

ANTECEDENTES PARA UN MODELO GENETICO DEL YACIMIENTO EL SOLDADO, V REGION DE VALPARAISO, CHILE

CARMEN HOLMGREN D.

Compañía Minera Disputada de Las Condes S.A.,
Pedro de Valdivia 291, Santiago, Chile.

RESUMEN

El yacimiento de cobre El Soldado está ubicado en la Cordillera de la Costa de la V Región de Valparaíso, 120 km al noreste de Santiago.

Los cuerpos mineralizados están emplazados en rocas volcánicas, de composición ácida a intermedia, con intercalaciones sedimentarias pertenecientes a la Formación Lo Prado, de edad neocomiana, y evidencian un fuerte control, estructural y litológico. La mena es primaria, se dispone zonalmente y está compuesta por escasa piritita y abundante calcopirita y bornita, con calcosina y covelina subordinadas.

Estudios de isótopos de azufre de los sulfuros de las distintas zonas de los cuerpos mineralizados muestran valores de σS^{34} cercanos a 0. Estos valores contrastan con los obtenidos en escasos niveles de piritita framboidales y en pirititas singenéticas de los sedimentos, que alcanzan σS^{34} de hasta +28,4.

El análisis de inclusiones fluidas en cuarzo y calcita muestra fluidos mineralizados, altamente salinos y saturados. Las temperaturas de homogenización más altas registradas (alrededor de 257°C), no corregidas por presión, corresponden a las paragénesis de calcopirita-piritita. Las zonas bornito-calcosínicas registran temperaturas entre 200 y 220°C (no corregidas), y las vetillas tardías de calcita, estériles, también muy salinas, muestran temperaturas de alrededor de 100°C.

El mecanismo de precipitación de la mena es, preferentemente, por reacción de los fluidos mineralizados con la roca encajadora y, en segundo lugar, por el descenso de temperatura. No hay evidencias de ebullición.

Considerando la geología del yacimiento, su alteración hidrotermal y antecedentes como los ya mencionados, se postula un origen magmático hidrotermal de la mineralización, relacionado con la etapa de decaimiento de la actividad volcánica ácida en el sector. Se discuten otros modelos genéticos alternativos.

Palabras claves: Mina El Soldado, Modelo genético, Isótopos de azufre, Inclusiones fluidas, Formación Lo Prado, Neocomiano.

ABSTRACT

The El Soldado copper deposit is located in the Coastal Range of the Chilean Fifth Region of Valparaíso, 120 km northwest of Santiago.

The orebodies are emplaced in a volcanic pile with some sedimentary intercalations of the Lo Prado Formation (Neocomian age), with strong structural and lithological controls. The ore is primary, zonally disposed and it is composed of scarce pyrite and abundant chalcopyrite and bornite with minor chalcocite and covellite.

Stable sulphur isotope analyses of the sulfides of the orebodies show σS^{34} values close to 0. These values contrast with the ratios of some scarce framboidal pyrite levels and of the syngenetic pyrites of the underlying sediments whose σS^{34} values range up to +28.4.

Fluid inclusion analyses in quartz and calcite show highly saline, saturated mineralizing fluids. The highest homogenization temperatures recorded (around 257°C), not corrected for pressure, correspond to chalcopyrite-pyrite paragenesis. The bornite-chalcocite zones show temperatures between 200 and 220°C (not corrected), and late veinlets of barren calcite, also very saline, show temperatures around 100°C.

Wall rock reaction with the fluids is the preferred ore formation mechanism, secondarily a decrease of temperature. There is no evidence of boiling.

Considering the geology, hydrothermal alteration and the above mentioned background information, a hydrothermal magmatic origin of the mineralization is postulated as related to the waning stage of the acid volcanism of the area. Alternative genetic models are discussed.

Key words: El Soldado Mine, Genetic model, Sulphur isotopes, Fluid inclusions, Lo Prado Formation, Neocombian.

INTRODUCCION

Este trabajo pretende dar a conocer los resultados del análisis de isótopos de azufre y de inclusiones fluidas, realizados dentro de un programa de estudios de la Compañía Minera Disputada de Las Condes S.A., tendientes a obtener una mejor comprensión del modo de ocurrencia de los cuerpos mineralizados de El Soldado.

Con estos antecedentes y con el mejor conocimiento del área, alcanzado mediante los trabajos de su equipo de geólogos, se discute acerca del modelo genético más probable para el yacimiento El Soldado.

Los análisis de isótopos de azufre fueron realizados en Krueger Enterprises, Inc., U.S.A., en cinco muestras representativas de las diversas asociaciones de sulfuros. Las inclusiones fluidas fueron estudiadas por T. James Reynolds del Geologic Research Department, Exxon Minerals Company, U.S.A. en Denver, Colorado, bajo la supervisión de Jeanne P. Lawler. Comprende unas 400 mediciones de temperaturas de homogenización, de fusión del hielo y de fusión de NaCl, realizadas sobre trece muestras representativas.

