

EL DISTRITO DE ORO EL BRONCE Y SU RELACION CON LA CALDERA MORRO HEDIONDO, REGION DE VALPARAISO, CHILE

FRANCISCO CAMUS

Compañía Minera El Bronce, Gertrudis Echeñique 161, Las Condes

RICARDO BORIC

Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 10465, Santiago

MILKA ALEXANDRA SKEWES

Casilla 970, Correo Central, Santiago

ABSTRACT

The El Bronce gold district is located in Central Chile ($32^{\circ}11'S-70^{\circ}56'W$), and contains epithermal polymetallic (Au, Ag, Cu, Pb, Zn) vein deposits. The district has been mined since the end of the 18th century and its estimated production up to the present is more than 4×10^5 oz Au and 10^6 oz Ag, besides an important volume of copper. The geological framework of the district is represented by Cretaceous volcanic and intrusive rocks. The oldest stratigraphic units are the Cerro Morado Formation (late Lower Cretaceous) and Las Chilcas Formation (late Lower Cretaceous-Upper Cretaceous (?)), formed by andesitic breccias, agglomerates and lava flows, with volcanoclastic interbeddings. An Upper Cretaceous eruptive center unconformably overlies these units cutting the volcanic sequence. The center is defined by the presence of a caldera structure ("Morro Hediondo Caldera"), of a 7 km radius semicircular section. Dacitic lapilli tuffs (K-Ar: 86 ± 3 Ma), andesitic lavas (K-Ar: 82-80 Ma), and breccias, assigned to the Lo Valle Formation, are the rocks associated with this center.

Two groups of intrusive rocks are recognized in the area. The western group is the oldest one, and is composed of quartz monzodiorites belonging to a batholith dated (K-Ar) as 134-86 Ma, which extends between 31° and $32^{\circ}S$. The eastern group is younger and is composed by dioritic (andesitic) to granodioritic (dacitic) stocks, dikes and sills, among which the outstanding components are the "Pórfido Petorca" (K-Ar: 86 ± 3 Ma) and a "Ring Dike" (K-Ar: 80-79 Ma), which define the outer border of the above mentioned caldera.

Extensive hydrothermal alteration zones considered as genetically associated with the intrusives, according to their spatial distribution and K-Ar data (109 ± 4 ; 82 ± 9 ; 81 ± 14 Ma) also crop out in the district.

The rocks of the area are cut by a number of mainly NW striking faults and dikes, which played an important role in the control of mineralization. Some of these structures show a radial or concentric pattern to the "Morro Hediondo Caldera".

About 90 ore bodies, mainly polymetallic veins, some copper veins, and one copper breccia pipe (Dulcinea Mine) have been identified. The most important and productive ore deposit is the El Bronce vein, emplaced in a 7 km long, NS-N20°E striking fault. Different lenticular, structurally controlled ore shoots are observed along the fault, ranging from 100-600 m in length, 200-400 m in depth, and 1-20 m in width.

The mineralogy consists of pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena, tennantite-tetrahedrite, bornite, arsenopyrite, pyrrhotite, hematite, and magnetite in that order of abundance. Gangue minerals are quartz (massive, microcrystalline, amethyst, and crystalline-transparent), ankerite, siderite, and barite. These minerals occur as massive concentrations, disseminated grains and in stockworks. A barren andesitic dike is also emplaced along the mineralized structure. A few meters thick, hydrothermally altered (sericite, clays, chlorite and carbonates) halo surrounds the vein.

According to paragenetic studies, mineralization would have been produced in three stages, gold and silver being deposited during the two earlier ones, associated with quartz, pyrite, sphalerite and chalcopyrite.

Fluid inclusion studies show homogenization temperatures ranging between 150° and 349°C, and salinities (weight %NaCl) from 1 to 10, while sulfide isotope analyses yielded values of $\delta^{34}\text{S}$ between +0,5 and +2,3.

The above data support the hypothesis that the ore was formed at a depth of less than 1,000 m below paleo-surface, due to a mixing process between hydrothermal magmatic ore fluids and meteoric ground waters.

Key words: Paragenesis, Hydrothermal alteration, El Bronce district, Epithermal ores, Gold, Morro Hediondo caldera, K-Ar Dating, Fluid inclusions, Upper Cretaceous, Valparaíso Region, Chile.

