



Modelo Mineralógico de mena para Proyecto Óxidos Encuentro

Sandra González*

AMSA, VPP. Apoquindo 4001, Las Condes, Santiago, Chile.

Karin Quintana, Mauricio Belmar

SGS Minerals S.A., Puerto Santiago #156, Parque Industrial Puerto Santiago, Pudahuel, Santiago, Chile.

Rodrigo Riquelme

Geolnova Consultores Ltda., Antonio Bellet 444, oficina 1301, Providencia, Santiago, Chile

* email: sgonzalez@aminerals.cl

Resumen. El pórfido cuprífero Encuentro está a 33 km al Este de la localidad de Sierra Gorda, II Región de Antofagasta, Chile. Este está bajo una sobrecarga de aproximadamente 130 m de gravas. La zona oxidada está conformada por unidades mineralizadas que fueron separadas por su mineralogía y química: denominadas OXV (óxidos verdes), OXVT (óxidos verdes de transición), Lim-Cu (limonitas con cobre), MX-sec-cc (mixto), y SEC-F (secundario fuerte calcosínico). Para el reconocimiento mineralógico se han utilizado distintas técnicas analíticas; utilizando la tecnología QEMSCAN, se realizó la coestimación de las especies principales portadoras del cobre, atacamita (Ata) y limonitas con cobre (Lim-Cu) y con las leyes de cobre total (CuT) y soluble (CuS).

La problemática de esto, es que la ley estequiométrica subestima la ley química, debido a que el cobre contenido en especies tipo Lim-Cu, copper wad, óxidos de fe, biotitas y cloritas con Cu no es constante, debido a inclusiones, intercambio iónico entre otras causas.

Palabras claves: QEMSCAN, óxidos verdes (OXV), Limonitas con Cu (Lim-Cu), sulfuros relictos.

1 Introducción

El yacimiento de cobre Encuentro está ubicado a 2.320 m.s.n.m. y aproximadamente a 33 kilómetros al Este de la localidad de Sierra Gorda, comuna del mismo nombre, Provincia de Antofagasta, II Región de Antofagasta, Chile. La explotación de los minerales contempla una mina a rajo abierto, luego beneficiarlos con procesos de chancado y lixiviación, generar soluciones de cobre que se envían y procesan en la planta SX-EW de Minera Centinela (MC), en un período comprendido entre los años 2016 y 2023. El estudio de factibilidad confirmó el óptimo de capacidad 10/10 millones de toneladas anuales de alimentación a lixiviación en pilas dinámicas 89,0 Mt @ 0,58% CuT y ROM 43,6 Mt @ 0,31% CuT. Este trabajo muestra la caracterización mineralógica de las zonas lixiviables del proyecto, problemática y metodología usada para el reconocimiento de las zonas con distinta solubilidad y de bajas leyes y el proceso de obtención del modelo mineralógico, culminando con la estimación de las principales especies de cobre mayoritarias, Ata y Lim-Cu.

2 Descripción del yacimiento y zonas minerales supérgenas

El pórfido Encuentro, perteneciente al Distrito Minero Centinela, está cubierto por una columna de gravas post-minerales estériles de hasta 130 m de espesor bajo la cual un enjambre de diques (de 2 a 200 m de ancho) de pórfido dacítico orientados con rumbo NE a ENE e inclinaciones al sur, intruye a una secuencia volcano sedimentaria andesítica asignada a la Formación Quebrada Mala. La geometría del yacimiento presenta una forma ahusada. El depósito alcanza hasta los 1.500 m de largo y 600 m de ancho con un desarrollo de columna mineralizada de más de 1.000 m de profundidad, bajo las gravas. Se encuentra limitado hacia el este por un complejo estéril de intrusivos tardíos y brechas hidrotermales y freatomagmáticas que truncan al sistema (pórfido granodiorítico, brecha de turmalina, domo riódacítico y diatrema) y se orientan en forma subparalela a éste. (Swaneck, et al 2010).

Se han reconocido cinco zonas minerales a partir de su química (Tabla 1 y Fig. 1) y su mineralogía.