MARCO GEOLOGICO

El yacimiento El Soldado está emplazado en rocas de la Formación Lo Prado (Piracés y Maksaeu, 1977), de edad cretácica inferior, la cual está constituida por una secuencia de rocas sedimentarias, volcánicas efusivas y piroclásticas. Esta formación constituye un homoclinal de rumbo general N-S e inclinación de 30° al este, que sobreyace, concordantemente, a la Formación Horqueta, de edad jurásica superior y de carácter volcanoclástico continental. Sobreyaciendo concordantemente a la Formación Lo Prado, se encuentra la Formación Veta Negra, que es de origen volcánico continental y de edad cretácica inferior. En El Soldado no se ha podido establecer claramente el límite entre las formaciones Veta Negra y Lo Prado. Este conjunto forma parte del desarrollo de un arco de islas entre el Jurásico Superior y el Cretácico Superior y constituye el flanco oeste de un sinclinorio ensiálico en Chile Central (Åberg *et al.*, 1984). El ambiente de depositación es transicional, entre marino somero y continental.

En la zona de la mina El Soldado, la Formación Lo Prado está constituida por la interestratificación de rocas piroclásticas, andesíticas, traquíticas y sedimentarias, las cuales están intruidas por filo-

nes de composición traquítica, andesítica y microdiorítica. Algunos filones traquíticos han sido reconocidos como ductos alimentadores de las coladas traquíticas correspondientes. Las coladas efusivas, por lo general, engranan lateralmente con rocas piroclásticas de la misma composición. El espesor de los miembros superior y medio de la Formación Lo Prado es de aproximadamente 550 m en El Soldado (Figs. 1, 2).

Los cuerpos mineralizados evidencian un fuerte control estructural, que determina sus formas irregulares, discordantes con la estratificación general. También hay un control litológico importante, que condiciona su desarrollo, más penetrante en traquitas que en andesitas y tobas.

La mena es primaria, se dispone zonalmente y está compuesta por escasa piritita y abundante calcopiritita y bornita, con calcosina, covelina y hematita subordinadas. Los minerales de ganga más comunes son calcita, cuarzo, clorita y albita (Ruge, 1985).

