

## GENESIS DE LOS YACIMIENTOS DE COBRE TIPO SKARN EN EL DISTRITO MINERO DE SAN ANTONIO Y EL YACIMIENTO PAMULCILLO, IV REGION, CHILE

Ricardo José Ardila Macias

Doctorado

En el Distrito Minero de San Antonio, localizado a 24 km al NE de la ciudad de La Serena, IV Región de Chile, se encuentran yacimientos de Cu-Fe-(Au) del tipo skarn, los cuales se alojan en los niveles calcáreos del Miembro 4 de la Formación Arqueros.

Esta Formación, de edad Haute-riviana-Barremiana, está conformada principalmente por rocas volcánicas andesíticas con intercalaciones de calizas y areniscas calcáreas. La génesis de estos yacimientos se relaciona con la intrusión del Granito de Santa Gracia, el cual produjo una aureola de metamorfismo de contacto en la facies corneana de hornblenda, que afectó a la Formación Arqueros. Los cuerpos mineralizados son estratoligados y estratiformes, con potencias que varían entre 4 y 6 m, longitud en el sentido del rumbo entre 75 y 120 m, y en el sentido del buzamiento entre 20 y 90 m. El tonelaje explotado en el distrito alcanza las 200.000 T.M. de mena, con leyes medias de cobre entre 1.8 y 2.2% y 1 a 2 gr/ton. de Au. De mayor a menor abundancia, los minerales metálicos que constituyen la mineralización son magnetita, pirita, hematita, calcopirita, con cantidades menores de galena, esfalerita, arsenopirita, pirrotina

y bornita. Los minerales no metálicos que acompañan a la mineralización cuprífera son principalmente granate (fracciones molares de: andradita entre 0.40 y 0.65; grosularia entre 0.25 y 0.56; espesartina <0.12), clinopiroxeno (fracciones molares de: hedenbergita, entre 0.07 y 0.22; diópsido entre 0.77 y 0.87; johansenita <0.06), escapolita rica en sodio, epidota, clinocanfíbol, calcita, biotita-flogopita, ortoclasa, cuarzo, clorita, illita, prehnita y laumontita. El geotermómetro basado en la relación  $Ti/Fe+2$  en biotita indica que el Granito de Santa Gracia cristalizó alrededor de 740°C, lo cual, de acuerdo a resultados experimentales de otros autores, implica una presión de cristalización entre 500 y 1000 bares, que unido a una estimación de la  $fH_2O$  de 200 bares, indica un % en peso de agua entre 0.8 y 1.9. Los estudios de inclusiones fluidas y los equilibrios mineralógicos en los cuerpos mineralizados indican que la mineralización cuprífera se formó entre 335 y 360°C, con  $XCO_2$  en los fluidos menor a 0.015, a condiciones de  $\log fO_2$ ,  $\log fS_2$  y pH alrededor de -29, -0.8 y 6.5, respectivamente. Los mismos estudios señalan además la posibilidad de que existiera ebullición de los fluidos hidrotermales en un nivel topográ-



ficamente superior (probablemente ya erodado) del sistema. La composición isotópica de las calcitas hidrotermales en este distrito, puede ser modelada como producida por la interacción entre un fluido hidrotermal, probablemente de origen magmático, y calizas marinas, a temperaturas entre 350 y 270 °C. El yacimiento Panulcillo, localizado a 18 km al N de la ciudad de Ovalle, IV Región, Chile, constituye un skarn de cobre que se encuentra alojado en los lentes calcáreos de la Formación Estratos de El Reloj, de probable edad Valanginiana. Esta Formación está constituida por intercalaciones de andesitas, calizas y areniscas. La génesis del yacimiento, ocurrida hace unos 115 ( $\pm 3$ ) m.a. (edad K/Ar en flogopita), se relaciona con la intrusión de un cuerpo monzodiorítico que aflora al N del yacimiento. Este intrusivo produjo una aureola en la facies corneana de anfíbolita en las rocas de la Formación Estratos de El Reloj, las cuales habrían estado en condiciones de metamorfismo de muy bajo grado durante la formación del yacimiento. Los cuerpos mineralizados se encuentran a modo de "bolsones" dentro de la zona de skarn de granate, y presentan potencias entre 20 y 50 m, longitudes en el sentido del rumbo hasta de 160 m y según el buzamiento hasta de 60 m. El tonelaje explotado en este yacimiento alcanza las 500.000 T.M. de mena, con una ley media de la mineralización hipógena de 3.5% de Cu. Los minerales metálicos que se encuentran en las zonas con mineralización cuprífera son, de mayor a menor abundancia: pirrotina, pirita, calcopirita, esfalerita, arsenopirita, galeña, magnetita y hematita, y en cantidades muy pequeñas, molibdenita. Los minerales no metálicos son principalmente granate (fracciones molares de: andradita entre 0.05 y 0.60; grosularia entre 0.36 y 0.79; espesartina  $< 0.16$ ), clinopiroxeno (fracciones molares de: hedenbergita entre 0.14 y 0.42; diópsido entre 0.52 y

