

# Razones isotópicas de S de los sulfuros del distrito minero de Cerro Negro: un posible indicador de los depósitos estratoligados de Cu hospedados en rocas sedimentarias lacustres

Francisco Munizaga

Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,  
Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile

Juan Carlos Reyes

Compañía Minera Cerro Negro, Casilla 3D, Cabildo, Chile  
Dirección actual: Compañía Minera El Bronce de Petorca, Carmencita 240, Santiago, Chile

Jan Olov Nyström

Swedish Museum of Natural History, S-10405 Stockholm, Sweden

## RESUMEN

El distrito minero Cerro Negro agrupa depósitos estratoligados de cobre tipo manto, hospedados en rocas sedimentarias volcánicas. Sulfuros de Cerro Negro exhiben  $\delta^{34}\text{S}$  en el rango -21,2 y -15,6 ‰, lo cual contrasta con los valores en torno a 0 ‰ típicos para depósitos similares en secuencias volcánicas. Ello se debería a diferencias genéticas. Las razones isotópicas de S obtenidas en los depósitos de Cerro Negro pueden ser explicadas mediante la formación de sulfuros a baja temperatura, lo cual es consistente con la mineralogía de alteración hidrotermal de la roca huésped, depositados en un ambiente lacustre rico en materia orgánica. La presencia de capas rojas en la secuencia sedimentaria que hospeda a los depósitos sugiere que las soluciones circulantes fueron oxidadas permitiendo el transporte de sulfatos de Cu y Fe. La interacción con material orgánico reduciría así a los sulfatos, con precipitación de sulfuros cuyo  $\delta^{34}\text{S}$  se encuentra en el rango obtenido en Cerro Negro. La actividad bacteriana podría ser un factor relevante en la génesis de los sulfuros, sin embargo, los datos disponibles no permiten concluir algo al respecto. La ocurrencia de baritina con valores de  $\delta^{34}\text{S}$  en torno a +10 ‰ en los niveles superiores de los cuerpos mineralizados, indica un origen magmático para el S de los sulfatos a partir de los cuales se formaron los sulfuros.

*Palabras claves:* Yacimientos estratoligados, Cu, Manto, Isótopos de S, Materia orgánica, Cerro Negro, Chile.

## ABSTRACT

**S isotopic ratios of the sulfides of the Cerro Negro mining district: a possible indicator of the Cu stratabound deposits associated with lacustrine sediments.** Sulfides from Cerro Negro, a mining district in central Chile with stratabound (manto-type) Cu deposits hosted by sedimentary, mainly volcanoclastic rocks show a range in  $\delta^{34}\text{S}$  from -21.2 to -15.6 ‰. This range is in contrast with values around 0 ‰ which are typical for similar deposits in volcanic sequences, probably due to genetic differences. The S isotope ratios obtained for the Cerro Negro deposits can be explained by ore formation at low-temperature, consistent with the hydrothermal alteration mineralogy of the host rocks, deposited in a lacustrine environment containing organic material. Presence of red beds in the sedimentary sequence hosting the deposits suggests that circulating solutions were oxidized, allowing transport of soluble Cu and Fe sulfates. Interaction with organic material would then reduce the sulfates, with precipitation of sulfides with  $\delta^{34}\text{S}$  in the range measured at Cerro Negro. Bacterial activity may have been a contributing factor, but the available data do not allow a conclusion. An ultimate magmatic origin for the S of the sulfates from which the sulfides were formed is indicated by of ca. +10 ‰ for barite occurring in the upper levels of the mineralized bodies.

*Key words:* Stratabound deposits, Cu, Mantle, S Isotopes, Organic matter, Cerro Negro, Chile.

