

Geología y Geoquímica de Exploración del Sector Quinchamale, Región de Antofagasta, Chile.

Gert Heuser ^{*1,2}, Eduardo Campos ²

1 Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

2 Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

*email: gkheuser@uc.cl

Resumen. El sector Quinchamale, ubicado 80 km al norte de la ciudad de Calama corresponde a una propiedad minera de CODELCO para la exploración de cobre. Presenta zonaciones de minerales de alteración hidrotermal que se asemejan a un sistema tipo pórfido cuprífero. Se realizó un levantamiento geológico escala 1:25.000, en donde resalta un sistema de brechas hidrotermales con matriz de especularita con mineralización en traza de calcopirita-bornita. Además, se realizó un muestreo geoquímico de superficie de las unidades litológicas presentes, definiendo umbrales de exploración de Cu, Mo, Pb, Zn, As, Au y Ag. Se determinaron sectores en donde es posible distinguir una zonación lateral de la distribución de las asociaciones mineralógicas de alteración hidrotermal y una zonación en la distribución de los elementos analizados, lo que se asemejaría a la zonación de un sistema tipo pórfido cuprífero.

Palabras Claves: Pórfido cuprífero, Chimenea de brechas, geoquímica, norte de Chile, índices de correlación de Pearson.

1 Introducción

El sector Quinchamale se encuentra ubicado 80 km al norte de la ciudad de Calama, en la Región de Antofagasta (Fig.1) y dentro de la propiedad minera de CODELCO. El sector se encuentra ubicado dentro de la denominada franja metalogénica Eoceno Superior – Oligoceno, franja donde se encuentran los mayores yacimientos tipo pórfido cuprífero de Chile (Camus, 2003).

El objetivo de este trabajo consiste en determinar si en base a evidencias geológicas, asociaciones mineralógicas de alteración hidrotermal y geoquímica, el sector Quinchamale puede presentar características similares a las de los sistemas tipo pórfido cuprífero. Además determinar si existe una relación genética, espacial y temporal entre las zonas de alteración hidrotermal con la distribución geoquímica de los elementos analizados.

2 Metodología y resultados

Para determinar si las evidencias de alteración hidrotermal del sector Quinchamale presentan zonaciones características de sistemas tipo pórfido cuprífero, se

utilizaron las siguientes metodologías.

2.1 Metodologías

Se caracterizaron las unidades geológicas del sector Quinchamale mediante un levantamiento geológico escala 1:25.000, desarrollando además mapas temáticos de alteración, mineralización, exploración y de distribución geoquímica. En el caso del mapa de exploración, éste corresponde a un mapa integrado de información, tanto de observaciones de terreno como descripciones en lámina delgada y cortes pulidos.

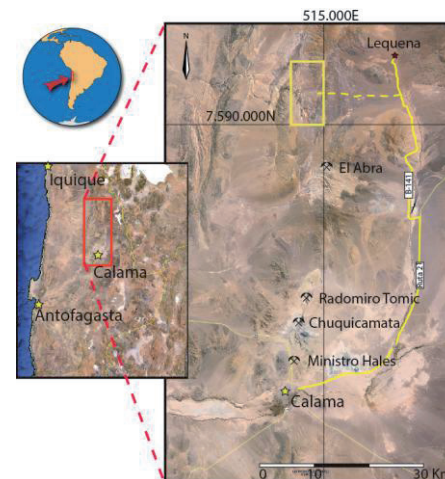


Figura 1. Mapa de ubicación del Sector Quinchamale. Recuadro amarillo destaca la ubicación precisa del sector.

Para determinar umbrales de exploración, es decir, concentraciones que se encuentran sobre el *background* regional; distribuciones geoquímicas y correlaciones entre elementos se recolectaron 147 muestras geoquímicas de superficie las que comprenden a las unidades litológicas reconocidas en el sector. Éstas fueron analizadas mediante el método *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), en donde los elementos analizados corresponden a Cu, Mo, Pb, Zn, As, Au y Ag (Tabla 1). Además los resultados fueron transformados a una base de datos LogNormal para la determinación de *outliers* e índices de correlación de Pearson (correlación lineal entre dos variables).

Tabla 1. Número de mediciones por elemento, límites de

detección de ASS, número de outliers y número de datos utilizado para determinar umbrales.