INTRODUCCION

El Distrito Minero El Bronce, se ubica 140 km en línea recta al norte de Santiago y 8 km al norte del pueblo de Petorca (Fig. 1). Su conocimiento data de fines del siglo XVIII, pero su desarrollo más importante ha ocurrido recién en el período a partir de 1980 al presente, habiéndose instalado una faena consistente en mina y planta de concentración por flotación, con una capacidad mensual de tratamiento algo superior a las 30.000 t.

Los yacimientos que conforman el distrito son de carácter epitermal y contienen mineralización polimetálica de Au, Ag, Cu, Zn y Pb, de los cuales sólo los tres primeros elementos se recuperan. Hasta la fecha y desde su descubrimiento, se estima que

el distrito ha producido algo más de 4×10^5 onzas de oro y aproximadamente 10^6 onzas de plata, además de un importante volumen de cobre.

En esta nota se describen, en forma preliminar, los depósitos epitermales de El Bronce y su marco geológico regional, cuyo conocimiento ha resultado clave en la comprensión de la génesis de los yacimientos. La información presentada es una síntesis de trabajos efectuados por geólogos de la Compañía Minera El Bronce y el Servicio Nacional de Geología y Minería, como parte del levantamiento de la Hoja Quillota, actualmente en elaboración. Una publicación en extenso sobre el tema se encuentra en preparación (Camus *et al.*, en prep.)

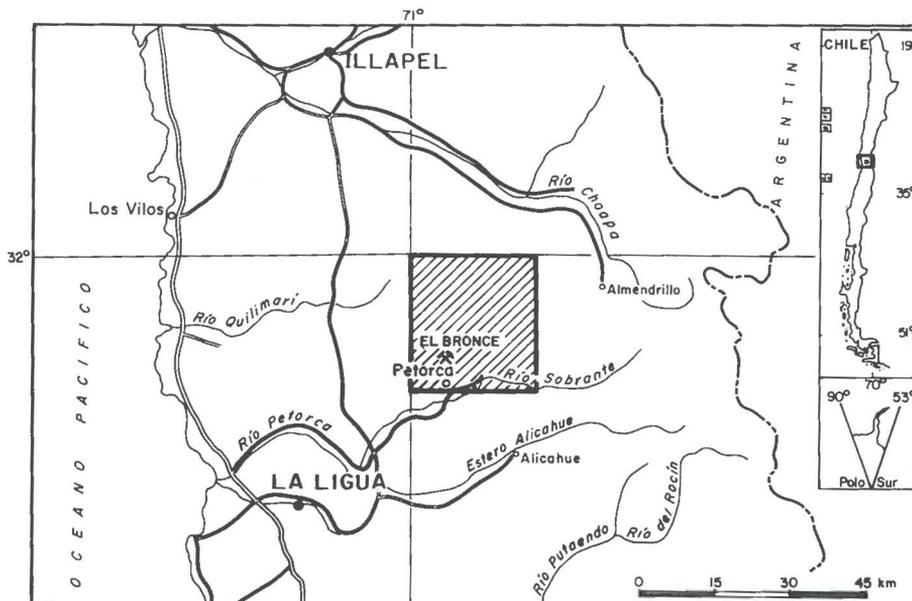


FIG. 1. Mapa de ubicación del cuadrángulo Petorca y del distrito Minero El Bronce.

MARCO GEOLOGICO

La mineralización del distrito se emplaza en un ambiente geológico dominado por la presencia de rocas volcánicas y, en menor cantidad, intrusivas del Cretácico (Fig. 2) (Borić, 1986). Las unidades estratificadas más antiguas corresponden a las formaciones Cerro Morado (Cretácico Inferior alto) y Las Chilcas (Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior²), constituidas por brechas, tobas, aglomerados y lavas de composición andesítica, con niveles de areniscas y conglomerados volcánicos. Discordantemente sobre estas unidades, e interrumpiendo la secuencia estratificada, se reconoce un centro eruptivo del Cretácico Superior, definido por la presencia de una estructura de caldera ("Caldera Morro Hediondo"), la que posee una sección semicircular de 7 km de radio (Fig. 2). Las rocas asociadas a este centro eruptivo son tobas de lapilli dacíticas y lavas y brechas andesíticas las que han sido datadas (K-Ar) en 86 y 82-80 Ma respectivamente (Tabla 1), y se asignan a la Formación Lo Valle. Volcanitas de similar composición de esta unidad afloran, además, profusamente, hacia el este del distrito (Fig. 2).