*Revista Geológica de Chile, Vol. 21, No. 2, p. 189-195, 3 Figs., 1 Tabla, Diciembre 1994.*

## INTRODUCCION

Los depósitos estratoligados de Cu conocidos en Chile como tipo 'manto' están emplazados principalmente en secuencias volcánicas jurásicas y cretácicas de la Cordillera de la Costa. Camus (1986) los clasificó en dos grupos. El primero de ellos corresponde a yacimientos ligados a rocas principalmente volcánicas con predominio de flujos de lavas; desde el punto de vista económico, son los de mayor volumen, y está representado por los yacimientos de El Soldado, Lo Aguirre, El Salado, Punta del Cobre y Mantos Blancos; su mineralización es principalmente de bornita, calcosina y piritita. El segundo grupo corresponde a los depósitos asociados a rocas sedimentarias, como por ejemplo los distritos mineros de Tal-

cuna, Cerro Negro y Arqueros. Su mineralización es similar a la del primer grupo, pero algunos yacimientos poseen además de Cu, Pb y Zn contenidos menores de Ag (Camus, 1986).

Aunque existen diversas hipótesis en cuanto al origen de los dos grupos de depósitos tipo manto, a ambos se les ha considerado generados de la misma manera (Camus, 1986), a pesar de las diferencias litológicas de las rocas de caja y que presentan distinta intensidad y asociación mineralógica en su alteración. El objetivo de este trabajo es contribuir a la formulación de un modelo genético en base a datos isotópicos de S en muestras de sulfuros y sulfatos del distrito minero de Cerro Negro.

## EL DISTRITO MINERO DE CERRO NEGRO

El distrito minero cuprífero de Cerro Negro (Fig. 1) se ubica en la V Región, provincia de Petorca, a unos 95 km al norte de la ciudad de Santiago, y a unos 27 km al sureste de Cabildo, y comprende los yacimientos Cerro Negro (minas Pirquitas, Valparaíso, Diablo Norte, Diablo Sur y Chépica) y Portales, los cuales han sido descritos por Espinoza (1969), Llaumet y Olcay (1977), Olcay (1979), Pérez (1985) y Elgueta *et al.*, (1990). Ellos están emplazados en el Miembro Pitipeumo (Espinoza, 1969) de la Formación Las Chilcas, la cual fue asignada al Cretácico Superior por Thomas (1958) y Carter y Aliste (1962), y al Cretácico Inferior por Rivano *et al.* (1986).

El miembro Pitipeumo, está compuesto por una secuencia sedimentaria concordante principalmente volcanoclástica, que de base a techo está constituida por: areniscas rojas, toba de lapilli (Brecha Diablo), lutitas negras (en parte también calizas y margas carbonosas), areniscas verdes, brechas y areniscas verdes.

La mineralización se ubica principalmente en la unidad litológica denominada Brecha Diablo, y en menor proporción en las lutitas y areniscas rojas, o como en el yacimiento Portales, exclusivamente en las lutitas, calizas y margas carbonosas. La Brecha Diablo es una unidad sin estratificación visible, cuyo espesor varía entre 0 m y 200 m acunándose hacia el norte y noroeste del distrito (Arévalo, 1992). Las

lutitas están en parte silicificadas y tienen un espesor que varía entre 5 m y 40 m. En algunos sectores hay fósiles de pelecípodos indicadores de un ambiente de deposición de aguas someras, relativamente tranquilas, tipo lacustre y/o borde de cuenca marina (Pérez, 1985). Existen cambios laterales transicionales y engranajes laterales entre rocas de ambientes eminentemente continental subaéreo y rocas de ambiente subaéreo a otras de ambiente lacustre que indican la existencia de una cuenca cerrada, probablemente rodeada de volcanes (Pérez, 1985).

La estructura de las rocas del miembro Pitipeumo es de un homoclinal de rumbo N75° a 80°W con inclinaciones al sur de 8° a 20°, afectados por fallas de rumbo NNE, NNW y EW (Olcay, 1979). La Formación Las Chilcas está intruida por varios stocks de diorita y granodiorita ubicados en la periferia del distrito minero. Existen también numerosos diques y filones mantos; en las labores de explotación dentro del distrito se ha reconocido un sill andesítico de textura porfídica que se denomina sill de Cerro Negro.

