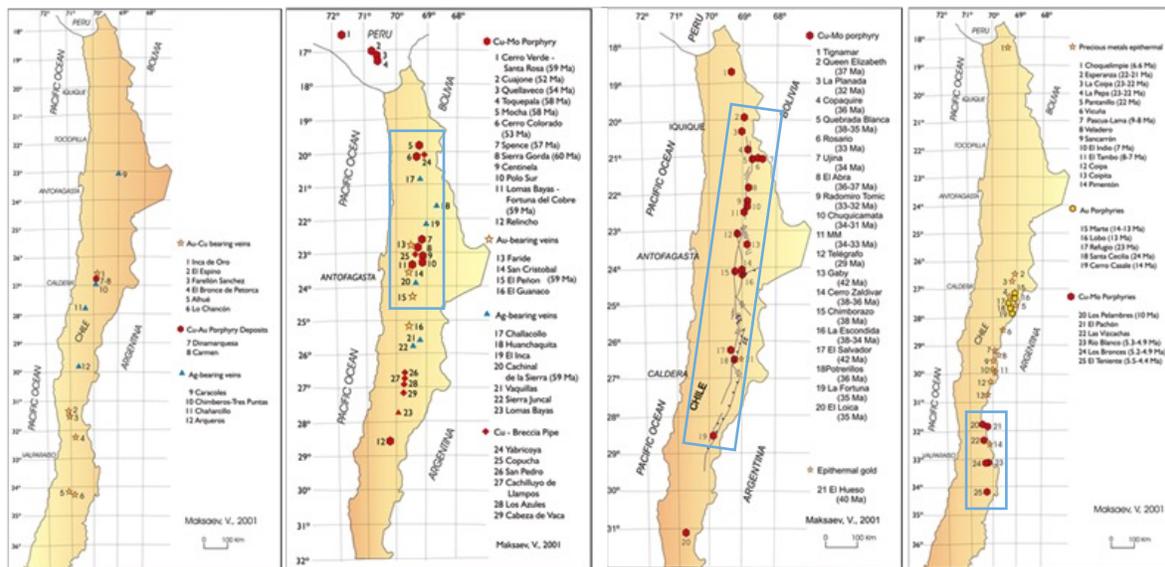


Figure 2. Cinturones metalogénicos, tipos y distribución de los principales depósitos metálicos en Chile (Maksaev et al., 2009; Maksaev, 2001). Desde izquierda a derecha: Cretácico Superior; Paleoceno; Oligoceno Superior – Eoceno Inferior; Mioceno. Rectángulos azules: regiones en las cuales los pórfidos cupríferos pudieran ser evaluados por Cobalto como sub – producto.

Distritos mineros cobaltíferos históricos de Chile

Los yacimientos con mena principal por cobalto en Chile han sido explotados desde depósitos del tipo vetas, brechas y ocasionalmente mantos, en las regiones de Atacama, Coquimbo y Metropolitana. Las rocas huéspedes de estos depósitos incluyen rocas metamórficas, volcánicas, intrusivas y en algunos casos sedimentarias. La producción pasada significativa se desarrolló solamente en dos distritos, el distrito San Juan en la región de Atacama, y el distrito Tambillos, en la región de Coquimbo.

En el distrito San Juan la mineralización de cobalto ocurre principalmente como cobaltita, un sulfuro arseniuro de cobalto. En superficie la mineralización de Cobalto ocurre como un mineral secundario oxidado, eritrina, un arsenato de cobalto. La mineralización ocurre principalmente en vetas y menor medida en mantos, con concentraciones promedio de 1,6% de Co para menas primarias y hasta 6,4% de Co para menas oxidadas.

En el distrito Tambillos ocurre mineralización de cobre-oro-cobalto en depósitos del tipo manto, vetas y brechas. En el pasado las menas principales eran cobre y cobalto, y este distrito fue probablemente el mayor productor de cobalto en Chile. En el presente las minas dentro del distrito siguen activas, pero solamente explotadas por cobre, con oro recuperado como subproducto, sin información de cobalto. En 1942 las leyes reportadas de cobalto eran entre 4 y 5% como mena principal. Datos de exploraciones posteriores indican concentraciones promedio de cobalto de 1%.