En el área se reconocen dos grupos de rocas intrusivas, alineadas en franjas de orientación N-S. El más antiguo se localiza al oeste de Petorca y corresponde a monzodioritas cuarcíferas que intruyen a la Formación Cerro Morado y forman parte de un extenso batolito con edades K-Ar entre 134 y 86 Ma, que se extiende entre los 31° y 32°30'S ("Superunidad Illapel"; Parada *et al.*, 1985). El más joven está constituido por "stocks", diques y filones dioríticos (andesíticos) a granodioríticos (dacíticos), entre los cuales destacan el "Pórfido Petorca" y un "Dique Anular" que define el límite externo de la caldera antes mencionada. Las edades K-Ar obtenidas en este dique son de 80 ± 3 y 79 ± 3 Ma y datan la formación de dicha caldera (Fig. 2, Tabla 1).

En el distrito existen, además, extensas zonas de alteración hidrotermal (facies argílica avanzada y, en menor grado, silicificación), las que se consideran genéticamente asociadas a ambos grupos de intrusivos, según su distribución y edades radiométricas (K-Ar: 109 ± 4; 82 ± 9; 81 ± 14 Ma; Tabla 1).

La estructura más relevante del área y que, en gran medida, controla el estilo estructural del sector es la mencionada "Caldera Morro Hediondo" Se conocen, además, abundantes fallas normales, principalmente de rumbo NW, y diques. Algunas

TABLA 1. EDADES RADIOMETRICAS K-Ar, DISTRITO EL BRONCE

Sigla Muestra	Unidad Litológica	Coordenadas	Tipo de Roca	Material Utilizado	% K Total	⁴⁰ Ar (Rad) (nl/g)	% ⁴⁰ Ar (Atm)	Edad (Ma) y Error 2σ
RB 200	Formación Lo Valle	32°02,2' - 70°53,3'	Andesita basáltica	Roca total	2,501	7,927	55	80 ± 3
RB 302	Formación Lo Valle	32°03,2' - 70°53,3'	Andesita	Roca total	1,728	5,648	25	82 ± 3
EB-60	Formación Lo Valle	32°05,6' - 70°52,0'	Toba de lapilli dacítica	Biotita	6,052	20,811	17	86 ± 3
RB 6	Pórfido Petorca	32°14,2' - 70°54,2'	Pórfido granodiorítico	Plagioclasa	0,984	3,380	42	86 ± 3
RB 149	Dique Anular	32°04,3' - 70°55,6'	Pórfido dacítico	Roca total	3,144	9,996	20	80 ± 3
RB 157	Dique Anular	32°06,4' - 70°55,6'	Pórfido monzodiorítico	Feldespatos	2,352	7,421	35	79 ± 3
RB 502	Zona Alteración	32°05,6' - 70°54,2'	Roca argilizada	Roca total	0,183	0,587	38	81 ± 14
RB 126	Zona Alteración	32°05,1' - 70°54,3'	Toba argilizada	Roca total	0,416	1,358	83	82 ± 9

Edades calculadas en el Laboratorio del SERNAGEOMIN, según constantes de Steiger y Jaeger (1977): $\lambda_g = 4,962 \times 10^{-10}$ años; $\lambda_c = 0,581 \times 10^{-10}$ años; $^{40}\text{K}/\text{K} = 0,01167$ atom.; $\text{K} = 39,098$ peso atómico. (De Borić, 1986).

de estas estructuras tienen disposiciones radiales o concéntricas respecto de la caldera (Fig. 2).

Las siguientes evidencias geológicas permiten inferir la existencia de la "Caldera Morro Hediondo":

1. Presencia de flujos piroclásticos dacíticos (K-Ar: 86 ± 3 Ma) los cuales son muy potentes dentro del cuerpo de la caldera y más delgados fuera de la estructura.
2. Presencia de un dique anular (semicircular) (K-Ar: 80-79 Ma), emplazado a lo largo de una zona de falla con un importante desplazamiento vertical.
3. Cambio en la actitud estructural de las secuencias volcánicas en el contacto con el dique anular. Fuera de esta estructura las rocas aparecen bien estratificadas con una disposición monoclinial hacia el este; dentro de ella, en cambio, las volcanitas están fuertemente perturbadas, sin que se reconoz-

ca estratificación y constituyendo, en sectores, una verdadera "megabrecha".