% participación	Zona Mineral	Soluble Cianurable Residual			Leyes medias	
		%	%	%	CuT%	RSol
14	LimCu+OXN	10-45	<25	>50	0.33	43
20	OXT	45-70	<25		0.44	62
60	OXV	≥70			0.63	79
3	MX_SEC_cc	25-70	≥50		0.4	29
3	SEC_F	<25	≥50	<50	0.5	21

Tabla 1. Zonas minerales lixiviables, leyes y su participación dentro del pit Fase 4 de explotación.

En la zona de oxidación predominan los clorurados de cobre, los que se distribuyen en vetillas tipo "A" y "B", como resultados del reemplazo de los sulfuros de cobre. Consecuencia de la asociación a las vetillas "A" y "B", los oxidados de cobre se relacionan primordialmente al cuarzo, goethita y hematita, mayormente en contactos de bordes simples, y en menor frecuencia ocluidos en estos minerales de ganga. Muchas veces se aprecia granos libres de oxidados de cobre, producto de la molienda de las vetillas tipo "A", alguna vez rellenas por calcopirita y que

ahora se encuentran totalmente reemplazadas a oxidados de cobre. (Wong, L.2012).

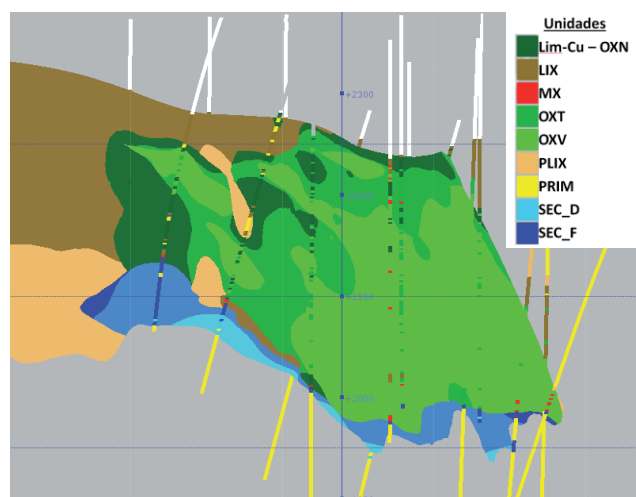


Figura 1. Sección 10, mostrando zonas minerales.

3 Muestras y metodología

Los estudios mineralógicos de las zonas lixiviables anteriormente descritas, datan del año 2009, con la etapa de perfil hasta el cierre de la Factibilidad, (año en curso).

Las técnicas analíticas utilizada para el reconocimiento mineralógico son: información de mapeos, mineralogía de QEMSCAN, DRX, cortes transparentes y pulidos, SEM, CEC (FLSmidth), análisis Químicos de leyes de cobre total (CuT) y cobre soluble en H₂SO₄ (CuS) de muestras de sondajes y análisis secuencial.

La lista SIP de Encuentro se fue modificando en la medida que se reconocieron especies propias del yacimiento; sin embargo, por medio de la tecnología QEMSCAN existe una diferencia significativa entre la ley estequiométrica calculada desde los minerales cuantificados con las leyes químicas (QEMSCAN subestima en un 12% y presenta una correlación entre ambas leyes de 0.84), Fig. 2. Se analizaron estas diferencias con SGS (Belmar, et al 2015) para analizar la posibilidad de ajustar la mineralogía y corregir la subestimación del CuT estequiométrico, finalmente se concluyó que dada la naturaleza intrínseca de los minerales oxidados, inclusiones, intercambio iónico, etc. no aseguran una composición constante de los minerales, por lo que es difícil determinar el contenido final de cobre de la briqueta.

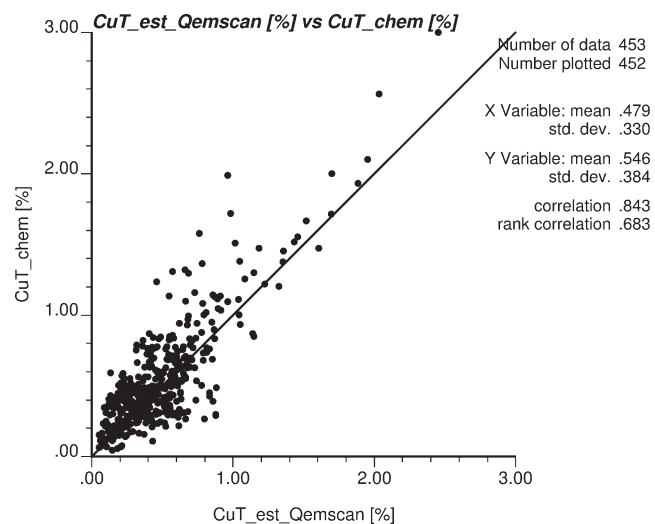


Figura 2. Gráfico de dispersión entre CuT estequiométrico QEMSCAN y CuT químico.