En la región Metropolitana, los datos de producción histórica de las minas Las Merceditas, localizadas en el valle de El Volcán – Cajón del Maipo, reportan mineralización de sulfuros arseniuros de cobalto con leyes promedio entre 2,4 y 2,58%.

Recursos minerales por Cobalto en depósitos Chilenos

Distrito San Juan

El Distrito San Juan está localizado al sur del pueblo de Freirina, cerca de las ciudades de Huasco en la costa, y Vallenar, hacia el interior desde Freirina. La geología en este distrito es comprendida por un basamento metamórfico Paleozoico hacia el oeste el cual subyace a rocas volcánicas y sedimentarias del Jurásico Superior hacia el sur y este (Vivallo et al., 2008; Fig. 3). Ambas unidades, el basamento y rocas volcánicas y sedimentarias, son intruidas por intrusivos del Jurásico Superior y Cretácico Inferior. En este distrito un total de 118 depósitos tipo veta son reconocidos en un área de 5x10 km cuadrados, todos relacionados con el Sistema de Falla Atacama. Estas vetas son agrupadas en las zonas de mineralización Fragueta, El Romero, Cobaltera, Quebradita y Labrar (Fig. 3). Muestras de exploraciones de rocas de minerales de mena primaria (Geoexploraciones, 1983), de pilas de minerales de acopio, de pequeñas minas, así como desde afloramientos, indican concentraciones de cobalto entre 0,001% y 1,95%, junto con contenidos variables de cobre (7,9% - 0,037%), oro (1,1 g/t a 0,1 g/t), plata (8,8 g/t a 0,5 g/t), níquel (0,49% a 0,023%) y cadmio (4,7 g/t a 0,023 g/t). Basados en campañas de exploración y evaluación conducidas en 1983, Geoexploraciones divide el distrito en dos zonas. Como resultados ellos indican recursos de minerales acumulados *in situ* en pilas de mineral para dos pilas en la Zona 1, una con 1,300 Tm, y

el segundo con 3.960 Tm, ambas con un promedio de leyes de cobalto sobre 1%. En la Zona 2 ellos determinaron 62.000 Tm en pilas de mineral de la Mina Santa Rosa, estas con un rango de concentración entre 0,05 y 0,24% de Co, así como con un promedio de ley de cobre de 2,44%. Para esta zona se recomendaron realizar mayores estudios de detalle.

Al norte del Distrito San Juan, ligeramente al norte del pueblo de Freirina, la Compañía Minera Santa Marta reporta aproximadamente 500.000 Tm de relave con concentraciones promedio de cobalto de 0,11%, junto con concentraciones de cobre en promedio de 0,23% (INTEC, 1988).

Otros reportes sobre depósitos de relaves en las proximidades de Freirina, indican concentraciones de cobalto de 221 y 358 ppm, esto para muestras discretas de superficie. Reportes del depósito de relaves Capote, también para muestras discretas de superficie, indican valores de concentraciones de cobalto de 325 y 426 ppm.