	Mediciones	límite de detección (ppm)	Bajo límite de detección	Número de outliers	Umbral (n° de datos)
Cu	114	<10	-	8	106
Mo	114	<3	15	2	112
Ag	100	<0,5	64	2	98
Pb	100	<2	-	2	98
Zn	114	<2	-	3	111
As	94	<5	2	2	92
Au	60	<0,005	15	1	59

2.2 Resultados

Del levantamiento geológico se distinguieron unidades litológicas volcánicas e intrusivas de composición ácida a intermedia de edad paleozoica (Tomlinson *et al.*, 2001a), las que corresponden a la Formación Collahuasi y El Complejo Plutónico Cerro Jaspe respectivamente. Además se reconocieron secuencias sedimentarias marinas compuestas de calizas fosilíferas recrystalizadas y secuencias continentales compuestas de conglomerados de grano medio a bloques, ambas secuencias corresponden al miembro inferior de la Formación Quehuita de edad Jurásico Inferior, y a la Formación Tolar (Cretácico Superior) respectivamente. Además, se distinguió secuencias volcánicas y detríticas del Eoceno Inferior y del Eoceno Medio respectivamente, estas unidades corresponden a las Formaciones Icanche y Sichal respectivamente. Las unidades intrusivas corresponden a pórfidos dacíticos y monzodioritas del Eoceno Medio además de cuerpos subvolcánicos menores tales como diques de composición intermedia.

En el sector Quinchamale se identificaron distintas asociaciones de alteración hidrotermal: 1) zona de clorita, clorita-epidota-albita con menor actinolita y trazas de feldespato potásico, 2) zona de alteración cuarzo-sericita, sericitica, 3) zona de silicificación y 4) zona de granate-epidota-esfalerita-magnetita. Estas asociaciones afectan principalmente a las rocas de la Formación Collahuasi, Tolar, Quehuita e Icanche, además de cuerpos intrusivos e intrusivos porfídicos. Destaca un sistema de chimenea de brecha tabular de orientación NS/~90° y de 7 m de potencia, el cual presenta clastos de pórfido de composición dacítica y matriz de especularita y/o cuarzo. Los clastos de la brecha presentan principalmente alteración cuarzo-sericita y silicificación, además de mineralización hipógena de calcopirita-bornita diseminada y calcosina y óxidos de cobre en fracturas con la misma orientación del sistema de brechas. Las rocas jurásicas de la Formación Quehuita presentan recrystalización y evidencias de metasomatismo termal representado por asociaciones progrado tales como granate, piroxeno, anfíbol, wollastonita, y la asociación de retrogrado epidota-sílice, ésta última presenta mineralización de calcopirita.

De la información de 147 muestras geoquímicas de

superficie se caracterizaron las unidades litológicas, las zonas de alteración y zonas de mineralización. De la matriz de correlación de Pearson, Townley *et al.*, (1999) señala que los elementos presentan una buena correlación entre ellos si su índice es > 0,4, mientras que los índices $\geq 0,8$ son considerados como excelente. Para la totalidad de muestras (Tabla 2) destacan correlaciones moderadamente buenas (recuadros verdes) entre Cu-Mo (0,41), Pb-Zn (0,45), por su parte el sistema de chimenea de brechas hidrotermales presenta correlaciones moderadamente buenas entre Cu-Mo (0,44), Cu-Pb (0,60), Cu-Au (0,56), Ag-As (0,67) y Ag-Au (0,79), y excelentes correlaciones (recuadros rojos) entre Cu-Ag (0,95), Cu-As (0,87), Mo-As (0,83), Ag-Pb (0,82), Pb-Zn (0,83), Zn-Au (0,85) (Tabla 3). No obstante, de la Tabla 1 se desprende que en el caso del Ag, esta presenta demasiados valores bajo el límite de detección, por lo que la interpretaciones de sus índices de correlación pueden ser erróneas.

Tabla 2. Índices de Correlación de Pearson para la totalidad de muestras (n=147).

	Ln_Cu	Ln_Mo	Ln_Ag	Ln_Pb	Ln_Zn	Ln_As	Ln_Au
Ln_Cu	1						
Ln_Mo	0,41	1					
Ln_Ag	0,81	0,43	1				
Ln_Pb	0,27	0,20	0,33	1			
Ln_Zn	0,45	0,01	0,37	0,45	1		
Ln_As	0,54	0,42	0,58	0,24	0,43	1	
Ln_Au	0,43	0,43	0,32	0,02	0,35	0,53	1

Tabla 3. Índices de Correlación de Pearson para el sistema de chimenea de brechas hidrotermales (n=3).