ROCA HUESPED PRINCIPAL

La principal roca huésped es la traquita. Esta

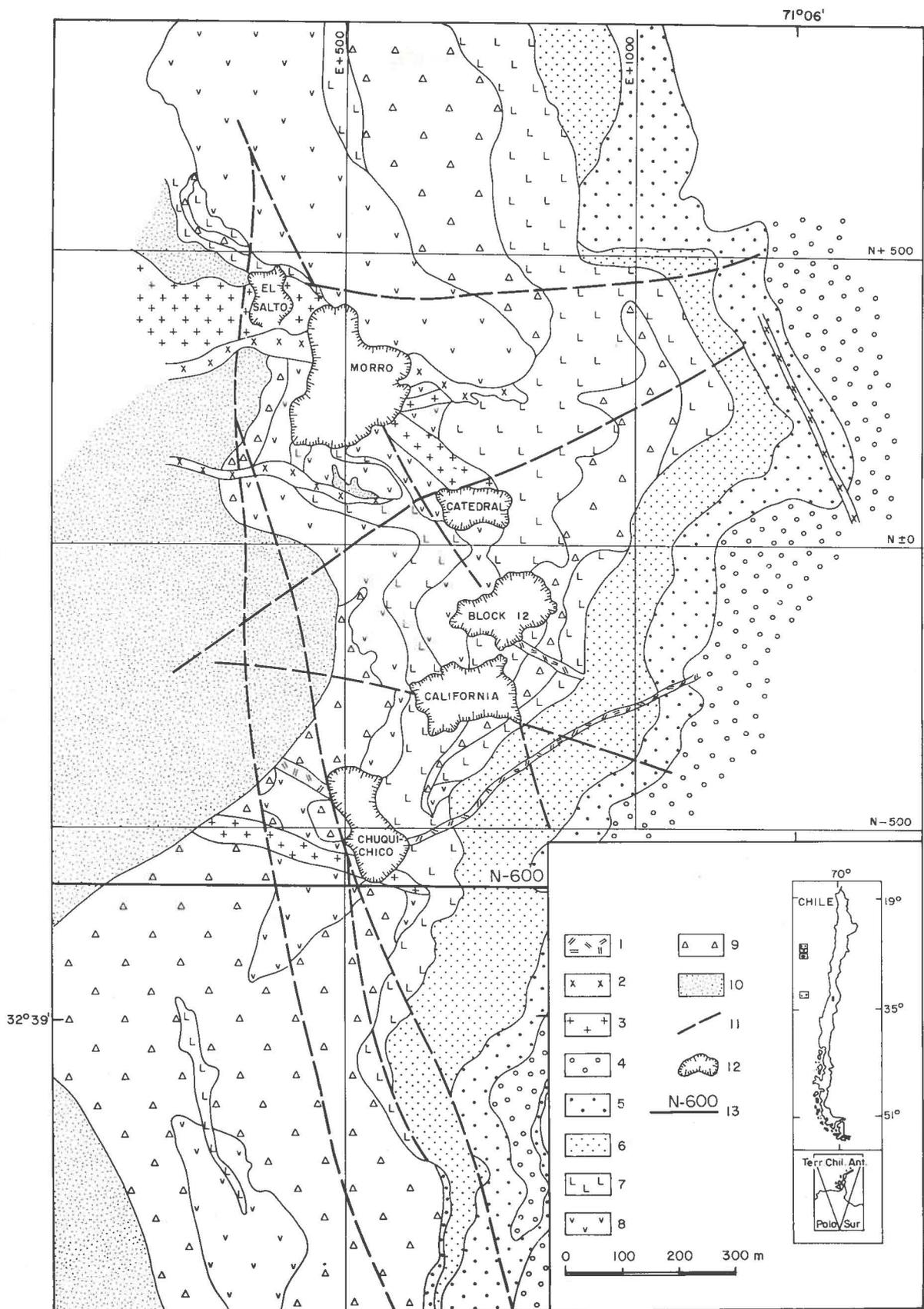


FIG. 1. Geología del yacimiento El Soldado (Ruge, 1985). Leyenda: **Intrusivos:** 1. Filón microdiorítico; 2. Filón andesítico; 3. Filón traquítico; **Formación Veta Negra:** 4. Andesita ocoítica; 5. Brechas volcánicas; 6. Andesitas; **Formación Lo Prado:** 7. Tobas, brechas volcánicas o de flujo; 8. Traquitas; 9. Andesitas; 10. Sedimentos calcáreos. **Simbología:** 11. Falla; 12. Caserones. 13. Sección geológica por N-600.