## ALTERACION HIDROTHERMAL

La alteración hidrotermal que acompaña la mineralización consiste en clorita, calcita, cuarzo y subordinadamente albita y epidota, y varía según el tipo litológico al que afecta (Olcay, 1979). Así, según dicho autor, en el horizonte de lutitas la alteración está ca-

racterizada por un agregado criptocristalino de arcilla y sílice, en las areniscas rojas inferiores y areniscas verdes superiores hay una alteración incipiente (en proporción menores al 10%) de clorita y calcita, mientras que en la Brecha Diablo el cemento de la brecha es clorita (de un color verde intenso), calcita y en menor proporción arcilla, cuarzo, albita y epidota.

### MINERALIZACION DE MENA

La mineralización cuprífera económica en el yacimiento de Cerro Negro se encuentra en el techo de la Brecha Diablo. Los minerales de la mena son en orden de abundancia, calcopirita, pirita, bornita, calcosina y en menor cantidad galena y esfalerita. La mineralización de mena se presenta, principalmente, en forma diseminada en la matriz de la brecha, y en menor proporción en los clastos y como guías finas irregulares (Olca, 1979). La mineralización económica se expresa como un cuerpo anular de 1,5 km de largo por 0,5 km de ancho que, en la zona más potente, alcanza hasta 100 m de espesor. La mineralización se desarrolla en la brecha junto al contacto del sill andesítico y aparentemente sólo bajo la lutita. La mineralización se estima en aproximadamente 9 millones de toneladas con una ley de 1,5 a 2% de Cu, según la Compañía Minera Cerro Negro.

La mineralización en el yacimiento de Portales se encuentra en lutitas, calizas y margas carbonosas y constituye un cuerpo tabular conocido como Manto Portales, de unos 1.000 m de longitud por 500 m de ancho y una potencia máxima de 1 a 3 m. La minera-

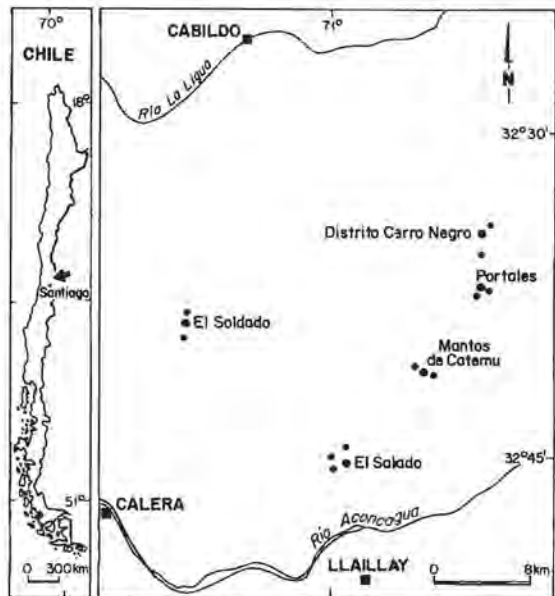


FIG. 1. Ubicación geográfica del distrito mirero cuprífero Cerro Negro y yacimientos aledaños. Los círculos mayores representan los depósitos cupríferos de mayor volumen.

lización se ha estimado en 0,5 millones de toneladas con un 1% de Cu.

En el distrito de Cerro Negro existe, además, una mineralización marginal de oxidados de cobre y sulfatos, entre ellos baritina, ubicados sobre la Brecha Diablo, en el yacimiento de Cerro Negro, y sobre el Manto Portales en el yacimiento Portales.

### RAZONES ISOTÓPICAS DE S

Las razones isotópicas de S obtenidas en los sulfuros de las minas de los yacimientos de Cerro Negro y Portales presentan valores de  $\delta^{34}\text{S}$  entre -21,2 y -15,6 ‰, mientras que las baritinas presentan valores de 9,6 y 11,1 ‰ (Tabla 1, Fig. 2). Los análisis fueron hechos en el Laboratory for Isotope Geology, Swedish Museum

of Natural History, Stockholm, Sweden, y en Geochron (Krueger Enterprises Inc.), Cambridge, Massachusetts, U.S.A. Se usó como estándar de referencia, la troilita del Cañón del Diablo; el error estimado de estos datos incluyendo tratamiento químico y espectrometría es  $\pm 0,2\%$ .