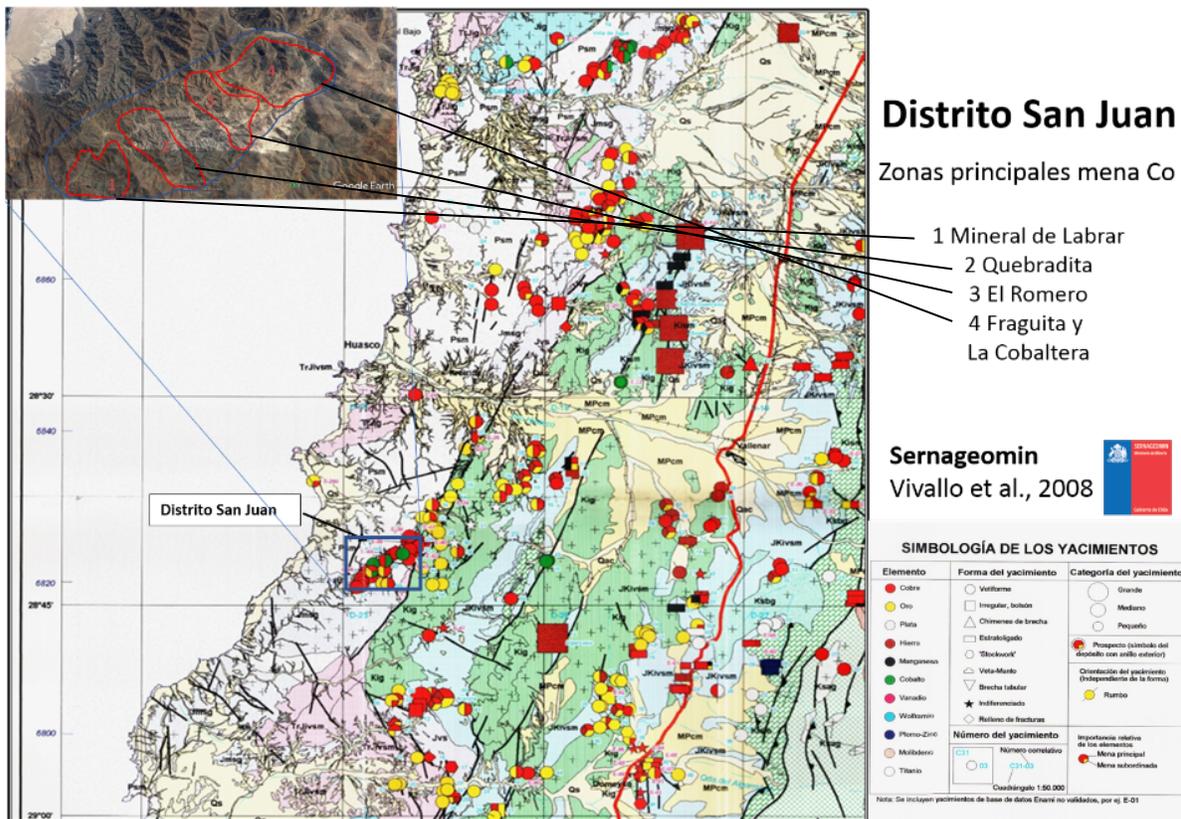


Figure 3. Geología y mineralización del Distrito San Juan, Región de Atacama. Zonas de mineralización Labrar, Quebradita, El Romero y Fraguita – La Cobaltera indicadas en detalle arriba a la izquierda. Mapa modificado de Vivallo et al., 2008 (Sernageomin), zonas de mineralización basados en Geoexploraciones (1983).

Distrito Tambillos

El Distrito Tambillo está localizado a 33 km al sur de la ciudad de La Serena, en la Región de Coquimbo. La mineralización en este distrito incluye depósitos vetiformes del tipo IOCG hospedadas en intrusivos del Cretácico Inferior y rocas subvolcánicas del Cretácico Superior, así como en rocas volcánicas y sedimentarias del Jurásico Superior – Cretácico Inferior (Formación Arqueros; Fig. 4; Díaz et al., 2009). Mineralización IOCG estratiforme también ocurre en la base de

la Formación Arqueros, hospedada en secuencias sedimentarias y volcánicas. Todas estas unidades de roca ocurren principalmente hacia el oeste del Sistema de Faya El Romeral y han sido afectadas por metamorfismo de contacto de alto grado, asociado con el emplazamiento de intrusivos del Cretácico Inferior.

Las minas históricas en el distrito son las minas El Buitre y Minillas, ambos depósitos del tipo manto, hospedados en secuencias sedimentarias y volcánicas estratificadas. La mina El Buitre ha tenido gran desarrollo por la explotación de cobalto. En 1975 tenía tres niveles diferentes, los cuerpos tenían un estimado de cobalto cercano al 1%, y un contenido estimado de 0,46% de Co en pilas remanentes. La mina Las Minillas, inmediatamente al sur de El Buitre, presenta similares características, y en el presente se encuentra en preparación para explotación, apuntando a la mena de cobre oxidado remanente. La única operación minera a mediana escala es la Mina La Florida, cerca de El Buitre, de similares características. Esta mina es explotada por cobre, y la mena es procesada localmente. Potencialmente los relaves tendrían potencial de cobalto.

En el presente no hay datos actualizados en relación con recursos potenciales y leyes de cobalto en reportes de las minas El Buitre, Minilla y Florida. Se sospecha que en las pilas remanentes de minerales antiguos podría existir un potencial de recursos de cobalto con leyes menores al 1%.