	Ln_Cu	Ln_Mo	Ln_Ag	Ln_Pb	Ln_Zn	Ln_As	Ln_Au
Ln_Cu	1						
Ln_Mo	0,44	1					
Ln_Ag	0,95	0,14	1				
Ln_Pb	0,60	-0,46	0,82	1			
Ln_Zn	0,05	-0,88	0,35	0,83	1		
Ln_As	0,87	0,83	0,67	0,12	-0,46	1	
Ln_Au	0,56	-0,50	0,79	1,00	0,85	0,07	1

3 Discusión

Las unidades de roca presentes en el sector Quinchamale, en base a información geocronológica (Tomlinson *et al.*, 2001b) y sus características petrográficas, evidencian que durante el Paleozoico superior-Triásico Inferior existió un intenso volcanismo subaéreo predominantemente ácido acompañado de plutonismo sincrónico (Boric *et al.*, 1990; Marinovic, 2007). En el sector Quinchamale este ciclo está representado por la Formación Collahuasi, y el Complejo Plutónico Cerro Jaspe.

En el Jurásico se desarrollaron cuencas extensionales (Cuenca de Tarapacá) al oriente de la cadena volcánica (Camus, 2003; Charrier *et al.*, 2009), permitiendo la acumulación de secuencias sedimentarias. Durante el Cretácico ocurren inversiones de las cuencas y alzamiento del basamento paleozoico, con la posterior denudación y acumulación de secuencias sedimentarias clásticas

continentales (Tomlinson *et al.*, 2001a; Charrier *et al.*, 2009). Estas condiciones son representadas por las Formaciones Quehuita y Tolar respectivamente. Durante el Cretácico Superior-Eoceno, se desarrolló otro episodio de volcanismo, de composición bimodal y acompañado de denudación (Maksaev, 1978; Marinovic, 2007) representado por la Formación Icanche. Durante la orogenia Incaica (Eoceno), se produce el alzamiento del terreno, dando origen a la cordillera de Domeyko (Maksaev & Zentilli, 1988), y erosión sinorogénica, representada por la Formación Sihal (Oligoceno Superior), además del emplazamiento de unidades porfídicas responsables de mineralización de cobre durante el Eoceno Superior – Oligoceno. A partir del Mioceno, se depositaron en los flancos de la cordillera de Domeyko y depresiones intermontanas (Naranjo & Paskoff, 1980), extensas cubiertas de sedimentos aluvionales (Depósitos de piedemonte), y gravas aluviales no consolidadas.

Las evidencias de alteración hidrotermal en el sector Quinchamale, en base a sus asociaciones paragenéticas y contexto geológico, pueden ser separadas en dos tipos: 1) tipo skarn, 2) pórfido cuprífero-chimenea de brecha genéticamente asociados.

Las rocas calcáreas de la Formación Quehuita son alteradas y recristalizadas por efecto del metasomatismo termal asociado al emplazamiento de pequeños stocks dioríticos de edad Eoceno Medio. Esto permitió el desarrollo de un exoskarn, y exhibe como minerales de progrado anfíbola, wollastonita, piroxeno y granate, lo que señala un rango de temperatura entre 300 a 600°C (Einaudi & Burt, 1982; Meinert, 1993; González-Partida *et al.*, 2004; Lanfranchini, 2004; Pérez-Segura & González-Partida, 2010), una baja actividad del oxígeno (Meinert, 1993; Kojima, 2007). Además se infiere un segundo episodio el cual adiciona aguas presumiblemente meteóricas a los fluidos termales, esto tiene como efecto el enfriamiento y retrogradación del sistema. Por su parte diversos autores señalan que el skarn retrogradante se forma entre 300° y 450°C (Einaudi *et al.*, 1981; Meinert, 1993 en Pérez-Segura & González-Partida, 2010), por lo tanto, en base a que la mineralización de calcopirita se encuentra asociada a estas asociaciones paragenéticas retrogradadas (epidota-sílice), se esperaría que las fases metálicas hayan precipitado en este rango de temperatura.