TABLA 1.-  $\delta^{34}\text{S}$  EN SULFUROS Y SULFATOS DEL DISTRITO DE CERRO NEGRO

No. Muestra	Localidad	Mina	Mineral	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	Descripción
CNeg-3*	Bermuda	Cerro Negro	Calcopirita	-15,6	calcita-bornita-calcopirita en guías
CNeg-3*	Bermuda	Cerro Negro	Bornita	-15,7	calcita-bornita-calcopirita en guías
CNeg-20*	Plutón	Cerro Negro	Bornita	-21,2	sill con guías de bornita-calcita
CNeg-21*	Valparaiso	Cerro Negro	Calcopirita	-19,6	calcita-calcopirita-bornita
CNeg-21*	Valparaiso	Cerro Negro	Bornita	-17,1	calcita-calcopirita-bornita
CNEG-30 <sup>o</sup>	Nivel sobre Manto Portales	Portales	Baritina*	11,1	En superficie, asociada a minerales oxidados de Cu
Jl-6 <sup>o</sup>	Nivel superior Pirquitas	Cerro Negro	Baritina**	9,6	En superficie, asociada a minerales oxidados de Cu
Jl-7 <sup>o</sup>	Manto Portales	Portales	Calcopirita	-20,4	Guías en margas

\* La baritina está asociada con cuarzo calcita y malaquita y se presenta en niveles superiores o lateralmente alejada del cuerpo mineralizado principal; asociación mineralógica considerada marginal a la mineralización del Manto Portales (J. Injoque, comunicación oral, 1984).

\*\* Mineralización marginal sobre el cuerpo de mena principal de la Brecha Diablo.

<sup>o</sup> Análisis efectuados en Krueger Enterprises Inc.

• Análisis efectuados en Laboratorio de Geología Isotópica, Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Sweden.

## DISCUSION

Los yacimientos del distrito minero de Cerro Negro fueron interpretados como epigenéticos de acuerdo a su alteración hidrotermal (Olcay, 1979; Pérez, 1985). Según estos autores, la mineralización y la alteración estarían relacionadas a los intrusivos aflorantes en el área de Cerro Negro y a un intrusivo mayor probablemente existente en profundidad. La presencia de mineralización en los clastos y matriz de la Brecha Diablo, asimismo, como la silicificación en las lutitas sobreyacentes indicaría una génesis epigenética (Elgueta *et al.*, 1990). En cuanto al origen último del S de los fluidos mineralizadores, Camus (1990) sugiere un posible origen magmático para los yacimientos del distrito de Cerro Negro por referencia a los datos analíticos de  $\delta^{34}\text{S}$  (Klohn *et al.*, 1986; Holmgren, 1987) e inclusiones fluidas (Nisterenko *et al.*, 1974; Klohn *et al.*, 1986; Holmgren, 1987) para los yacimientos de El Soldado y El Salado (ambos cercanos a Cerro Negro; Fig. 1). Según Elgueta *et al.* (1990) el cobre en el distrito minero de Cerro Negro, tendría una génesis magmática ya que provendría de la lixiviación de las rocas volcánicas del área.

Los valores de razones isotópicas de S del distrito

minero de Cerro Negro obtenidos en este trabajo, muestran que hay una marcada diferencia en los  $\delta^{34}\text{S}$  de los sulfuros de los yacimientos emplazados en rocas volcánicas y los emplazados en secuencias predominantemente sedimentarias, aun cuando la composición de los clastos sea en estas últimas predominantemente volcánica (Fig. 3). Esta diferencia sugiere que ambos tipos de yacimientos tienen distintos orígenes.