0.82; johansenita  $< 0.12$ ), escapolita rica en sodio, pargasita, calcita, flogopita, plagioclasa, epidota-clinozoisita, clorita, illita, ortoclasa y axinita. La geotermometría basada en los equilibrios mineralógicos en las zonas de mena indica que los minerales metálicos se depositaron entre los 524 y los 630 °C, a condiciones de log  $fS_2$  entre -2 y -1.8 y log  $fO_2$  entre -18.0 y -16.5. El contenido de FeS en esfalerita en equilibrio con pirita y pirrotina, indica una presión de formación alrededor de 2 kbare. En el intrusivo, la relación Ti/Fe+2 en biotita indica que éste cristalizó alrededor de 700° C; el contenido de Al en hornblenda indica una presión de cristalización máxima de 2.1 kbare; la estimación de la  $fH_2O$  durante la cristalización, basada en el equilibrio biotita-feldespato potásico-magnetita, fue de máximo 400 bares, lo que implica un % en peso de agua entre 1.1 y 2.5. En los yacimientos estudiados, los cuerpos mineralizados se ubican en los niveles de calizas. En el distrito de San Antonio, la localización de estos cuerpos está controlado además, por la intersección de los niveles de calizas con sistemas de fracturas que fueron activas durante la génesis de los yacimientos.

La distribución de las distintas asociaciones mineralógicas alrededor de los cuerpos de mena, define en los niveles calcáreos una zonación caracterizada por la presencia de escapolita en las zonas más cercanas a estos, biotita-flogopita, y clinoanfíbol en las partes más alejadas. En las andesitas, esta zonación se caracteriza por la presencia de escapolita en las partes más cercanas a las zonas mineralizadas y por la asociación clinoanfíbol, albita, epidota, magnetita y biotita en las partes más alejadas.

Prof. Guía: Sr. Waldo Vivallo

27-12-93



# ALTERACION Y MINERALIZACION HIDROTHERMAL DE COBRE Y ORO EN EL YACIMIENTO LA VOLUNTAD, PROVINCIA DE NEUQUEN, REPUBLICA ARGENTINA

Luis Ignacio Ugalde Abaroa

Magister

La presente tesis de grado, tuvo como objetivo el determinar el tipo de procesos que originaron la presencia de mineralización de cobre y oro, en el área de La Voluntad, ubicada en la provincia de Neuquén, República Argentina.

El estudio se centró en la caracterización de la sucesión de eventos intrusivos e hidrotermales, así como en la determinación de contenidos de elementos metálicos, y de patrones físico-químicos y la naturaleza de las soluciones acuosas asociadas a algunos de estos tipos de alteración. Como objetivos secundarios, se planteó el determinar la edad de la alteración y mineralización hidrotermal, así como de los procesos genéticos y ambiente de formación del magma que originó cuerpos intrusivos aflorantes.

La metodología empleada, se basó en el mapeo y muestreo de las diferentes unidades litológicas, así como de los tipos de alteración y mineralización hidrotermal, tanto en la superficie del área, como en los testigos de cuatro perforaciones, para lo cual se realizaron estudios mineralógicos y petrográficos de secciones delgadas y pulidas, mediante el uso de microscopios de luz polarizada. Las técnicas instrumentales incluyeron la determinación de la concentración de elementos mayores, trazas, tierras raras y metáli-

cos, estudios de inclusiones fluidas, determinación de las razones entre los contenidos de isótopos pesados y livianos de oxígeno e hidrógeno, y una datación realizada mediante el método potasio argón.