Por su parte, sistemas de pórfido-chimenea de brechas se presentan en diversos yacimientos de la franja metalogénica Eoceno Superior-Oligoceno. En el norte de Chile, por ejemplo, se encuentra el yacimiento Quetena, Copucha, Spence, y Centinela. Más al sur se encuentran Pelambres, Los Bronces y El Teniente. Los sistemas de chimenea de brechas se encuentran genéticamente asociados a intrusiones de pórfidos (Sillitoe & Sawkins, 1971; Sillitoe, 1985), además se ha caracterizado la ocurrencia de su mineralogía de mena y alteración, y su distribución espacial y las condiciones necesarias para la formación de un sistema tipo chimenea de brechas. En

donde se distingue que las chimeneas de brecha se encuentran en la parte superior de sistemas porfídicos. La mineralogía de las brechas varía en las porciones profunda de biotita-magnetita a turmalina en zonas más someras (Sillitoe & Sawkins, 1971; Sillitoe, 1973; Sillitoe, 1985; Skewes & Holgrem, 1993), no obstante, en estos yacimientos solo se ha reportado especularita de manera local. En adición a la composición de los clastos que componen el sistema de chimenea de brechas (pórfido dacítico), las evidencias de alteración cuarzo-sericita asociada espacialmente, se desprende que este patrón concuerda con la etapa de desarrollo de chimeneas de brecha (Tosdal y Richards, 2001).

De los índices de correlación de Pearson obtenidos para el sistema de chimenea de brecha, se desprenden asociaciones similares a las descritas por Jones, (1992) para los sistemas tipo pórfido cuprífero, en donde el Cu muestra afinidad con el Mo, y hacia la periferia, es decir, hacia los halos de alteración propilítica, disminuye la concentración de cobre y aumenta la concentración en Pb y Zn. Estos elementos presentan una correlación excelente (0,83), lo que señala que su comportamiento y distribución se asemeja al esperado para un sistema tipo pórfido cuprífero.

4 Conclusiones

El sector Quinchamale se reconoció 15 unidades litológicas entre estratificadas e intrusivas que abarcan desde el Paleozoico al Holoceno.

En el área de estudio destacan dos sectores con evidencias de mineralización de sulfuros de cobre. El primero de ellos corresponde a bandas de orientación norte-sur compuestas de brecha hidrotermal con matriz de especularita, mientras que el segundo se encuentra en las calizas de la Formación Quehuita.

Las anomalías positivas de Zn y Pb en general no coinciden espacialmente con las anomalías positivas de Cu (Tabla 2), lo que se asemeja al esquema típico que se espera para un sistema tipo pórfido cuprífero, en adición, esta observación no se cumple en el sector con mineralización tipo skarn, lo que es coherente con los resultados.

Los elementos analizados se presentan mayoritariamente en bajas concentraciones. No obstante, en los sectores descritos con anterioridad (chimenea de brecha, skarn) se observan valores sobre el umbral de exploración definido, de este modo, la mineralización tipo skarn presenta anomalía en todos los elementos analizados, lo que confirma que la distribución de estos elementos no coincide con una distribución esperada para un sistema tipo pórfido cuprífero (Lowell y Guilbert, 1970; Jones 1992) y se encuentra representada por minerales de mena y

ganga tales como esfalerita (Zn), tenantita (As), sulfuros de cobre y posiblemente sulfosales de plomo.

Por su parte los sectores donde aflora el sistema de chimenea de brecha, se caracterizan en el caso del cobre por valores localmente sobre el umbral de exploración y bajas concentraciones de plomo y zinc, estos valores están representados por mineralización en traza de calcopirita-bornita, dicho sistema de brechas podría estar relacionado genéticamente con el emplazamiento de un pórfido dacítico en base a que en los contactos de esta unidad con rocas de la Formación Quehuita se observó una incipiente brechización de especularita en la roca de caja, además la presencia de clastos de dicho pórfido en los afloramientos de brechas hidrotermales señalarían una relación genética.

Agradecimientos

El presente trabajo se desarrolló en el marco del programa de memoria de título del primer autor, el cual agradece en primer lugar a EMSA – CODELCO, por el apoyo durante el desarrollo del tema. También a los académicos Dres. Eduardo Campos, Shoji Kojima, Andrew Meinze y a la académica Dra. Gloria Arancibia, por sus contribuciones al desarrollo de la investigación y observaciones, las cuales ayudaron enormemente a mejorar el manuscrito.