Los  $\delta^{34}\text{S}$  obtenidos por Holmgren (1987) en los sulfuros de la mineralización principal de El Soldado varían entre -5,2‰ y +1,5‰. Es decir, al igual que en otros yacimientos estratoligados emplazados en rocas volcánicas con valores de  $\delta^{34}\text{S}$  cercanos a 0‰, indicaría que el S es de origen magmático (Sasaki *et al.*, 1984; Klohn *et al.*, 1986; Holmgren, 1987). En contraste, en el distrito estudiado existe un gran fraccionamiento, expresado por valores entre -21,2‰ y -15,6‰. Valores de  $\delta^{34}\text{S}$  negativos semejantes a los encontrados en Cerro Negro se han obtenido también en los yacimientos con rocas de caja sedimentaria como los de Talcuna y San Bartolo (Fig. 2).

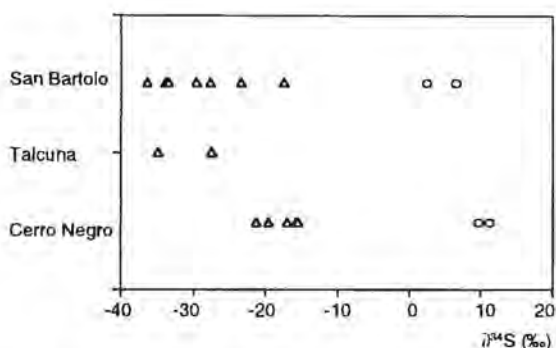


Fig. 2. Comparación de razones  $\delta^{34}\text{S}$  en yacimientos emplazados en rocas sedimentarias en Chile; triángulos= sulfuros; círculos= sulfatos (baritina). Datos obtenidos de Flint (1986; San Bartolo), Puig y Spiro (1988; Talcuna) y Cerro Negro (el presente trabajo, Tabla 1).

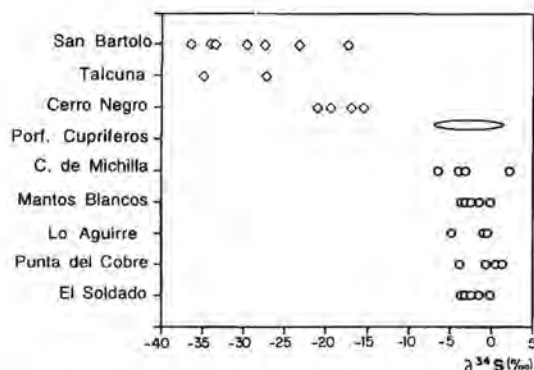


Fig. 3. Comparación de las razones isotópicas de S en yacimientos tipo manto. rombos= sulfuros de yacimientos emplazados en rocas sedimentarias; círculos abiertos= sulfuros emplazados en rocas principalmente volcánicas; elipse= rango de valores en sulfuros de pórfidos cupríferos. Figura tomada de Munizaga y Zentilli, (1994).

El alto grado de fraccionamiento de las razones isotópicas de S en los sulfuros del distrito de Cerro Negro sugiere un proceso de mineralización a baja temperatura, concordante con las asociaciones mineralógicas de ganga que indicarían, a pesar que no existen estudios específicos, un rango entre 150 y 250°C. Dichas temperaturas no constituyen un factor de importancia en el fraccionamiento de los sulfuros y son concordantes con el modelo genético indicado por Elgueta *et al.* (1990), i.e., el de una deposición de una toba de lapilli (Brecha Diablo) en una cuenca lacustre intruida posteriormente por filones y filones mantos. Según dichos autores y Olcay (1979), la mineralización se habría emplazado en las zonas más porosas o selladas por rocas impermeables, como las lutitas con su grano fino y baja permeabilidad.