Un total de 453 muestras fueron seleccionadas que representan las 5 unidades geológicas identificadas (Tabla.1). Para cada muestra fue fabricada una briqueta pulida y recubierta de carbono antes del análisis mineralógico en SGS (Centro de Mineralogía Avanzada), Santiago, Chile. Los análisis se realizaron utilizando tecnología QEMSCAN, que se basa en un microscopio electrónico de barrido Zeiss modelo EVO 50, combinado con espectrómetro de energía dispersiva (EDS) modelo Bruker 50/30. Análisis de rutina se realizan con un tamaño de punto de menos de 1 micrón, con una tensión de 25 kV y una corriente del haz de 5 nA. Normalmente se adquieren 1000 conteos por punto analizado lo que da aproximadamente un límite de detección del 2% en peso (%wt) por elemento para cada punto de la clasificación de minerales. Las mediciones se realizaron con iMeasure v5.3.2 y datos reducción utilizando iDiscover v5.3.2. Las muestras se analizaron en el modo de PMA para la validación mineralógica y BMA para el proyecto en general en un tamaño de campo de 1500 micras (magnificación aproximada de 50x) o 2.500 μ (magnificación aproximada de 30x). Los análisis se realizaron en diferentes resoluciones espaciado de píxeles según la granulometría, más comúnmente 10, 5 o 2 micras para determinar la mineralogía modal, así como observar las texturas. Los niveles de electrones retrodispersados se calibraron 0-255 donde cuarzo = 42, Cobre = 130, y el oro = 232, Fig. 3.

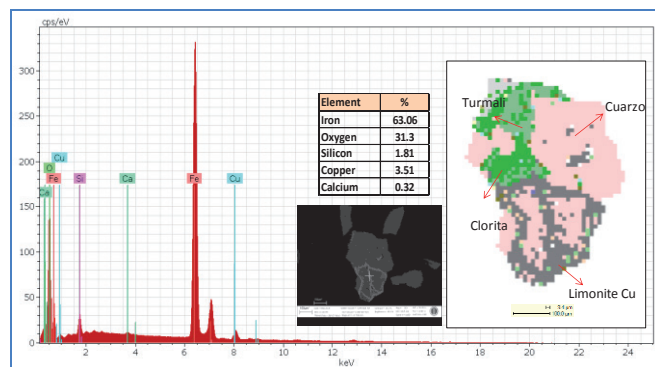


Figura 3. Determinación microquímica de limonitas con Cu donde se observa los peaks de Oxígeno y fierro de la limonita y un peak de Cu indicando contenido de este elemento.

4 Resultados

La atacamita (con su variante paratacamita) es el mineral predominante en la zona de los óxidos verdes.

Hay contenidos de interés de eriochalcita (antofagastita) particularmente en la zona basal de los OXV, pero desafortunadamente no pudo ser detectada por QEMSCAN. Se argumenta que, al ser parcialmente soluble, se pierde en la preparación de la briqueta o alternativamente al recibir el haz de electrones pierde bruscamente sus moléculas de agua siendo entonces erróneamente leída como atacamita. Sólo al mapeo y en DRX es claramente discernible por su excelente cristalinidad. En la parte basal de los OXV hay un horizonte de baja potencia de Cu^o y cuprita. (González, 2015).

La otra especie predominante en la zona de lim-cu-oxn, es Lim-Cu, reconocida con la tecnología QEMSCAN (Fig.3 y 4); esta zona además presenta óxidos de Fe con Cu, clorita y biotita con Cu, y arcillas con Cu, y algo de copper wad. El contenido de Cu en estas especies es muy variable y es la causa que la ley estequiométrica sea distinta a la química. (Holmgren, 2014).

