

## ESTUDIO DE LA MINERALOGÍA E INCLUSIONES FLUIDAS DEL DEPÓSITO DE Zn-Pb-Ag DE PATRICIA (PAGUANTA, NE DE CHILE)

Dario Chinchilla Benavides<sup>1</sup>, Andrea Carolina Rodríguez Pinzón<sup>1</sup>, Lorena Ortega Menor<sup>1</sup>, Rubén Piña García<sup>1</sup>, Cecilio Quesada Ochoa<sup>2</sup>, Antonio Valverde<sup>3</sup>, Rosario Lunar<sup>1</sup>.

(1)Departamento de Cristalografía y Mineralogía. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. C/José Antonio Novais, s/n. 28040, Madrid (España)

(2) Instituto Geológico y Minero de España (IGME), c/Río Rosas, 23. 28003, Madrid (España)

(3)Herencia Resources Plc. Cia Minera Paguanta. C/Burgos, 80. Las Condes. Santiago de Chile (Chile)

### Resumen

La mineralización de Zn-Pb-Ag de Patricia fue identificada por la compañía Herencia Resources en 2006, durante una exploración regional sobre indicios mineros antiguos en la región de Tarapacá (Chile). Se trata de un yacimiento hidrotermal situado en la precordillera de los Andes, en el extremo norte del Cinturón Oligoceno de Pórfidos. La mineralización se presenta en forma de vetas E-O, entendiendo veta como una estructura (fractura, falla) que ha sido mineralizada, con desarrollo de estructuras en *stockwork* y vetiformes, que desarrolla importantes zonas de alteración. La mineralogía de detalle consiste en: pirita, esfalerita (con un % en peso entre 5.48% y 10.89% de Fe), arsenopirita, galena, calcopirita y sulfosales de Ag. Estas últimas aparecen formando series de solución sólida con variaciones importantes en el % peso de Ag, que van desde fases de ~70% Ag, correspondientes a polibasita y/o estefanita y fases de ~25% Ag correspondientes a la serie freibergita – argentotennantita. La presencia de la Ag esta ligada a la presencia de galena, pero no esta albergada dentro de su estructura, sino formando minerales propios. La composición de la esfalerita indica que habría precipitado a partir de un fluido con valores de log aS<sub>2</sub> entre -12 y -12,8 y log aO<sub>2</sub> menor de -36. Por otro lado, el estudio de inclusiones fluidas primarias llevado a cabo en cristales prismáticos de cuarzo en las vetas mineralizadas indica que los metales han sido transportados probablemente en forma de complejos clorurados, en un fluido con una salinidad moderada (11-17,8% NaCl) y temperatura entre 180° y 200°C.

Palabras clave: sulfosales de Ag-Cu-Sb, inclusiones fluidas, hidrotermal, Chile.

### INTRODUCCIÓN

La evolución geológica de Chile ha dado lugar a la formación de un elevado número de yacimientos minerales metálicos de gran extensión y alto grado. Los depósitos de mayor importancia económica son los pórfidos de cobre-molibdeno. En la cordillera Chilena se encuentran 9 de los 16 pórfidos más grandes del cinturón circum-Pacífico, como por ejemplo El Teniente, Río Blanco-Los Bronces y Chuquicamata (Camus et al. 2001). En segundo lugar de importancia económica se encuentran los depósitos epitermales de metales preciosos y de metales de base, siendo los epitermales de plata los de mayor importancia global (Camprubí et al. 2006). Recientemente, se ha descubierto una nueva mineralización hidrotermal polimetálica de Zn-Pb-Ag (Proyecto Paguanta), en la región de Tarapacá, NE de Chile. Este proyecto se localiza a unos 150 km al NE de la ciudad de Iquique (Fig. 1) y a unos 30km de Colchane, en la frontera con Bolivia, en el límite entre la Precordillera y la Cordillera Oeste de los Andes (coordenadas UTM – (WGS84): 19K 494300 E – 7809300 S). En este trabajo se presentan los resultados mineralógicos y de inclusiones fluidas obtenidos en la primera fase de investigación del depósito de Zn-Pb-Ag de Patricia, que forma parte del proyecto Paguanta.