Sin embargo, el nivel de lutitas negras que parece sellar la mineralización en el yacimiento de Cerro Negro no es solo un control físico, sino que también químico, ya que contiene materia orgánica que podría ser responsable de la precipitación del sulfuro de las soluciones que generaron la mineralización principal económica del yacimiento. Además, las secuencias de las rocas de caja y el entorno regional de este distrito corresponde a un ambiente subaéreo, con potentes capas de color rojo, que podrían haber conferido a las soluciones que interactuaron con estas rocas un carácter oxidante. Por lo tanto, para el distrito de Cerro Negro se podría aplicar un modelo similar al de Rye y Ohmoto (1974), que propone que en presencia de soluciones oxidadas podrían precipitar sulfuros fraccionados livianos, con valores semejantes a los

que presentan los sulfuros del distrito estudiado. Aplicando el modelo de Hoy y Ohmoto (1989), podría explicarse el sistema del distrito de Cerro Negro como un sistema hidrotermal abierto, en el cual las soluciones serían de baja temperatura y ricas en sulfatos solubles de Cu y Fe, donde el aporte de S en la forma de sulfato es mayor que la razón de reducción bacteriana o inorgánica en las capas mineralizadas. Por lo tanto, el reservorio de sulfatos se renovarían constantemente y no se alteraría mayormente la composición isotópica del sulfato, a pesar que la reducción bacteriana asociada a las capas con materia orgánica, precipitan preferencialmente el isótopo más liviano en los sulfuros.

El modelo de Hoy y Ohmoto (1989) es concordante con los valores de  $\delta^{34}\text{S}$  encontrados en las baritinas del distrito de Cerro Negro (Tabla 1). Los valores de +9,6 y +11,1‰, de esta mineralización marginal, son semejantes a los encontrados por Kusakabe *et al.* (1984) en los sulfatos hipógenos de yacimiento del tipo pórfido de Cu y Mo de El Teniente. Ello podría indicar que las soluciones desde donde se precipitaron los sulfuros de mena habrían tenido una fuente magmática de S y que habría circulado en un sistema abierto con una recarga tal, que mantenía la composición isotópica del sulfato.

Las razones isotópicas de S tan livianas que presentan los sulfuros del distrito minero de Cerro Negro, también podrían explicarse exclusivamente por actividad bacteriana. Sin embargo, dado el volumen de los cuerpos mineralizados, parece poco probable que toda la mineralización de sulfuros tenga ese ori-

gen. Este tipo de problemas ya fue analizado en otros yacimientos de baja temperatura por Hoy y Ohmoto (1989), concluyendo que la actividad bacteriana no permite explicar por sí sola, el volumen total de la mineralización.

El yacimiento estratoligado de Cu de San Bartolo presenta sulfuros con  $\delta^{34}\text{S}$  muy livianos (Fig. 2). Su mineralización ha sido interpretada por Flint (1986) como diagenética con una temperatura inferida de formación levemente superior a los 90°C y semejante a los yacimientos descritos como 'red-bed'. Este autor sugirió que la fuente del S de los sulfuros fueron sulfatos de origen evaporítico reducidos biogénicamente, por bacterias. Sin embargo, en San Bartolo no existen evidencias de una cantidad importante de materia orgánica que sea responsable del proceso de reducción de sulfuros y del fraccionamiento de estos. Son livianos. Además, allí los sulfatos presentes como yeso, anhidrita y celestita, tienen  $\delta^{34}\text{S}$  de +2,5 a

+6,5 ‰, es decir, más livianos que un sulfato de origen marino (en torno a +20 ‰) o que un sulfato de origen magmático (en torno a +10 ‰). Las soluciones que generaron los sulfatos del yacimiento de San Bartolo tuvieron, por lo tanto, un origen y/o evolución diferente que las que generaron los sulfuros en el distrito minero de Cerro Negro.

En el distrito minero de Talcuna, ubicado ca. 400 km al norte del distrito de Cerro Negro (Fig. 1), la mineralización está emplazada en rocas de caja sedimentarias y volcanoclásticas semejantes a las de Cerro Negro. La composición isotópica del S en galenas señala  $\delta^{34}\text{S}$  muy fraccionados y negativos (Puig y Spiro, 1988), (Fig. 2), indicando condiciones de mineralización similares a las de Cerro Negro. Estudios en muestras de mineralización de mena de Talcuna, han revelado también materia orgánica junto a la mineralización de sulfuros (M. Zentilli, comunicación oral, 1993).