Otra característica importante mineralógica de la zona oxidada es la presencia de sulfuros relictos (Barbagelata, 2014); estos corresponden a calcopiritas, las que se encuentran alojadas en cuarzo y también en turmalina. Además, en algunos casos, la calcopirita está limonitizada, al igual que las piritas. Se han reconocido además vetas de cuarzo con calcopirita-calcosina-molibdenita.

En menor medida, se han reconocido fosfatos, tipo calcosiderita, libethenita y pseudomalaquita, sulfatos tipo languita, spangolita y brochantita, y silicato tipo crisocola.

La zona de enriquecimiento secundario se caracteriza, al igual que la zona de mixtos, por la presencia de calcosina en forma de pátina sobre piritas, junto con calcopirita y bornita. La zona de mixtos además contiene atacamita.

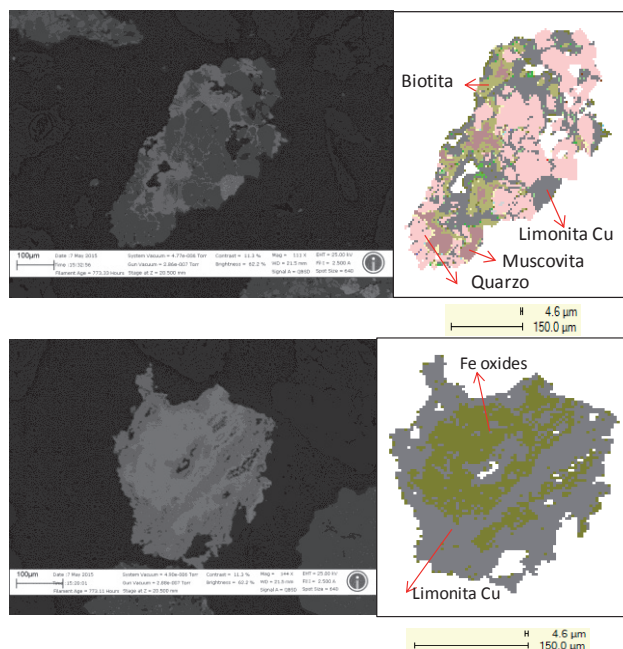


Figura 4. Caracterización de partículas complejas de limonitas con Cobre y otras especies asociadas.

La cinética de extracción de las columnas realizadas presentan una correlación directa con el porcentaje de Ata, por lo que se decidió hacer una estimación de las variables Ata y Lim-Cu que son las mayoritarias en el depósito.

Con la finalidad de aprovechar la alta correlación entre Ata con las leyes de CuT y CuS. (Fig. 5); y dado la mayor cantidad de estas últimas (más de 7000 datos) en comparación con las mediciones de Ata y Lim-Cu (453 análisis de QEMSCAN), se estimó usando cokriging ordinario heterotópico sobre el modelo de bloques (Riquelme, 2015). Esto utiliza la correlación entre las variables y mejora la predicción espacial de las especies minerales, Fig 6.

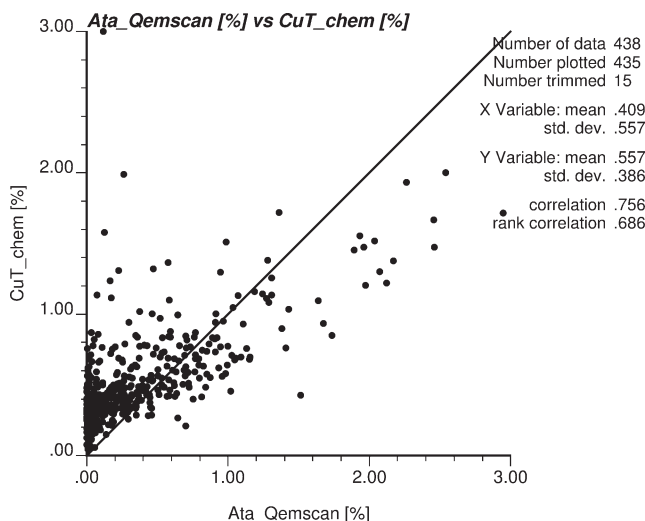


Figura 5. Gráfico de dispersión entre Atacamita QEMSCAN y CuT químico y se muestra la alta correlación entre estas.