### CONTEXTO GEOLOGICO

El borde andino debe sus características metalogénicas a su evolución tectónica, ya que allí se dieron las condiciones magmáticas y estructurales adecuadas para la circulación de magmas y fluidos hidrotermales, y consecuentemente la formación de depósitos metalíferos. Los Andes son un ejemplo típico de una cordillera desarrollada a lo largo de un margen de placas convergente. Su evolución geológica se caracteriza por el desarrollo de sucesivos arcos magmáticos en dirección N-S sobre el margen activo continental. Los focos del arco magmático migraron progresivamente tierra adentro tras diversas etapas de deformación compresiva asociados al adelgazamiento de la corteza y cambios en el ángulo de subducción de la placa Nazca. La abundancia de rocas calcoalcalinas es una característica

distintiva de los Andes chilenos. Los depósitos metálicos son generalmente de origen hidrotermal, y tienen una relación inherente y temporal con la actividad magmática relacionada a los arcos (Maksaev et al. 2007).

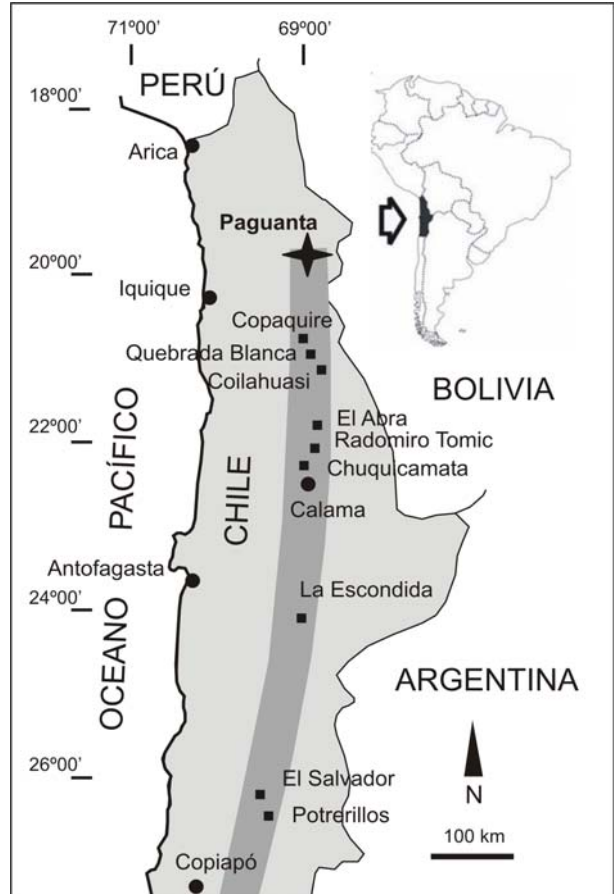
El proyecto de exploración Paguanta está situado en el extremo norte del Cinturón Oligoceno de Pórfidos Cupríferos de Chile (Fig. 1), que incluye yacimientos de categoría mundial (Camus et al., 2001 y Behn et al., 2001). Este cinturón de pórfidos está controlado estructuralmente por el sistema de fallas de Domeyko (Behn et al., 2001), de orientación N-S, cinemática transpresiva sinistral y que desarrolla importantes zonas de extensión, apertura y relleno (cuencas pull-apart).

Las litologías que constituyen la Precordillera de los Andes en la zona de Paguanta comprenden secuencias de rocas volcánicas intermedias y ácidas, principalmente andesitas (piroclastos, cenizas y lavas) de edad Cretácico superior a Terciario Medio, recubiertas discordantemente por ignimbritas de edades Mioceno a Cuaternario (Bouzari et al., 2002). El basamento regional lo forman rocas volcánicas y sedimentarias de edad Paleozoica - Mesozoica con fuerte plegamiento y fracturación.

El proyecto Paguanta consta de tres zonas principales:

- Patricia: está situada al sur del proyecto y comprende la zona más explorada y con mayor interés económico. Se trata de una mineralización hidrotermal de sulfuros de Zn-Pb-Ag, que se desarrolla en forma de vetas mineralizadas de orientación E-W.
- La Rosa: situada al NNO de Patricia, abarca más de 3 km<sup>2</sup> y presenta una intensa alteración argílica. Hasta el momento se ha identificado mineralización de óxidos de cobre, pirita y oxihidróxidos de Fe.
- Doris: situada al NNE de Patricia, se caracteriza por la presencia de fracturas con minerales secundarios de cobre (crisocola y atacamita).