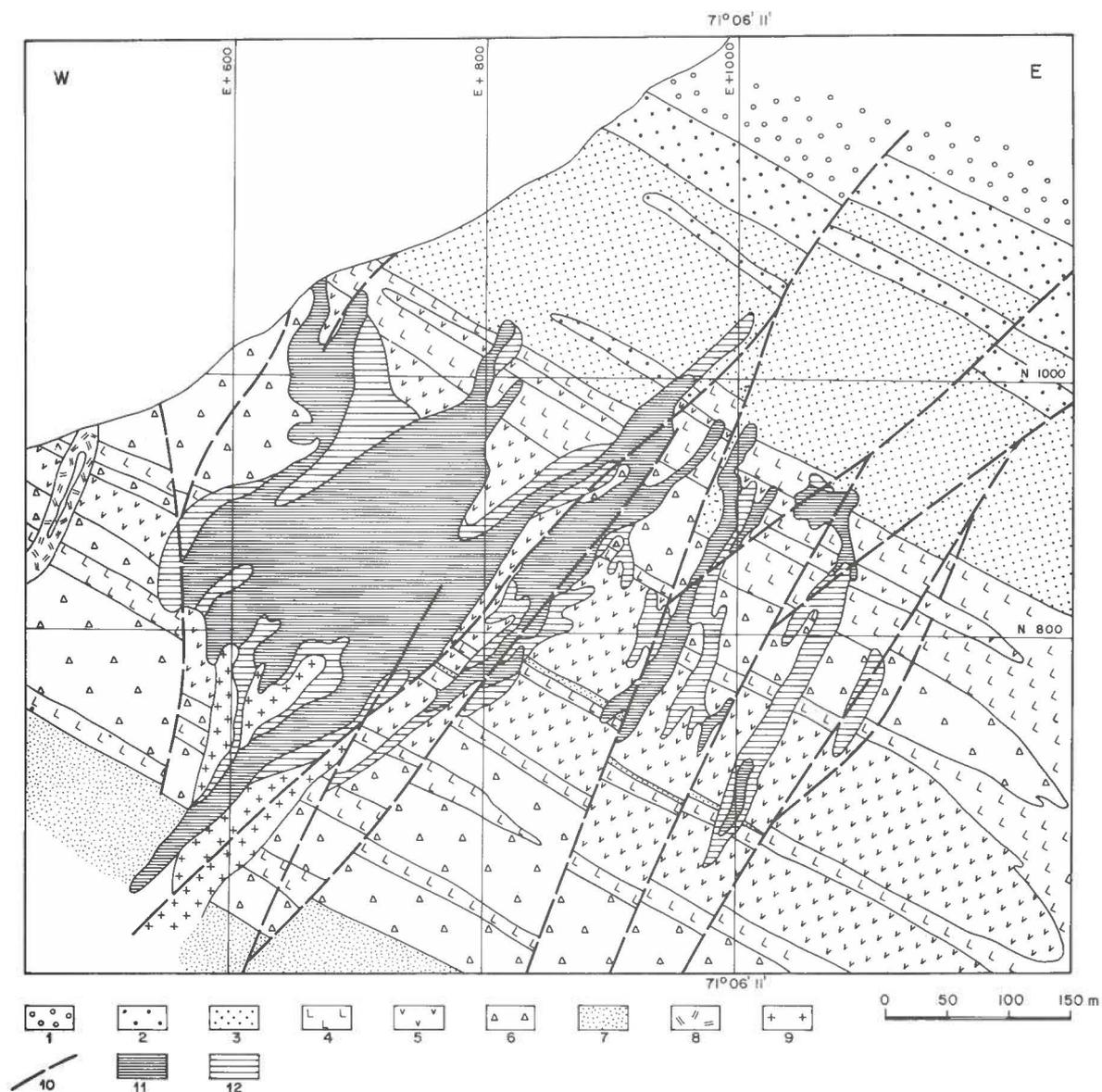


FIG. 2. Sección geológica simplificada, N-600, que muestra la secuencia estratigráfica y disposición de los cuerpos mineralizados (Ruge, 1985). Leyenda: Formación Veta Negra: 1. Andesitas ocoíticas; 2. Brechas volcánicas; 3. Andesitas; Formación Lo Prado: 4. Tobas, brechas volcánicas o de flujo; 5. Traquitas; 6. Andesitas; 7. Sedimentos calcáreos; Intrusivos: 8. Filón microdiorítico; 9. Filón traquítico. **Simbología:** 10. Falla; 11. Ley de corte 1,2% Cu total; 12. Ley de corte 0,8% Cu total.

es una roca compuesta de fenocristales de albita (An_{2-5}) en una masa fundamental formada por microlitos de albita; compitiendo por el espacio con los microlitos se observan feldespato potásico anhedral de grano fino y cuarzo muy subordinado. Toda la textura tiene apariencia primaria (Figs. 3, 4). Estudios cuantitativos con microsonda electró-

nica, realizados por la autora en el Geological Research Department de Exxon Minerals Co., confirmaron que no hay núcleos o zonas más cálcicas dentro de los feldespatos. Estas rocas tienen similitudes con lo descrito para algunas rocas volcánicas de Suiza por Pfrang *et al.* (1982), donde se enfatiza el origen primario de la albita.

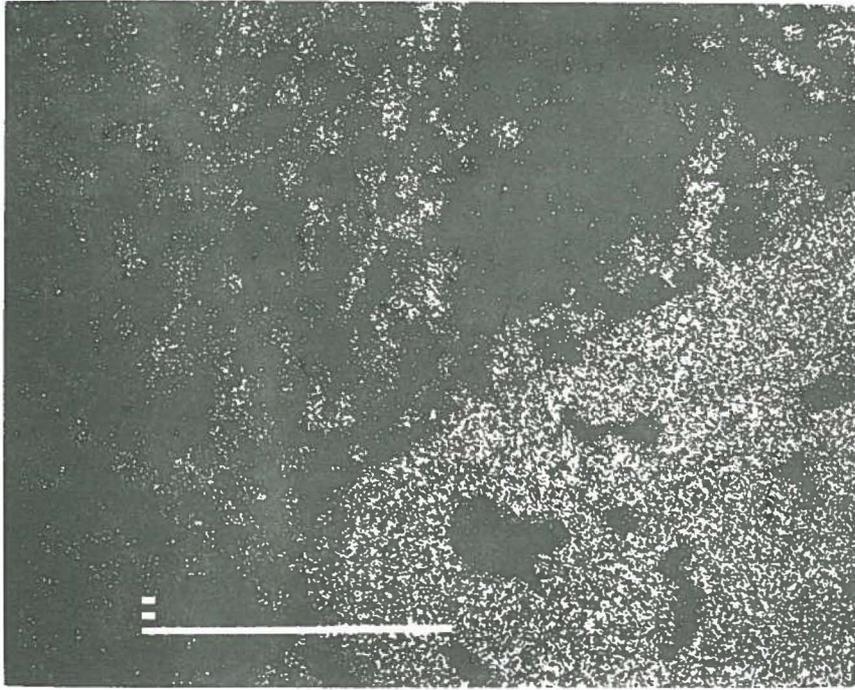


FIG. 3. Radiación $K\alpha$ característica de Na, mostrando un fenocristal de albita (derecha) y microlitos de albita en una traquita. En negro, dentro del fenocristal hay calcita. Copia de foto Polaroid obtenida en microsonda CAMECA, Exxon Geological Research, 1984. Escala: 100 micrones.