Referencias

- Boric, R.; Díaz, F.; Maksaev, V. 1990. Geología y Yacimientos Metalíferos de la Región de Antofagasta. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín*, No. 40, 246 p., 2 mapas escala 1:500.000.
- Camus, F. 2003. Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile. *Sernageomin, Santiago, Chile*, 267 p.
- Charrier, R., Fariás, M., Maksaev, V., 2009. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el cenozoico en los andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (1): 5 – 35.
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D., Newberry, R. J., 1981. Skarn deposits: *ECON. GEOL.*, 75TH ANN. VOL., p. 317-391.
- Einaudi, M. T., Burt, D.M., 1982. A special issue devoted to skarn deposits: Introduction, terminology, classification, and composition of skarn deposits. *Economic Geology*, v. 77, pp. 745-754.
- González-Partida, E., Camprubi, A., Levresse, J. T., Carrilo-Chávez, A., 2004. Fluidos asociados al skarn Au(-Cu) de La Joya, distrito de Mezcala, Guerrero, México: implicaciones regionales para depósitos formados a partir de rocas calcoalcalinas vs. adakíticas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 21, núm. 3, 2004, p. 371-381.
- Kojima, S., 2007. Apuntes del curso Depósitos Minerales I. Universidad Católica del Norte.
- Lanfranchini, M. E., 2004. Caracterización geológica del skarn “El Abuelo” Alto Río Senguerr, Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (4): 685-692.
- Maksaev, V. 1978. Cuadrángulo Chitigua y sector occidental de Cuadrángulo Cerro Palpana, Región de Antofagasta. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile* 31, 50 p.
- Maksaev, V., Zentilli, M., 1988. Marco metalogénico regional de los megadepósitos de tipo pórfido cuprífero del Norte Grande de Chile. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 5, Actas, vol. 1, p.B181-B182. Santiago.
- Marinovic, N. 2007. Carta Oficina Domeyko, Región de Antofagasta. *Sernageomin, Carta Geológica de Chile, N°105, escala 1:100.000*, 41 p.
- Meinert, L. D., 1993. Skarn and skarn deposits. *Geoscience Canada*. v. 19, No 14.
- Naranjo, J., Paskoff, R., 1980. Evolución geomorfológica del desierto de Atacama entre los 26° y 33° latitud sur: revisión cronológica.
- Pérez-Segura, E., González-Partida, E., 2010. Mineralogía de skarn y fluidos asociados a los yacimientos de Cu-Zn-Ni-Co de La Esperanza, Sonora, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 27, p. 1-17.
- Sillitoe, R.H.; Sawkins, F.J. 1971. Geologic, mineralogic and fluid inclusion studies relating to the origin of copper bearing tourmaline breccia pipes, Chile. *Economic Geology*, Vol. 66, p. 1028-1041.
- Sillitoe, R. H. 1973 Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology*, Vol. 68, No. 1, p. 1-10.
- Sillitoe, R.H. 1985. Ore-related breccias in volcano-plutonic arcs. In a special issue devoted to breccia-hosted ores (Sawkins, F.J. et al.; editors). *Economic Geology*, Vol. 80, No. 6, p. 1467-1514.
- Skewes, M.A.; Holgrem, C. 1993. Solevantamiento andino, erosión y emplazamiento de brechas mineralizadas en el depósito de cobre porfírico Los Bronces, Chile, Chile Central 33°S: aplicación de geotermometría de inclusiones fluidas. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 20, No. 1, p. 71-83.
- Tomlinson, A.J., Blanco, N., Maksaev, V., Dilles, J.H., Grunder, A., Ladino, M., 2001a. Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20°30’-22°30’ S). Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). Informe registrado IR-01-20, 20 mapas escala 1:50.000, 444 p. Santiago.
- Tomlinson, A.J., Martin, M.W., Blanco, N., Pérez de Arce, C., 2001b. U-Pb and K-Ar geochronology from the Cerro Empexa formation, 1st and 2nd regions, Precordillera northern Chile. *Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones*, No. 52, 169 p.
- Tosdal, R. M., Richards, J.P., 2001. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu+/Mo+/-Au deposits. *Reviews in Economic Geology*, vol. 14, p. 157-181.
- Townley, B.; Maksaev, V.; Palacios, C.; Lahsen, A.; Parada, M. 1999. Base and precious metals geochemistry of rock units of the mainland Aysén region, Chilean Patagonia. *Journal of Geochemical Exploration*, N° 68, pp. 21-46.