La mineralización de Patricia fue identificada en 2006 durante las primeras fases de exploración llevadas a cabo en la zona por Herencia Resources Plc. sobre indicios mineros del s. XIX. Estas antiguas labores se centraban en la búsqueda de plata y se han llegado a contabilizar hasta 1800m de galerías subterráneas; una de ellas de 400m de longitud, intersecta tres zonas de vetas con abundante mineralización. La actividad cesó a finales del s. XIX quedando abandonada la zona hasta la fecha. Actualmente se están llevando a cabo los estudios geológicos y mineros (metalúrgicos, mineralúrgicos, reservas, geotécnicos...) necesarios para poner en marcha la explotación del yacimiento. Se estima que las actividades de explotación y producción comenzarán a finales de 2014.



**Figura 1.** Mapa esquemático mostrando la posición de Paguanta con respecto al Cinturón Oligoceno de Pórfidos Cupríferos de Chile. Modificado de Camus (2003).

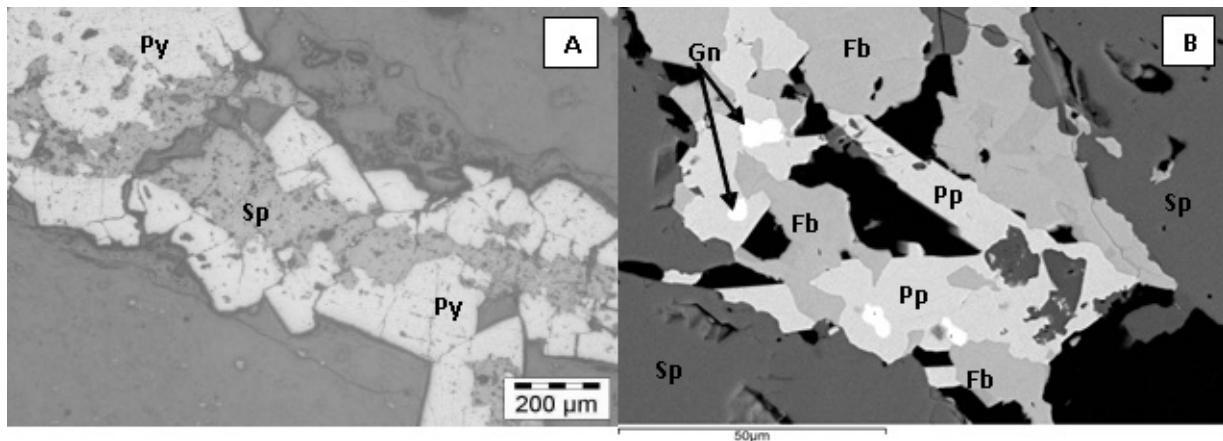
## RESULTADOS

La mineralización de Zn-Pb-Ag de Patricia comprende cuatro sistemas de vetas principales, de orientación general E-O a ENE-OSO, denominadas de N – S: Campamento, Central, Catedral y Carlos. El término veta, en este caso, se refiere a la zona que posee una intensa mineralización, con gran desarrollo de estructuras en stockwork. La veta Catedral es la de mayor espesor, oscila desde 2 a 3 m en los extremos hasta 10 a 15 m en la zona principal con morfología irregular y zonas mineralizadas de hasta 100 m de espesor. Por su parte la veta Central alcanza espesores máximos de hasta 8 m. La veta Campamento varía de orientación con ligeros cambios al NE y su espesor abarca desde 0,5 m hasta casi 2 a 3 m. en su parte central. La veta Carlos tiene espesores variables desde 1 m hasta 4 m y se sitúa inmediatamente al sur de Catedral y paralela a ella. Además se han identificado otras vetas secundarias al sur de las principales que actualmente se encuentran en fase de exploración.

Las vetas están encajadas en rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición andesítica predominante y textura brechoide, con clastos de tamaño variable. Estas rocas están afectadas por una alteración propilítica regional y intensa alteración hidrotermal pervasiva de carácter fílico en el entorno de las vetas mineralizadas, donde apenas se reconocen las texturas originales de la roca. Los minerales de alteración, identificados mediante DRX en Agregados Orientados y mediante microscopía electrónica (SEM), son clorita, illita y caolinita. También se observan diseminaciones de arsenopirita y pirita en las rocas encajantes. Localmente se ha observado silicificación.