4. Presencia de un posible estrato-volcán, en el flanco norte de la caldera, formado por una sucesión de coladas andesíticas (K-Ar: 80-82 Ma), que se intercalan con los flujos piroclásticos. Bascullamiento de algunas de las coladas antes señaladas, atribuible, posiblemente, al "colapso" de la caldera.
5. Estructuras (fallas, diques, vetas) concéntricas y radiales a la estructura principal.
6. Presencia, tanto dentro de la caldera, como fuera de ella, de yacimientos polimetálicos epitermales y de zonas de alteración hidrotermal, que evidencian una importante actividad geotérmica. Dataciones K-Ar de la alteración ubicada dentro de la caldera han dado valores de 82 ± 9 y 81 ± 14 Ma, coincidentes con las de las fases extrusivas e intrusivas subvolcánicas, asociadas a la caldera.

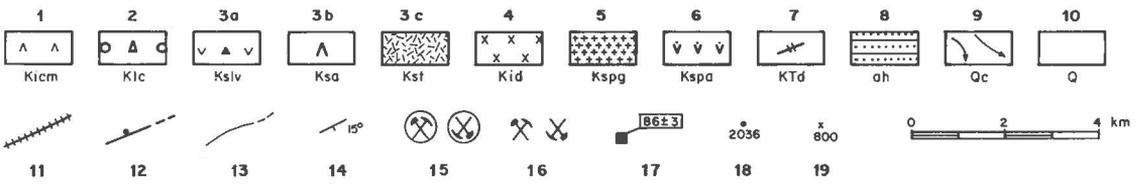
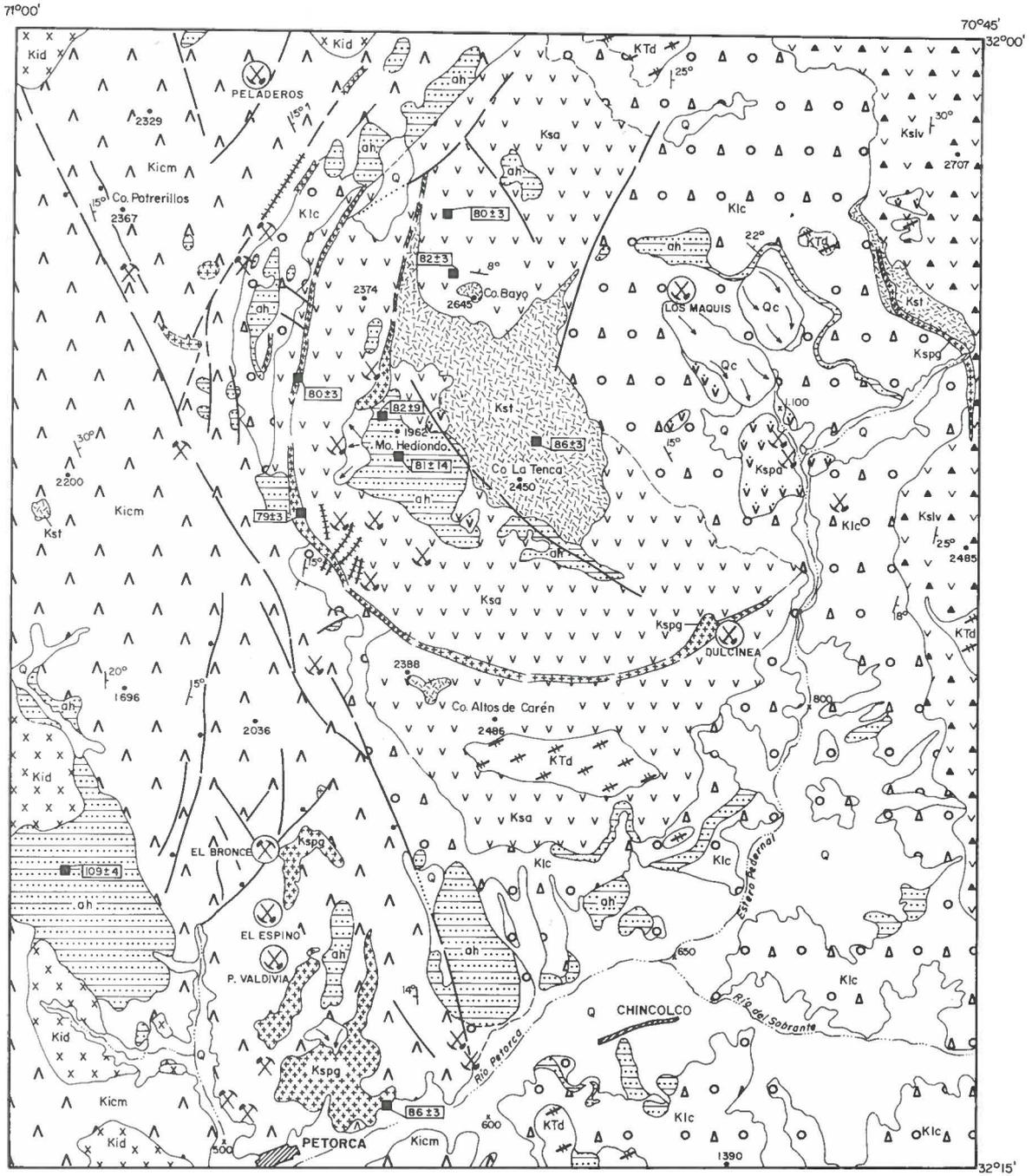
YACIMIENTOS METALIFEROS