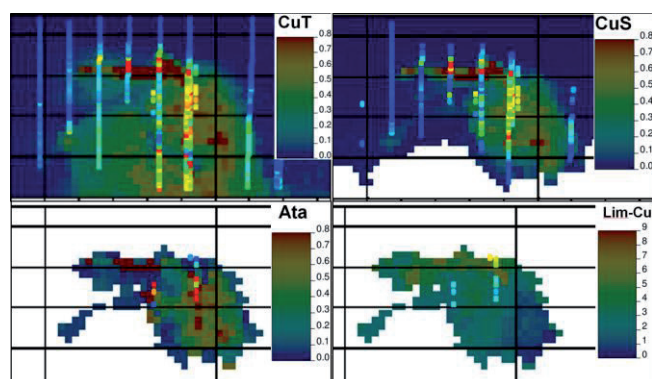


Figura 6. Sección 10, CuT, CuS, Ata y Lim-Cu en sondajes y modelo de bloques coestimados.

5 Discusión y Conclusión

La zona de baja solubilidad denominada Lim-Cu-oxn, presenta una complejidad en cuanto al reconocimiento mineralógico y al cuadrar la ley estequiométrica vs ley química existen diferencias significativas.

Mediante la tecnología QEMSCAN se pudo reconocer y cuantificar especies mineralógicas que contienen Cu en su estructura en proporciones variables, lo que ha incidido en la definición de la lista SIP. Estos son: óxidos de Fe con Cu, clorita y biotita con Cu, y arcillas con Cu, y algo de copper wad, más crisocola. Esta zona es la más refractaria a la lixiviación y presenta la cinética más lenta; y el análisis de los ripios indican que el cobre contenido en estas especies se extrae casi en su totalidad, a excepción del cobre contenido en la Lim-Cu.

El contenido de Ata es directamente proporcional a la cinética de extracción por lo que se realizó una coestimación de las principales minerales: Ata y Lim-Cu en conjunto con las leyes de CuT y CuS, esto pese a que la ley estequiométrica de los QEMSCAN subestima la ley química de CuT.

La caracterización mineralógica debe ser realizada mediante distintos métodos de análisis y caracterización; QEMSCAN, DRX, mapeos y leyes químicas CuT, CuS y análisis secuencial, para encontrar una coherencia entre las distintas fuentes de información. Además se debe considerar las limitaciones en cuanto a precisión y exactitud que tienen los métodos como por ejemplo,

QEMSCAN (0.2% en peso de reportabilidad de especies minerales), y esto sumado a la complejidad mineralógica-composicional que pueden presentar los minerales oxidados.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del equipo de técnicos de preparación de muestras de SGS Minerals SA, que proporcionó los datos de preparación de muestras y elementos traza, a AMSA (Antofagasta Minerals) que autorizó la publicación de este trabajo, al equipo de Geoinnova, con el cual se hizo la estimación, a los mineralogistas Franco Barbagelata y Carmen Holmgren por sus aportes, y a los geólogos de la VPRM que han participado del proyecto.

Referencias

- Barbagelata, F.; Holmgren, C. 2014. Inf97-A. Análisis de sulfuros relictos, zona de OXN-lim-cu (Unpublished).
- Belmar, M; Quintana, K. 2015. Informe de QA/QC, para proyecto Encuentro (Unpublished).
- González, S. 2015. Geometalurgia Óxidos Encuentro (Unpublished). Vicepresidencia de Proyectos, AMSA. (Unpublished).
- Holmgren, C. 2014. DRX y SEM a muestras con arc_cu, OXN y crisocola (Unpublished).
- Riquelme, R. 2015. Estimación de especies oxidadas. Proyecto Encuentro -Óxidos (Unpublished). Vicepresidencia de Proyectos, AMSA.
- Swanek, T.;Torres, L.;Cáceres, C. 2010. Geología y modelamiento geológico del Pórfido Caracoles. (Unpublished). Vicepresidencia de Proyectos, AMSA.
- Wong, L. 2012. Caracterización química-mineralógica de la zona oxidada en El Pórfido Caracoles. Memoria de Título Magister (Unpublished), Universidad Católica del Norte.