La paragénesis de sulfuros que rellena las vetas comprende, en orden de abundancia, pirita, esfalerita (con un contenido en Fe entre 5.48% y 10.89% en peso, equivalente a 9.8% y 19% molar de FeS, y 0,52% en peso de Cd), galena, arsenopirita, calcopirita y diferentes fases de sulfosales de Ag. Las vetas muestran una estructura interna bandeada, con pirita en los bordes y esfalerita en el centro (Fig. 2.A).

La Ag aparece en forma de sulfosales de Ag-Cu-Sb y se dividen en dos grupos según su % en peso de Ag: fases con un contenido ~70% Ag, correspondientes a polibasita y/o estefanita y fases con ~25% Ag correspondientes a la serie freibergita –argentotennantita (Fig. 2.B) (Chinchilla et al., 2012). En las zonas de la mineralización donde el % de minerales de plata es alto suelen aparecer fases de los dos grupos anteriores. Por el contrario, cuando los minerales de plata son escasos la única fase que se observa es la freibergita. Las fases de Ag aparecen comúnmente asociadas a galena y calcopirita, rellenando huecos entre granos de esfalerita (Fig. 2.B) y, en menor medida, entre cristales de pirita.



**Figura 2. A.** Fotografía de Microscopio de Luz Reflejada. Veta rellena de esfalerita (Sp) en el centro y pirita (Py) en los bordes. **B.** Microfotografías de SEM. Freibergita (Fb), polibasita (Pp) y galena (Gn) rellenando huecos entre cristales de esfalerita (Sp).

La mineralogía de la ganga está constituida por cuarzo y carbonatos identificados mediante DRX como kutnohorita ( $\text{Ca}(\text{Mn},\text{Mg},\text{Fe})(\text{CO}_3)_2$ ).

El estudio de inclusiones fluidas se ha llevado a cabo en una veta mineralizada formada por cuarzo microcristalino rodeando a un nódulo de sulfuros que grada a cuarzo en cristales prismáticos zonados con tamaños que varían desde 200µm a 2 mm. Las inclusiones estudiadas son primarias bifásicas, y se distribuyen desde el centro a los bordes en las caras de crecimiento de un cristal de cuarzo prismático. Esto significa que las inclusiones seleccionadas representan al fluido que circulaba por las fracturas cuando precipitó la mineralización (Rodríguez Pinzón, 2012).

Durante el proceso de enfriamiento se observa la nucleación de hielo + hidrohalita entre -40°C a -46°C. La presencia de hidrohalita se ha confirmado realizando cuatro ciclos de enfriamiento-calentamiento entre -25°C y -20°C. La temperatura de fusión obtenida para la hidrohalita ha sido de -21,3°C, que corresponde aproximadamente a la temperatura eutéctica del sistema H<sub>2</sub>O-NaCl. La temperatura de fusión del hielo se encuentra entre -3,4°C y -14°C, con un valor modal de -13°C. La temperatura de homogenización obtenida se encuentra entre 140°C y 240°C. Sin embargo el 44% de las inclusiones fluidas homogeniza entre los 180°C y 200°C.

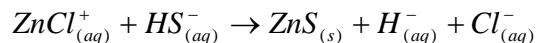
## CONCLUSIONES

El halo de alteración en torno a las vetas mineralizadas está caracterizado por illita y caolinita, minerales formados típicamente por fluidos con un pH inferior a 6 (muy ligeramente ácido a ligeramente ácido). Este halo está superpuesto a la alteración propilítica regional previa, de carácter neutro. La presencia de carbonatos en vetas que cortan las alteraciones anteriores indica que las condiciones variaron al final del proceso hacia pH neutro-alcalino.

La paragénesis tiene carácter polimetálico, con pirita, esfalerita y galena como sulfuros principales. La plata aparece sólo formando minerales propios (freibergita, argento-tennantita, polibasita, estefanita), no habiéndose identificado galena argentífera. Las fases de ~25% Ag son las más comunes en el depósito, siendo las fases más ricas en Ag (~70%) menos abundante, apareciendo solo en zonas con un % alto de minerales argentíferos.