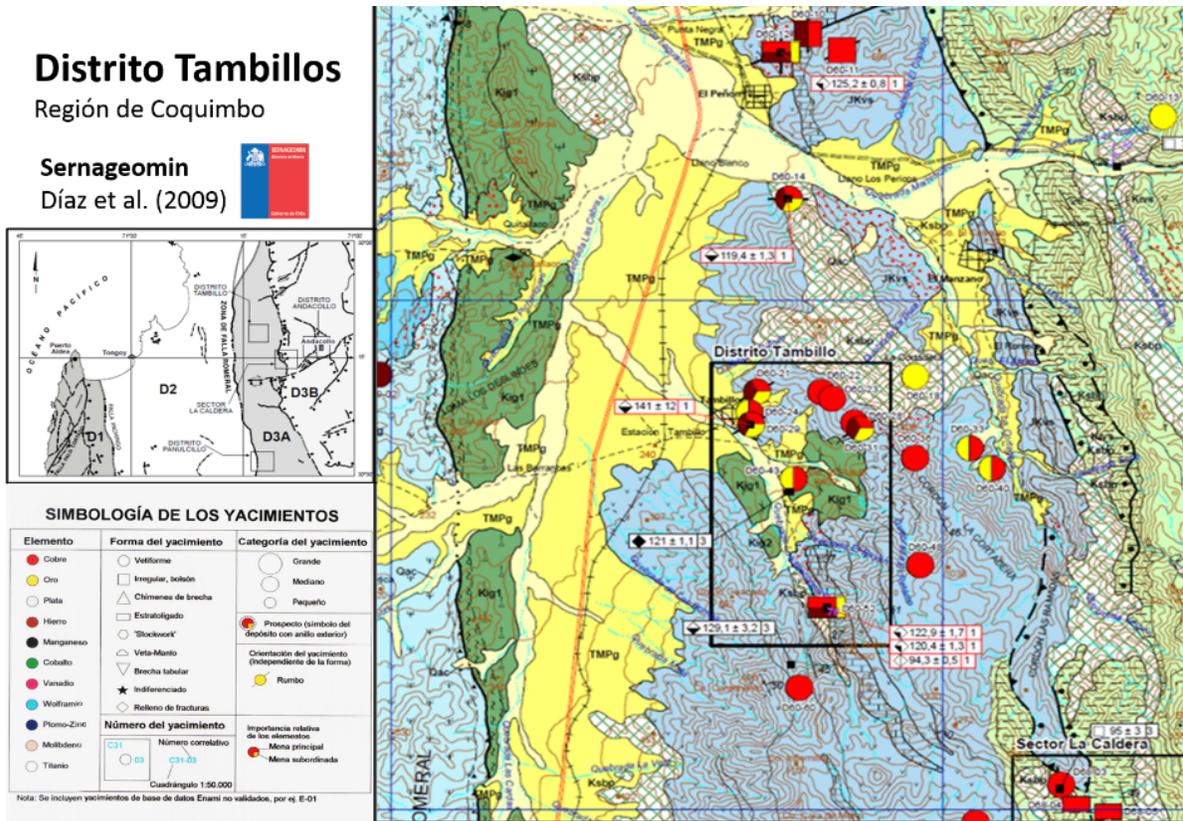


Figura 4. Geología y mineralización del Distrito Tambillos. Mapa modificado de Díaz et al., 2009 (Sernageomin).

En el presente, los depósitos de relave generados por la explotación minera de depósitos estratiformes en este distrito, esto por la Compañía Minera Florida, podrían tener potencial por

cobalto, no determinado aún por los actuales dueños. La exploración minera de depósitos del tipo vetiformes, brechas y mantos se encuentra actualmente en marcha, esto por potencial de cobre y cobalto. Actualmente se está explorando a través de sistemas de túneles y perforación (COMET Exploration).

Exploración minera y potenciales mineros en distritos históricos de producción de cobalto

Recientemente Sernageomin llevó a cabo un muestreo regional de sistemas de mineralización y alteración hidrotermal en las provincias metalogénicas de la cordillera de la costa de las regiones de Atacama y Coquimbo (Lacassie et al., 2016). Los datos geoquímicos fueron procesados y analizados por medio de Redes Neuronales Artificiales (RNA), los resultados se describen a continuación (Fig. 5a y b):

- Depósitos en los cuales se determina una componente fuerte de primer orden de Ni-Co, con un promedio de concentraciones de cobalto alcanzando 1.242 ppm, junto con 200 ppm de Ni, 2,2% de Cu y 585 ppm de Mo. Este grupo de depósitos es marcado en círculos rojos en la figura 5.
- Otros depósitos con un alto grado de señal por cobalto son incluidos en Fe-P, Fe, Ca y La-Ce, tienen señales geoquímicas asociadas con tipos de depósitos IOA e IOCG, así como depósitos de cobre y oro mesotermales, estos hospedados en rocas del Jurásico Superior – Cretácico Inferior.