## CONCLUSIONES

Los sulfuros de los yacimientos con rocas de caja sedimentarias (principalmente volcanoclásticas) pertenecientes al distrito de Cerro Negro presentan valores de  $\delta^{34}\text{S}$  entre -15,6 ‰ y -21,2 ‰. Estos valores son marcadamente diferentes de los yacimientos de Cu tipo 'manto' emplazados en rocas volcánicas, y son compatibles con procesos de mineralización de baja temperatura, lo que es concordante con las asociaciones mineralógicas de alteración hidrotermal descritas para este distrito.

La composición isotópica que presentan los sulfuros estaría condicionada por el ambiente geológico de los yacimientos del distrito. Las capas rojas intercaladas en las secuencias de las rocas de caja pudieron otorgar un carácter altamente oxidante a las soluciones que circularon a través de ellas y de las

cuales precipitaron los sulfuros.

La materia orgánica en las lutitas del distrito de Cerro Negro, probablemente, controló la mineralización y la reducción de los sulfatos de Cu y Fe solubles en condiciones de alta oxidación, lo que explicaría el fraccionamiento que producen estos isótopos livianos de S. La actividad bacteriana relacionada a la materia orgánica puede haber estado presente, pero con los datos obtenidos no es posible establecer su importancia.

Las razones isotópicas de S obtenidas en torno a +10 ‰, obtenidas en barritas del distrito sugieren la probable composición original del sulfato del cual se habrían precipitado los sulfuros de la mena, indicando que la fuente del S de los sulfatos fue de origen magmático.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se efectuó bajo el marco del proyecto del No. 342 del PICG 'Ages and Isotopes of South American Ores' y fue financiado por el proyecto FONDECYT 1240-91. Se agradece al Sr. R. Muhry al personal de la Compañía Minera Cerro Negro por las

facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo, en especial al geólogo Sr. J. Injoque por sus interesantes sugerencias, y los Drs. K. Billström y P. Torsander por su ayuda en el laboratorio de isótopos estables.

Durante el proceso de edición B. Levi (Universidad de Estocolmo, Suecia), A. Hodgkin (Compañía Minera Newmont-Chile), V. MaksaeV (Cambior Chile

S.A.) y A. Puig (CODELCO-Chile), hicieron valiosas sugerencias y correcciones que permitieron mejorar el texto de este artículo.