A partir de estos datos de inclusiones fluidas se puede determinar que el fluido mineralizador tuvo una salinidad entre 11% y el 17.8% eq. en peso de NaCl y una temperatura mínima de circulación entre 180° y 200°C. Al ser un sistema abierto, con un régimen de presión hidrostático, en un ambiente extensional, la temperatura de homogenización obtenida se puede aproximar a la temperatura real de circulación de los fluidos. Respecto a la composición del fluido, las salinidades promedio de las soluciones en depósitos de Au-Ag son comúnmente inferiores al 5% eq. de NaCl y entre el 10-20% eq. NaCl para depósitos de Ag-Pb-Zn (Simmons et al. 2005 y Hedenquist et al. 1994). De acuerdo a esto, los resultados obtenidos en esta investigación son típicos de depósitos polimetálicos con Ag. La mayor salinidad de los fluidos en depósitos Pb-Zn-Ag favorece que estos metales sean transportados como complejos clorurados mientras que en los de Au-Ag es más común el transporte de estos metales preciosos como complejos sulfurados, (Hedenquist et al. 1994).

Dada la alta salinidad obtenida en las inclusiones fluidas estudiadas se puede inferir que los metales de la mineralización de Patricia han sido transportados como complejos clorurados, por lo que la esfalerita habría precipitado siguiendo la reacción:



En cuanto a las condiciones de actividad de azufre y oxígeno del fluido, se pueden deducir de la composición de los sulfuros. Según Barton et al. (1977), la sustitución de Fe por Zn en la esfalerita es común dando lugar a extensas soluciones sólidas, cuya composición es indicativa de la fugacidad de azufre del sistema. Las menas de esfalerita comúnmente contienen hasta 24% moles de Fe) aunque se han reportado casos de hasta 56% moles de FeS reemplazando ZnS, según, Pattrick et al (1998). Los cristales de esfalerita analizados en Patricia presentan cantidades entre el 9.8% y el 19% molar de FeS, por lo que su composición estaría en el rango normal de sustitución de Zn por Fe. Según el diagrama de log aS<sub>2</sub> Vs. log aO<sub>2</sub> (Barton et al. 1977), la esfalerita habría precipitado a partir de un fluido con valores de log aS<sub>2</sub> aproximados entre -12 y -12,8 y log aO<sub>2</sub> menor de -36. Por otra parte, la zonación en esfalerita y

en arsenopirita refleja que el fluido tuvo variaciones composicionales durante el proceso de mineralización.

Las anteriores características permiten hacer una clasificación preliminar de la mineralización de Zn-Pb-Ag de Patricia como un depósito epitermal de sulfuración baja a intermedia.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la empresa Herencia Resources Plc. y a todo su equipo por todas las facilidades dadas para la realización de las campañas de campo y la realización del muestreo en Paguanta, mostrándonos siempre su total colaboración y disponibilidad en todo momento.

## **REFERENCIAS**

Behn, G., Camus, F., Carrasco P., 2001. Aeromagnetic Signature of Porphyry Copper Systems in Northern Chile and Its Geologic Implications. *Economic Geology*. 96, 239–248.

Barton P.B, Bethke, P.M., y Roedder, E., 1977. Environment of ore deposition in the Creed mining district, San Juan Mountains, Colorado, Part III, Progress towards interpretation of chemistry of the ore-forming fluid for the OH vein. *Economic Geology*, V 72, p. 1-25.

Bouzari, F., Clark, Alan H. 2002. Ore body of the Cerro Colorado Porphyry Copper Deposit, I Region, Northern Chile. *Economic Geology*. 97, 1701–1740

Camus, F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago de Chile, 267 p.

Camus, F. & Dilles, J.H. 2001. A Special Issue Devoted to Porphyry Copper Deposits of Northern Chile. Preface *Economic Geology*. 96, 233–238.

Chinchilla D., Piña R., Merinero R., Ortega L., Quesada C., Valverde A. y Luna R., 2012. Estudio mineralógico del depósito de Zn-Pb-Ag de Patricia (Paguanta, NE de Chile). *Revista Macla* N° 16.

Hedenquist, J.W. y Lowenstern, J.B., 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits: *Nature*, V. 370, p. 519-527.

Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C. y Camus, F., 2007. Metallic ore deposits. En: Moreno T. y Gibbons, W. (eds) *The Geology of Chile*. The Geological Society. London, p. 179-199.

Patrick, R.A.D., Mosselmans, J.F.W., y Charnock, J.M., 1998. An X-ray absorption study of doped sphalerites. *European Journal of Mineralogy*, 10, p. 239–249.

Rodríguez Pinzón A., 2012. Caracterización mineralógica de testigos de sondeos en el depósito de Zn-Pb-Ag de Patricia, proyecto Paguanta, NE Chile (Trabajo de Fin de Master).