Los principales distritos de exploración por cobalto permanecen dentro de los históricamente conocidos y descritos previamente, pero se describen otras potenciales áreas por cobalto para un total de seis agrupaciones, mostrados en la figura 5b (Z1 a Z6), algunas de las principales áreas de interés se listan abajo:

- Distrito Sierra Santo Domingo (Z1)
- Distrito Las Ánimas (Z2)
- Distritos Algarrobo – El Roble, Relincho, San Ramón – Zorroquina y Quebrada Seca (Z3)
- Distritos Punta del Cobre y Las Pintadas (Z4)
- Distritos Descubridora de Quebrada Seca, Sierra El Tiuque, Totoral Norte y Quebrada Los Loros, Sierra La Noria y Sierra Algarrobilla (Z5)
- Distrito Carrizal Alto, Astillas, Sierra La Bandera y Quebrada del Medio (Z6)

Conclusiones principales

Dentro de las principales conclusiones de la presente revisión del estado del arte del potencial mineral de Cobalto en Chile, se derivan las siguientes afirmaciones:

- Depósitos de mena principal de cobalto fueron explotados en Chile hasta el año 1942, los históricos distritos conocidos mantienen potencial para minería de mediana escala, siendo estos los distritos de San Juan y en menor medida Carrizal Alto, ambos en la región de Atacama y el distrito Tambillos en la región de Coquimbo.
- Los distritos San Juan y Tambillos son actualmente explorados y explotados por cobre-oro manteniendo un potencial remanente por cobalto, en algunas zonas posiblemente como mena primaria, en otras con un potencial como sub producto de producción de cobre y oro.

- Exploraciones geoquímicas y señales geoquímicas de depósitos claramente indican un potencial de cobalto en la Franja Ferrífera de Chile, a lo largo del cinturón metalogénico del Cretácico Inferior de la cordillera de la costa de las regiones de Atacama y Coquimbo. Depósitos de mena primaria de cobalto dentro de estas provincias están controladas por el Sistema de Fallas de Atacama.
- Dentro de la Franja Ferrífera de Chile depósitos del tipo IOA e IOCG pueden tener potencial por cobalto como un sub producto, como crédito de la minería de hierro y cobre-oro, no evaluado todavía.
- Depósitos de relaves de los depósitos IOA e IOCG podrían ser evaluados por potencial recuperación por cobalto.
- Exploración de depósitos vetiformes y de tipo manto de cobre-oro-cobalto pudieran considerar la Cordillera de los Andes en la parte central y sur central de Chile, a lo largo de la frontera Chile – Argentina, hospedados en rocas volcánicas y sedimentarias mesozoicas de ambientes de tras arco, como actualmente ocurre en la mina Las Merceditas, Región Metropolitana.
- Finalmente, depósitos de pórfidos cupríferos Paleocenos y más jóvenes, pudieran ser considerados para evaluación por cobalto como potencial sub producto, crédito, sumados a otros sub productos existentes.