Los yacimientos metalíferos del distrito (90) están emplazados en las diferentes unidades volcánicas y su génesis estaría asociada a un evento magmático del Cretácico Superior (86-79 Ma), representado por el emplazamiento de pórfidos granodioríticos, el desarrollo de la "Caldera Morro Hediondo" y de extensas zonas de alteración hidrotermal.

La gran mayoría de los depósitos identificados (aproximadamente 75) son vetas que poseen mineralización polimetálica de Au, Ag, Cu, Pb y Zn y que se localizan dentro, al oeste y sur de la "Caldera Morro Hediondo" (Fig. 2). Hacia el este del distrito existen, además, alrededor de una docena de vetas con mineralización exclusiva de cobre (Mina Los Maquis y otras, Fig. 2) y una chimenea de brecha también cuprífera (Dulcinea). La caja norte de este último cuerpo corresponde al "Dique Anular" (Fig. 2).

Del total de yacimientos existentes, el grupo de vetas El Bronce - Pedro de Valdivia constituye la principal mineralización del distrito y del cuadrángulo Petorca, escala 1:50.000, y de él se hace una breve descripción con sus características más relevantes (Camus, 1982). Dicho grupo se puede subdividir en dos sectores, que se ubican al norte y sur de la falla de la quebrada El Bronce, la cual ha producido el descenso del bloque norte en cerca de 200 m. Las vetas del sector sur contienen sólo Au-Ag y se asocian al Pórfido Petorca (86 ± 3 Ma). Por su parte, las vetas del bloque norte contienen Au-Ag-Cu-Pb-Zn y se relacionan a fallas radiales a la "Caldera Morro Hediondo" y a diques andesíticos, alojados a lo largo de ellas, por lo que se consideran ligeramente más jóvenes que las anteriores. A este último grupo pertenece la veta El Bronce, que es en la cual se centra la producción actual del distrito.

FIG. 2. Mapa geológico del distrito El Bronce y alrededores (basado en Borić, 1986). 1. Formación Cerro Morado (Cretácico Inferior alto): lavas, brechas y tobas andesíticas; escasas areniscas tobáceas. 2. Formación Las Chilcas (Cretácico Inferior alto - ¿Cretácico Superior?): brechas, conglomerados, areniscas tobáceas y escasas lavas andesíticas. 3. Formación Lo Valle (Cretácico Superior): 3a. Lavas y brechas andesíticas; 3b. Andesitas; 3c. Tobas de lapilli dacíticas. 4. Monzodioritas (Cretácico Inferior). 5. Pórfidos granodiorítico - dioríticos (Cretácico Superior). 6. Pórfidos andesíticos (Cretácico Superior). 7. Dioritas (Cretácico Superior - Terciario inferior). 8. Alteración hidrotermal. 9. Deslizamientos de suelo. 10. Depósitos no consolidados (Cuaternario). 11. Diques andesítico-dacíticos. 12. Falla, con indicación de bloque hundido. 13. Contacto geológico. 14. Rumbo y manto de estratos. 15. Yacimiento principal: en operación y paralizado. 16. Yacimiento menor: en operación y paralizado. 17. Edad K-Ar y error en millones de años. 18. Cota cumbre (m s.n.m.). 19. Cota topográfica (m s.n.m.).