Los resultados de este trabajo indican que en el área afloran rocas intrusivas, cuya composición varía desde granodiorítica a tonalítica, y las cuales componen una unidad para la cual se propone la denominación de **Complejo Intrusivo La Voluntad (CILV)**, el cual corresponde a un complejo intrusivo anillado, emplazado en un ambiente subvolcánico. Las rocas del CILV, tienen una afinidad calcoalcalina rica en potasio, y el magma a partir del cual cristalizaron, se originó mediante el fraccionamiento de líquidos de composición andesítica a basáltica, producidos por la fusión parcial de rocas portadoras de granate y flogopita, probablemente peridotitas, ocurrida en las partes inferiores de la corteza continental, y que fue contaminado con material proveniente de la corteza oceánica subductada. Este magma fue formado en un ambiente de margen continental activo, con desarrollo de un arco volcánico, y generado en una posición mas distante con respecto a la paleofosa que las rocas calcoalcalinas s.s., sobre las partes mas profundas de la zona de Banniöff.



Se distinguieron cinco eventos hidrotermales. La alteración potásica, que es la más antigua, se originó durante el enfriamiento de un cuerpo de composición tonalítica, mediante un fluido con una importante componente magmática, el que estaba a una temperatura mínima de 400°C; durante esta alteración se depositaron contenidos anómalos de cobre y molibdeno. Le siguió después una propilitización, de escaso desarrollo, y luego una alteración cuarzo sericitica, la de más amplio desarrollo y más destructiva del área, originada por un fluido producido por una mezcla de aguas de origen magmático y meteórico, y el cual estaba a una temperatura de entre 300°C a 400°C; durante esta alteración se depositaron los mayores volúmenes de mineralización sulfurada de cobre y molibdeno reconocidos, asociados principalmente a vetas y vetillas. Con posterioridad le siguió una alteración de tipo silíceo, originada por un fluido que se encontraba a temperaturas de

entre 200°C y 360°C, y durante el cual se depositó la principal mineralización de oro del área, ubicada en una posición periférica con respecto a la mineralización hidrotermal de cobre y molibdeno. Durante el último evento hidrotermal reconocido, se produjo una extensa depositación de hematita.

De los antecedentes presentados, se desprende que los tres primeros tipos de alteración se asocian a un depósito del tipo pórfido cuprífero, de edad carbonífero medio, y formado durante el ciclo metalogénico de edad paleozoico superior, descrito en los Andes argentinos, mientras que los dos últimos tipos de alteración, se generaron por la actividad de un sistema de menor temperatura que este último, ocurrido en niveles más superficiales de emplazamiento.

Prof. Guía. Sr. Waldo Vivallo  
02-08-94

## **APLICACION DE LA GEOQUIMICA REGIONAL DE SEDIMENTOS, DE DRENAJE A LA INTERPRETACION METALOGENICA EN CHILE CENTRAL**

**José Edgardo Seguel Sepúlveda**

**Magister**

El objetivo principal del presente estudio fue determinar, en la franja cordillerana de Chile Central, comprendida por los cuadrángulos Tranquilla y Estero Alicahue, la distribución de elementos mayores y trazas, analizados en muestras de sedimentos de drenaje y establecer su relación con la litología y mineralización existentes.

La base del estudio lo constituye una prospección geoquímica regional mediante sedimentos de drenaje de 1er y 2do orden, con una densidad de muestreo de 1 muestra sed./2km<sup>2</sup>. Los resultados analíticos de 25 elementos fueron procesados por métodos estadísticos univariados y multivariados.



Los valores geoquímicos medios obtenidos en el área para los elementos mayores son en general compatibles con un ambiente dominado por rocas intrusivas y volcánicas calcoalcalinas. Son anormalmente altos, comparados con los valores promedios de rocas de la corteza, el Cu, Mo, Zn, Pb, Cd, Sb, Bi y B. Estos valores se interpretan como indicativos de procesos de mineralización y alteración.

El análisis estadístico de multivariariables permitió identificar tres asociaciones de elementos indicativas de mineralización: (i) Cu-Sb-Bi-Au-Ag asociación que evidencia mineralización vetiforme de Cu-Au concentrada dentro y en los márgenes de intrusivos granodioríticos de edad Paleoceno, (ii) Zn-MnO-Ag-Pb asociación que evidencia mineralización vetiforme polimetálica encajada en rocas volcánicas del Cretácico Superior en zonas de falla, (iii) W-Mo asociación que se interpreta como relacionada a probable mineralización Cu-Mo hospedada por pórfidos dacíticos del Mioceno Medio.