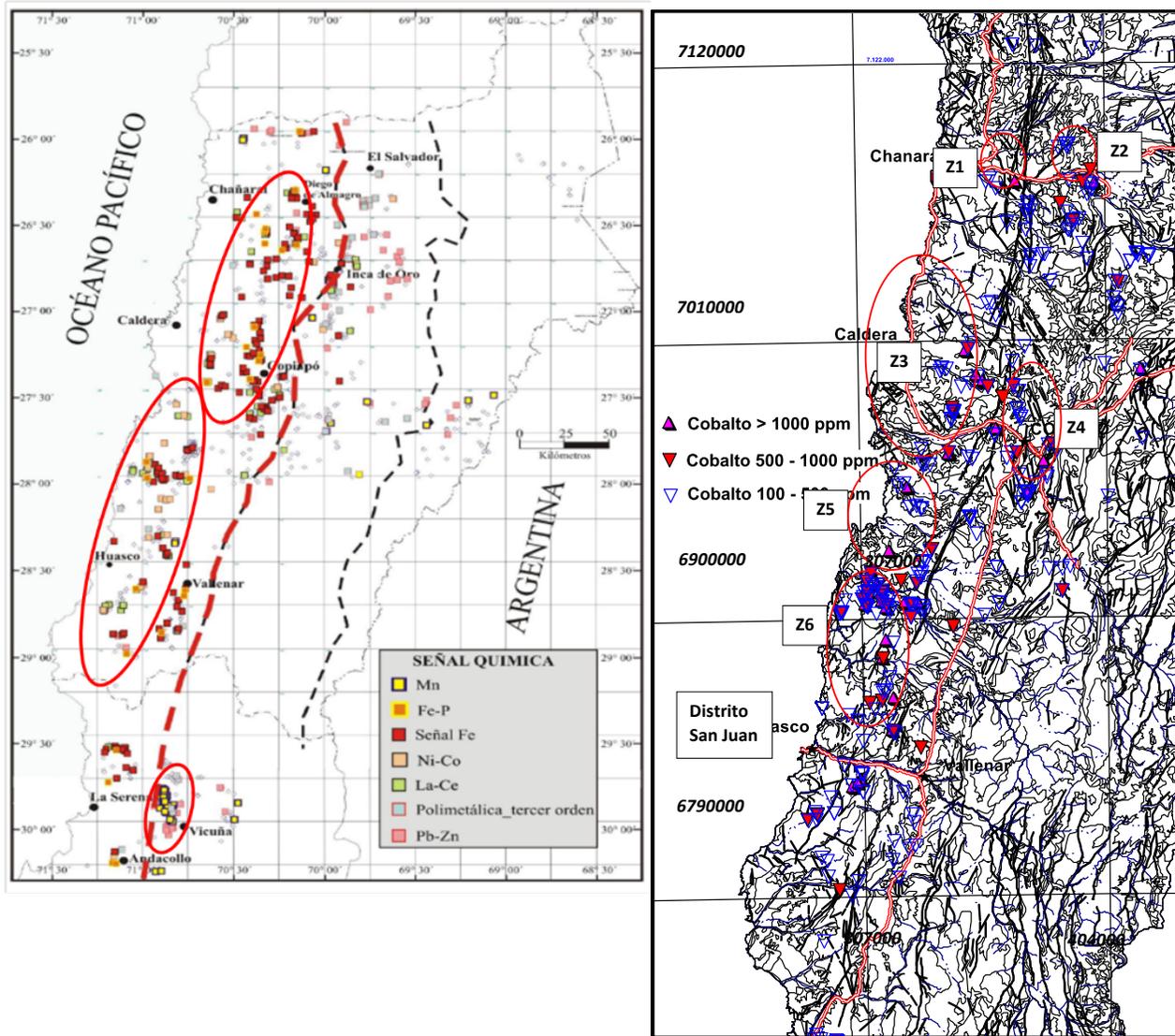


Figura 5. (a) Señal geoquímica basada en Análisis de Redes Neuronales de datos desde muestras tomadas desde minas, afloramientos y otras muestras de mineralización y alteración hidrotermal en la costa de la provincial metalogénica del Cretácico Inferior. (b) Concentraciones de Cobalto y selección de potenciales zonas de exploración de Cobalto en la misma provincia metalogénica (Z1 a Z6). Ambos mapas y estudios geoquímicos en Lacassie et al., 2016 (Sernageomin).



Referencias

- Díaz, A.; Lacassie, J.P.; Vivallo, W. 2009. Yacimientos Metalíferos del área Andacollo- Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Recursos Minerales y Energéticos, N° 31, 28 p., 1 mapa escala 1:100.000.
- INTEC-CHILE. 1988. Adaptación de tecnología para la recuperación de cobalto desde minerales y relaves. Corporación de Fomento (CORFO), 204 p. Santiago.
- 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: 177 p, 1 CD. Santiago.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F. 2007, Metallic ore deposits (Chapter 6). In: The Geology of Chile, T. Moreno, W. Gibbons (eds.), England, p. 181-201.
- Maksaev, V., 2001. Metallogenesis of Chile. Class notes, Department of Geology, University of Chile.
- 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, N° 27, 72 p., 1mapa escala 1: 500.000.