El sistema El Bronce consiste en una estructura principal, de rumbo NS-N20°E y de aproximadamente 7 km de extensión, la cual contiene numerosas estructuras de tensión, lazos cimoides y empalmes asociados, lo que le asigna un carácter extremadamente complejo. A lo largo de este complejo estructural se localizan, rellenando los espacios dilatantes creados por los movimientos relativos producidos a lo largo de su rumbo y manteo, varios cuerpos lenticulares de formas irregulares, con dimensiones entre 100 y 600 m de largo, 200-400 m de profundidad y 1,0-20 m de potencia. Las rocas afectadas pertenecen a la Formación Cerro Morado y corresponden a brechas volcánicas, andesitas ocoíticas, tobas de lapilli y andesitas porfíricas.

La complejidad estructural descrita, resulta en cuerpos de mena lenticulares o "clavos", compuestos lateralmente por cuatro elementos estructurales, que son: a) Zona de mineralización maciza compuesta por cuarzo con más de 50% de pirita, calcopirita y blenda; b) Zona de enrejado de vetillas polidireccionales rellenas con cuarzo-pirita-calcopirita-blenda-carbonatos; c) Zona de mineralización diseminada principalmente con pirita; y d) Dique andesítico con vetillas de carbonatos y localmente pirita.

Los contactos entre las zonas macizas, de enrejado y diseminada son generalmente abruptos, pero en ocasiones se presentan graduales. Los diques andesíticos aparecen siempre con sus contactos definidos, pero, localmente, pueden presentarse fuertemente cizallados, sirviendo de superficies de desplazamiento de fallas post-minerales.

La mineralogía de las vetas la componen, en orden de importancia, pirita, blenda, calcopirita, galena, tenantita-tetraedrita, bornita, arsenopirita, pirrotina, hematita, magnetita. Las gangas son cuarzo (macizo, microcristalino, cristalizado-translúcido, amatista), anquerita, siderita y baritina.

El cuadro paragenético general, definido a la fecha, es el siguiente:

1. Etapa de cuarzo-pirita-oro;
2. Etapa de metales básicos con cuarzo-pirita-esferulita-calcopirita-oro-plata; y
3. Etapa de cuarzo amatista-baritina-carbonatos-pirita gruesa-clorita.

La alteración hidrotermal afecta fundamentalmente a las rocas donde se encajan las zonas de enrejado y diseminación y a los diques andesíticos. Se trata de alteraciones del tipo sericítico, argílico,

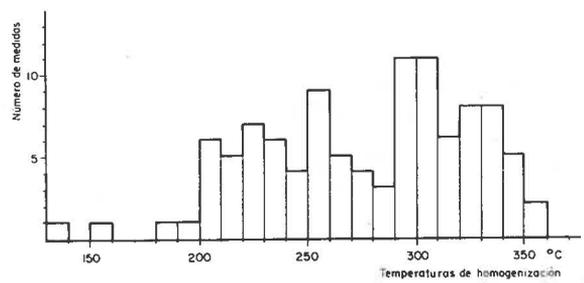


FIG. 3. Histograma que muestra las temperaturas de homogenización de 106 inclusiones fluidas, de origen primario y secundario, en los distintos niveles y secuencias paragenéticas del yacimiento El Bronce.

clorítico y de carbonatos. Estas últimas son muy desarrolladas en los diques andesíticos y forman una débil aureola en torno a las vetas.

A fin de caracterizar las soluciones mineralizadoras y el ambiente físico-químico en que se produjo la depositación de las vetas de El Bronce, se han realizado estudios de inclusiones fluidas y de isótopos estables, principalmente de azufre.