## REFERENCIAS

- Arévalo, C. 1992. Facies ambientes de depositación y paleogeografía del miembro Pitipeumo (Formación Las Chilcas) V Región. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 202 p.
- Camus, F. 1986. Los yacimientos estratoligados de Cu, Pb, Zn y Ag de Chile (Frutos, J.; Oyarzún, J.; Pincheira, R.; editores). *Geología y recursos minerales de Chile. Universidad de Concepción II*, p. 547-635.
- Camus, F. 1990. Geological characteristics of stratabound deposits associated with lacustrine sediments, Central Chile. Stratabound ore deposits in the Andes. (Fontboté, L.; Amstutz, G. C.; Cardozo, M.; Cedillo, E.; Frutos, J.; editores). *Special Publication*, No. 8, *Society for Geology Applied to Mineral Deposits*, Springer-Verlag, p. 449-462.
- Carter, W. H.; Aliste, N. 1962. Geology and ore deposits of the Ñilhue Quadrangle, Aconcagua Province. *Instituto de Investigaciones Geológicas* (Inédito), 189 p. Santiago.
- Elgueta, S.; Hodgkin, A.; Rodríguez, E.; Schneider, A. 1990. The Cerro Negro Mine, Chile: Manto-Type Copper Mineralization in a Volcaniclastic Environment. Stratabound ore deposits in the Andes. (Fontboté, L.; Amstutz, G. C.; Cardozo, M.; Cedillo, E.; Frutos, J.; editores). *Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Special Publication*, No. 8, Springer-Verlag, p. 463-471.
- Espinoza, W. 1969. Geología del distrito cuprífero de Cerro Negro. Memoria de Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 148 p.
- Flint, S. 1986. Sedimentary and Diagenetic Controls on Red-Bed Ore Genesis: The Middle Tertiary San Bartolo Copper Deposit, Antofagasta Province, Chile. *Economic Geology*, Vol. 81, No. 4, p. 761-778.
- Holmgren, C. 1987. Antecedentes para un modelo genético del yacimiento El Soldado, V Región de Valparaíso. *Revista Geológica de Chile*, No. 30, p. 3-18.
- Hoy, L.D.; Ohmoto, H. 1989. Constraints for the genesis of redbed-associated stratiform Cu deposits from sulphur and carbon mass-balance relations: In Sediment-hosted stratiform copper deposits (Boyle, R. W.; Brown, A.C.; Jefferson, C.W.; Jowettand, E.C.; Kirkhan, R.V.; editors). *Geological Association of Canada, Special Paper*, No. 36, p. 135-149.
- Klohn, E.; Holmgren, C.; Ruge, H. 1986. El Soldado a peculiar copper deposit associated with anomalous alkaline volcanism in the central Chilean Coastal Range. *Society of Mining Engineers-American Institute of Mining and Metallurgical Engineers (SME-AIME)*, p. 1-9. New Orleans.
- Kusakabe, M.; Nakagawa, S.; Hori, M.; Matsuhisa, Y.; Ojeda, J.M.; Serrano, L. 1984. Oxygen and sulfur isotopic composition of quartz, anhydrite, and sulfide minerals from El Teniente and Rio Blanco porphyry copper deposits, Chile. *Geological Survey of Japan, Bulletin*, Vol. 35, p. 583-614.
- Llaumet, C.; Olcay, L. 1977. Geología y Evaluación de Mina Valparaíso. (Informe Inédito), *Compañía Minera Cerro Negro*, 28 p.
- Munizaga, F.; Zentilli, M. 1994. Caracterización isotópica de S de los depósitos estratoligados de Cu en Chile. *Proyecto IGCP 342, Volumen Especial, Revista Comunicaciones*, Vol 45, p. 127-134.
- Nisterenko, G.V.; Losert, J.; Chávez, L.; Naumow, V.B. 1974. Temperaturas y presiones de formación de algunos yacimientos cupríferos de Chile. *Revista Geológica de Chile*, No 1, p. 74-80.
- Olcay L. 1979. Geología, alteración hidrotermal y mineralización cuprífera del yacimiento estratiforme de Diabolo Sur, Distrito Minero de Cerro Negro. *Revista Comunicaciones*, No. 27, p. 1-18.
- Pérez, V.M. 1985. Estudio Geológico de los cuerpos intrusivos y su relación con la mineralización cuprífera del sector noreste del distrito minero de Cerro Negro, Quinta Región. Memoria de título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Geología*, 110 p.
- Puig, A.; Spiro, B. 1988. The source of sulphur in polymetallic deposits in the Cretaceous magmatic arc, Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 1, No. 3, p. 261-266.
- Rivano, S.; Sepulveda, P.; Boric, R.; Hervé, M.; Puig, A. 1986. Antecedentes radiométricos para una edad cretácica inferior de la Formación Las Chilcas. *Revista Geológica de Chile*, No. 27, p. 27-32.
- Rye, R.O.; Ohmoto, H. 1974. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review. *Economic Geology*, Vol 69, p. 826-842.
- Sasaki, A.; Ulriksen, C.E.; Sato, K.; Ishihara, S. 1984. Sulfur isotope reconnaissance of porphyry copper and manto-type deposits in Chile and the Philippines. *Geological Survey of Japan, Bulletin*, Vol. 35, No. 11, p. 615-624.
- Thomas, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta de Barriga. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, No. 2, 86 p.