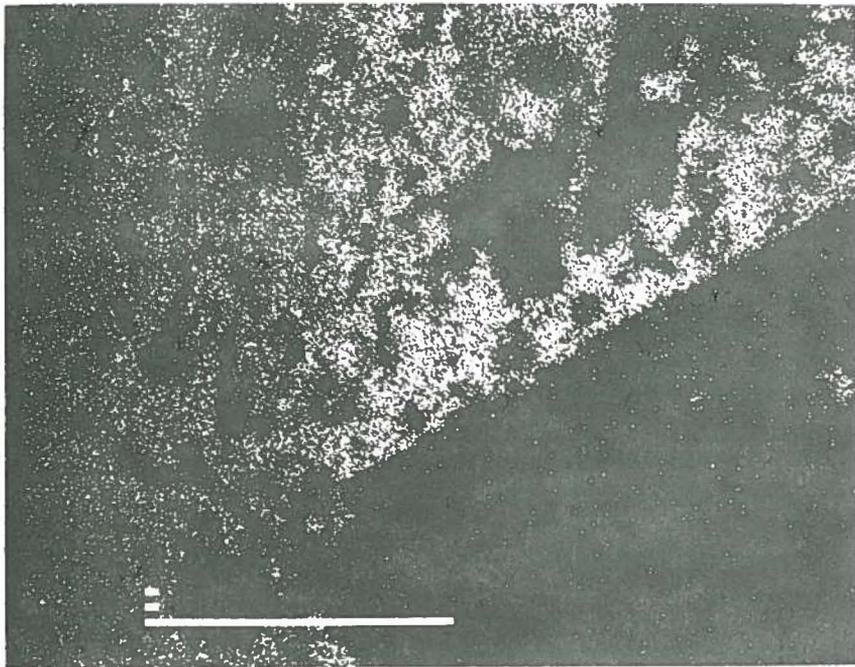


FIG. 4. El mismo sector anterior mostrando $K\alpha$ característica del potasio. El feldespato potásico se distribuye en la masa fundamental, entre los microlitos de albita. Escala: 100 micrones.

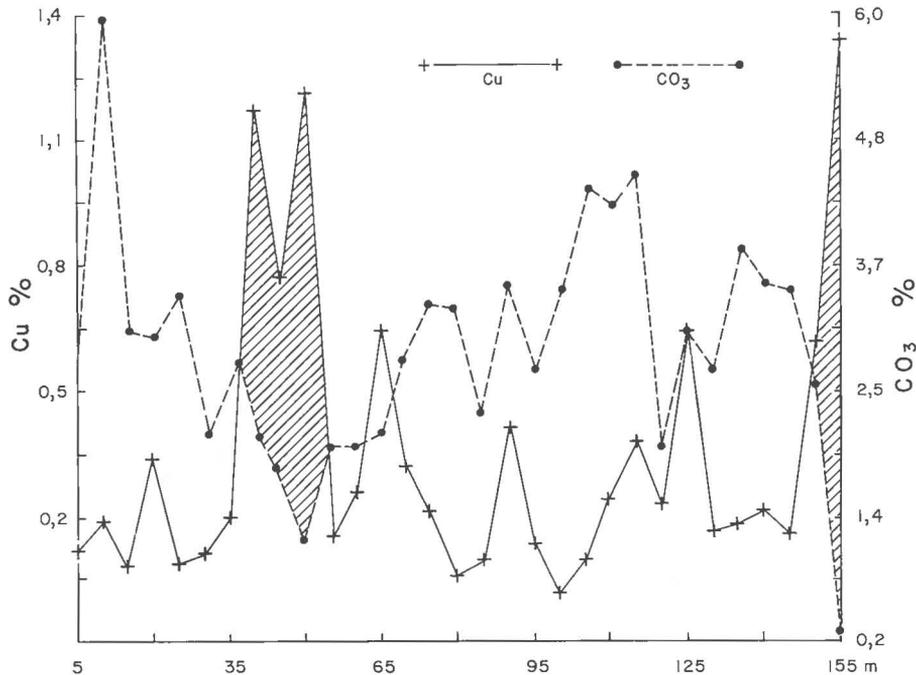


FIG. 5. Variación de los contenidos de Cu y CO_3 , en un mismo sondaje. Cada muestra es una composición de 5 m.

Son escasos los relictos sugerentes de haber sido minerales ferromagnesianos. Como minerales accesorios aparecen magnetita y zircón. Localmente, se conservan relictos de vidrio de color verde, con texturas perlíticas que, a la microsonda, revelaron una composición cercana a la albita, con alto contenido en Na.