Los estudios de inclusiones fluidas (Skewes, 1986) indican que las temperaturas de homogenización, para todas las inclusiones, varían entre 150° y 340°C (Fig. 3); correspondiendo los valores más altos a las etapas iniciales de mineralización y las más bajas, a las tardías. La depositación del oro se produjo entre los 230° y 330°C. Las salinidades obtenidas varían entre 1 y 10%, en peso equivalente de NaCl (Fig. 4), ubicándose las menores (1-6% NaCl) hacia la superficie y las mayores (5-10% NaCl) en profundidad. Esta zonación de

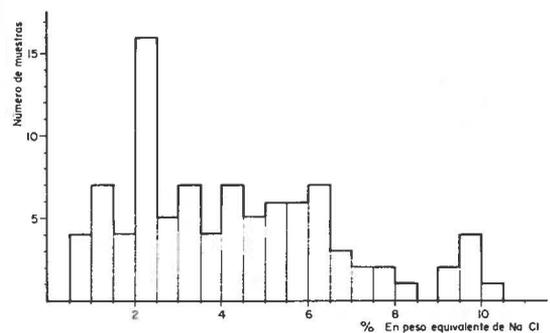


FIG. 4. Histograma que muestra las salinidades equivalentes al porcentaje en peso de NaCl de 93 inclusiones fluidas, de origen primario y secundario, en los distintos niveles y secuencias paragenéticas del El Bronce.

salinidad indica dilución de las soluciones hacia la superficie, producida probablemente como resultado de la incorporación de fluidos meteóricos en el sistema. La alta salinidad de las soluciones más profundas es sugerente de un aporte magmático en ellas.

Ebullición fue detectada sólo en los niveles más cercanos a la superficie actual, en sectores sin mineralización de metales preciosos. No se encontraron evidencias de ebullición en zonas con leyes importantes de oro, lo que descarta este mecanismo como el responsable de la depositación de metales preciosos. La mineralización probablemente se depositó como consecuencia de procesos de mezclas ("mixing") que produjeron dilución de

las soluciones hidrotermales. Como respuesta a esta dilución se desequilibran los complejos clorurados, produciéndose la precipitación de los sulfuros. Esto baja el contenido de S en las soluciones hidrotermales, lo que, a su vez, desestabiliza los tio-complejos de S, obligándolos a precipitar el oro que transportan.

Se estima, sobre la base de la información de las inclusiones fluidas, que los yacimientos se formaron a menos de 1.000 metros bajo la paleo-superficie (asumiendo condiciones hidrostáticas).

Datos preliminares de isótopos estables de azufre ($\delta^{34}\text{S} = +0,5$ a $+2,3\%$) sugieren un origen magmático para los sulfuros que componen la mineralización de estos depósitos (Ohmoto y Rye, 1979).

REFERENCIAS

- BORIC, R. 1986.** Geología del Cuadrángulo Petorca. Informe preliminar. Serv. Nac. Geol. Miner. (Inédito), 20 p. Santiago.
- CAMUS, F. 1982.** Evaluación geológica económica de los yacimientos de oro El Bronce y Pedro de Valdivia, Distrito Minero El Bronce de Petorca. Cía. Minera El Bronce (Inédito), 72 p. Santiago.
- OHMOTO, H.; RYE, R. O. 1979.** Isotopes of sulfur and carbon. In *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (Barnes, H.L.; ed.) 2nd Edition. John Wiley & Sons, p. 509-567. New York.
- PARADA, M. A.; RIVANO, S.; SEPULVEDA, P.; HERVE, M.; HERVE, F.; PUIG, A.; MUNIZAGA, F.;**
- BROOK, M.; PANKHURST, R. 1985.** Mesozoic and Cenozoic plutonic development in the Andes of Central Chile (30° 30' - 32° 30' S). In *Evolución magmática de los Andes* (Hervé, F.; Munizaga, F.; eds.) Comunicaciones, No. 35, p. 185-188.
- SKEWES, A. 1986.** Inclusiones fluidas en el sistema El Bronce. Cía. Minera El Bronce (Inédito), 20 p. Santiago.
- STEIGER, R. H.; JAEGER, E. 1977.** Subcommittee on geochronology; convention on the use of decay contents in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 36, No. 3, p. 359-362.

Este trabajo fue expuesto en la Sesión Extraordinaria de la Sociedad geológica de Chile, el 28 de Julio de 1986.