Las características geoquímicas del área, en conjunto con información geológica regional, distribución de yacimientos y zonas de alteración hidrotermal, indican para este sector de la pre-Cordillera de Chile Central la presencia de dos franjas de minerali-

zación limitadas por la zona de falla Pocuro. Una Franja Cu-Au y polimetálicos se ubica a lo largo y al oeste de la zona de falla y al este de ella una probable Franja Cu-Mo.

La Franja Cu-Au y polimetálicos está relacionada espacial y genéticamente con una línea magmática del Paleoceno emplazada a lo largo del corredor de la zona de falla Pocuro. La mineralización Cu-Au se concentra dentro y en los márgenes de plutones y en zonas de alteración hidrotermal. Los depósitos conocidos corresponden a vetas, vetillas y cuerpos de brechas con turmalina mineralizadas con Cu-Au. Los depósitos son hidrotermales y su génesis se considera relacionada a las fases postreras del emplazamiento en el Paleoceno (de los plutones encajantes). La mineralización vetiforme polimetálica corresponde a zonación en torno a los sistemas de Cu-Au.

La Franja Cu-Mo está relacionada a un evento magmático de edad miocénica que se localiza al este de la zona de falla Pocuro. Esta franja correspondería a las manifestaciones más occidentales de la línea de pórfidos cupríferos de la Alta Cordillera.

Prof. Guía: Sr. Waldo Vivallo  
04-04-95



# PALEOAMBIENTES Y MECANISMOS DE DEPOSITACION DE LA SECUENCIA SEDIMENTARIA QUE AFLORA EN EL SECTOR DE POLPAICO, REGION METROPOLITANA, CHILE

Antonio Gallego Mingo

Magister

El presente trabajo de titulación, tiene como objetivo el proponer un modelo sobre el paleoambiente de depositación de la secuencia clástico calcárea que aflora en la zona de Polpaico (Región Metropolitana). El estudio se basa en el análisis de facies clásticas y microfacies calcáreas, sus asociaciones, y la evolución de estas en el tiempo.

La geología del área, originalmente incluida dentro de la Formación Las Chilcas, corresponde a una secuencia sedimentaria de 90 m. de espesor de rocas volcanoclásticas con intercalaciones calcáreas en la mitad superior. La más potente de estas y techo de la secuencia, son las denominadas "Calizas de Polpaico", las que contienen microfósiles albianos.

Esta secuencia, sobreyace en discordancia de erosión a una unidad de lavas brechosas, e infrayace también en discordancia de erosión a lavas andesíticas ( $95 \pm 3$  Ma. K/Ar, plg.), tobas y areniscas. Se encuentra intruida por stocks de composición de gabro a diorita ( $92 \pm 3$  Ma. y K/Ar, plg.). Las rocas presentan suaves pliegues y flexuras, y fallas de tipo normal y de rumbo.

Se han reconocido 5 asociaciones de facies calcáreas (Calizas de Polpaico) y 3 clásticas; las primeras corresponden en general a depósitos de flujos gravitacionales originados en la línea

de costa, y depositadas en un ambiente marino en torno al nivel de olas de tormenta, con cierta pendiente y próximo a la costa. Las 3 asociaciones clásticas diferenciadas, coincidentes con las unidades informales aquí llamadas "Clástica inferior", "Clástico-calcárea" y "Clástica superior"; se habrían depositado a partir de turbiditas de media y alta densidad dentro de un abanico deltaico ("fan delta").

Este "fan delta" se habría depositado en una cuenca marina somera con una línea de costa (E-W) ubicada al Norte del área.

Sílice reemplazando a los restos vegetales fósiles y rellenando estructuras por bioturbación tipo "Domichnia" y "Fodichnia" en las calizas, se habría depositado durante la diagénesis, y tendría su origen en las abundantes pómez presentes en las areniscas de la secuencia estudiada.

Los resultados alcanzados en este trabajo son novedosos para el área y la formación Las Chilcas, la que siempre se supuso continental. Esto trae la necesidad de revisar la interpretación de la estratigrafía de Chile Central, teniendo como base nuevos puntos de vista y metodología de estudio.

Prof. Guía: Sr. Manuel Suárez

19-04-94