La roca traquítica se presenta en múltiples variedades texturales, correspondientes a términos desde intrusivos hasta ignimbríticos, pero con composición química notablemente homogénea, incluso a kilómetros de distancia y en las distintas coladas. Las relaciones de elementos inmóviles Zr/TiO_2 versus SiO_2 (Ahumada, 1985) demuestran que esta roca no pudo ser una andesita posteriormente albitizada, como postularon algunos autores (Olca y Alarcón, 1975) y que, probablemente, corresponde al producto de un magma original riolítico-dacítico anormalmente alcalino, pese a que la roca actual no presenta el cuarzo que sería de esperar.

Sea cual fuere el origen de una roca tan alcalina, la presencia de albita no indica necesariamente proximidad a la zona mineralizada. Las traquitas del distrito pueden tener alto contenido en Na y ser estériles respecto de Cu. La traquita no tiene

las texturas y mineralogía típicas de espilitas, y tampoco es de esperar este producto por medio de la alteración hidrotermal solamente. Sin embargo, también carece de los elementos trazas característicos de las rocas alcalinas propiamente tales.

Las rocas andesíticas intercaladas en la misma secuencia volcánica también son anómalamente alcalinas, condición dada por la plagioclasa modal con promedio An_{32} y por un contenido relativamente alto de K_2O , y no por procesos de albitización (Ahumada, 1985).

Todos estos antecedentes apuntan hacia un magmatismo peculiar, más que a transformaciones por medio del metamorfismo de carga de las facies documentadas para las formaciones Veta Negra y Lo Prado (Levi, 1970).

ALTERACION HIDROTERMAL

La alteración hidrotermal en El Soldado se manifiesta, principalmente, por procesos de carbonatación, cloritización, silicificación y albitización. No se considerará la hematización como alteración hidrotermal, porque su desarrollo más llamativo es el que aparece completando tardíamente la paragénesis de los sulfuros de Cu, casi siempre con el

aspecto de haberse formado a partir del hierro sobrante del reemplazo hipogénico de los sulfuros de cobre, constituyendo metacristales menudos sobre los mismos sulfuros. Ciertamente existe algún grado de martitización de magnetita y hematita secundaria por oxidación, pero, en general, no es demasiado relevante.

La carbonatización es el proceso más notable en el yacimiento, con un bien desarrollado halo en las traquitas, sumamente penetrante y, además, en múltiples generaciones de vetillas. En la figura 5 se observa el incremento de CO_3 en el halo externo de los cuerpos mineralizados y su disminución en la zona de alto porcentaje de cobre, demostrando que la carbonatización antecedió a la depositación de la mena.

La cloritización es un proceso que está mejor expuesto en andesitas y tobas. Se trata de cloritas ferromagnesianas del tipo picnocloritas. Sólo algunas cloritas de ganga en vetillas alcanzaron una composición química limítrofe con ripidolita.

La silicificación más importante se asocia a las

zonas centrales, borníticas, de los cuerpos mineralizados.

La albitización se manifiesta en forma de vetillas y parches de los fenocristales de albita "primaria", sin la turbidez de ésta última. En partes, se presenta en vetillas con escaso sulfuro de Cu asociado. En andesitas y tobas también puede rellenar vesículas. Tiene un desarrollo local, no penetrante. Ahumada (1985) describió albitas con estructuras cristalinas de alta y baja temperatura, encontradas entre la albita "primaria" y las características de la albita posterior, considerada secundaria.

La sericitización tiene un desarrollo muy local, preferentemente en andesitas y en algunos filones tardíos.

La neoformación de esfeno y de otro titanato desconocido, también constituye un efecto de alteración hidrotermal llamativo en el halo externo de los cuerpos mineralizados, bajando su porcentaje en las zonas de alto contenido en cobre (Fig. 6).

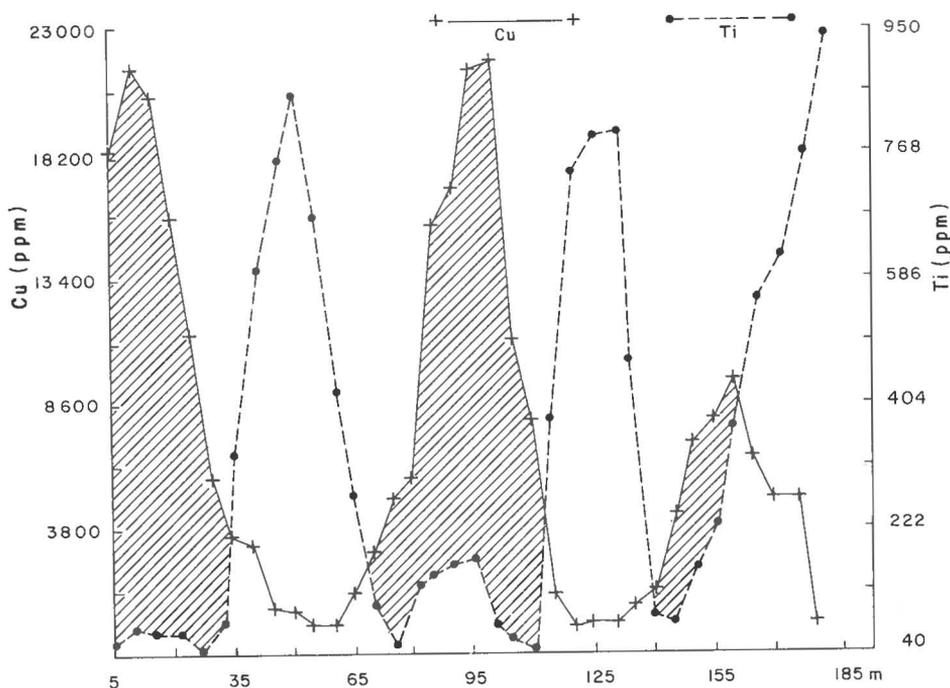


FIG. 6. Variación de contenido de Cu *versus* Ti (soluble al ataque ácido) en un mismo sondaje. Este Ti correlaciona bien con el porcentaje de minerales secundarios tipo esfeno. Cada análisis representa una muestra de composición de 3 m.

ESTUDIO DE ISOTOPOS ESTABLES DE AZUFRE

Se seleccionaron muestras representativas de las distintas asociaciones de sulfuros del yacimiento:

- Sulfuros de las principales zonas de los cuerpos mineralizados; zona de bornita predominante (Muestra D-2), zona de calcopirita y zona de calcopirita y pirita (Muestra D-1).
- Piritas framboidales, que se disponen en forma muy local, en algunos niveles estratigráficos; por lo general, son estériles o con mineralogía de cobre sobreimpuesta, en aquellos sectores donde estructuralmente son cortadas por cuerpos mineralizados (Muestra D-4).
- Sulfuros finamente diseminados en sedimentos calcáreos de grano fino y con abundante materia orgánica presente. Es mayoritariamente pirita con cantidades menores de calcopirita. Infrayacen a las andesitas y traquitas del yacimiento y se consideran parte del Miembro Patagua de la Formación Lo Prado (Muestra D-5).

TABLA 1. Análisis de Isótopos de Azufre

No. Muestra	Descripción	σS^{34}
D-1	Zona de calcopirita-pirita	- 5,2
D-2	Zona de bornita	+ 1,5
D-3	Zona de calcopirita	- 0,3
D-4	Pirita framboidal	+28,4
D-5	Pirita de sedimentos	+7,8

$$\sigma R \text{ muestra } \text{‰} = \left[\frac{R \text{ muestra}}{R \text{ estándar}} - 1 \right] \times 1000$$

S^{34}/S^{32} estándar de troilita de Cañón Diablo
 $R \text{ estándar} = 0,0450045$

Comunicación escrita de Krueger Enterprises Inc., Geochron. Laboratories Division, U.S.A.

De los resultados de σS^{34} (Tabla 1) se puede concluir que los sulfuros que conforman los cuerpos mineralizados en las zonas de bornita, calcopirita y calcopirita-pirita, tienen razones isotópicas cercanas a 0. Esto indica un muy probable origen magmatismo del azufre, relacionado, tal vez, con magmatismo ácido (Sasaki *et al.*, 1984). Las distintas variaciones de temperatura y de fugacidad de

oxígeno, que acompañan a la precipitación de cada paragénesis, son las responsables de las también discretas variaciones de los σS^{34} de las zonas de los cuerpos mineralizados (Ohmoto, 1972).

Estos resultados son similares a los obtenidos por W. Chávez (comun. verbal) en 1984, para el yacimiento Mantos Blancos y a los informados por Sasaki *et al.* (1984), para una serie de yacimientos de cobre estratoligados, como Buena Esperanza, Carolina de Michilla, Mantos Blancos y El Soldado, entre otros. También resultan similares a los mencionados para los yacimientos tipo pórfido cuprífero.

La pirita framboidal no parece tener relación alguna con el estadio principal de la mineralización cuprífera. Su origen más probable es biogénico, con participación de azufre de agua marina. Además, por sus relaciones texturales y de contacto, la pirita es anterior a la mineralización de cobre. Algunos geólogos discuten acerca de su posible papel como fuente de azufre para que, mediante celdas convectivas de aguas meteóricas, se originen finalmente los cuerpos mineralizados. Sin embargo, el resultado de la composición isotópica de S impide postular que, por un proceso de fraccionamiento, haya alcanzado las razones isotópicas actuales de los sulfuros de Cu. Esto requeriría una oxidación previa a su removilización, tan amplia e intensa, que tendría que quedar evidencias de este proceso en la roca (Spiro, 1984; comun. verbal). Por otra parte, la pirita de los sedimentos calcáreos, inmediatamente infrayacentes a las rocas huéspedes del yacimiento, muestra un σS^{34} de +7,8, apuntando también a una génesis no magmática del azufre.

Debido a que todas las muestras analizadas se encuentran muy cercanas espacialmente, resalta el hecho de una ausencia de homogenización de los isótopos de azufre del sector, que podría haberse esperado si el yacimiento tuviese un origen en el metamorfismo de carga (Hoefs, 1973).

En consideración a que los sulfuros no proceden de un solo punto o asociación en equilibrio, no se intentaron aproximaciones termométricas, utilizando las razones isotópicas de azufre de las distintas asociaciones mineralógicas.

ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS

Se escogió una serie de muestras, que cubriesen los principales cuerpos mineralizados del yacimiento, procedentes de distintos horizontes estratigráficos y de distintas zonas paragenéticas de un mismo cuerpo. Asimismo, se tuvo en mente obtener muestras de ganga claramente asociada a la mena y también de vetillas estériles muy tardías. Para fines comparativos, se estudiaron muestras de la mina Veta del Agua, vecina a El Soldado, y Punta del Cobre, III Región. La tabla 2 detalla la relación y características de las muestras estudiadas.

RESULTADOS

- Los datos de congelamiento indican que las inclusiones son de alta salinidad. Las temperaturas de fusión del hielo varían, predominantemente, entre -20°C y -55°C , indicando no sólo una alta salinidad sino la presencia de sales divalentes de bajo punto de fusión eutéctico como el CaCl_2 . Esto es sugerido por Yanatieva (1946) según su diagrama triangular (Fig. 7). El comportamiento de congelación sugiere que el CaCl_2 pueda ser componente importante en estas inclusiones fluidas. Por otra parte, la presencia de cristales hijos (daughter crystals) de NaCl en ciertas inclusiones, indica que al menos algunas de ellas están también saturadas en NaCl .
- La presencia de cristales tipo cristales hijos (daughter crystals) de NaCl fundidos hasta 244°C , indicaría una máxima concentración de NaCl de 34% en peso. Esta temperatura correspondería a la temperatura mínima de formación de la halita.
- Por consiguiente, los fluidos mineralizados son del sistema $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$; sin embargo, el contenido de CaCl_2 no sobrepasó el 40% en peso, puesto que, de haber sido así, encontraríamos también cristales hijos (daughter crystals) de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, según el diagrama de la figura 8 (Linke y Seidell, 1965).
- Las salinidades son muy altas para todas las paragénesis y persistieron con alta salinidad hasta bastante tiempo después de la formación del yacimiento, como lo evidencian los análisis en vetillas de calcita tardías estériles.

Una síntesis de los datos de temperaturas de homogenización, no corregidos, de las inclusiones primarias muestra:

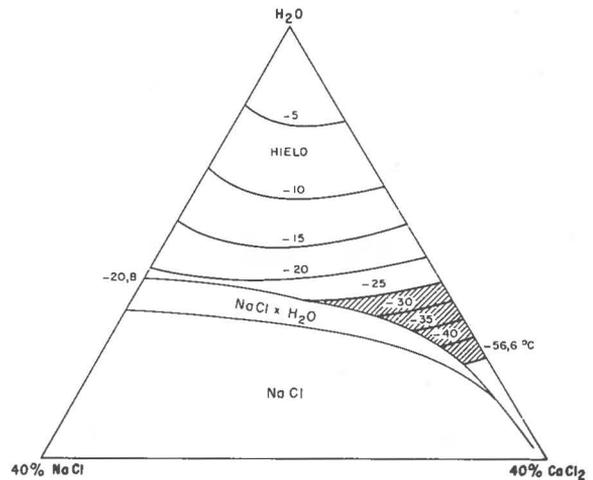


FIG. 7. Sistema NaCl , CaCl_2 , H_2O (Según Yanatieva, 1946). La zona sombreada representa las salinidades de las inclusiones fluidas de El Soldado.

Calcita turbia temprana	98-230°C
Cuarzo	105-257°C
Calcita estéril tardía	82-104°C

Las temperaturas de homogenización más altas corresponden a muestras de la paragénesis calcopirítico-pirítica. Los intervalos de temperaturas intermedias corresponde a la asociación bornito-calcosínica y las temperaturas más bajas se registran en las vetillas estériles tardías. Las temperaturas de homogenización pueden variar dentro de un mismo cristal entre 100 y 250°C (paragénesis calcopirítica). Generalmente, las poblaciones de menor temperatura son atrapadas en las zonas de crecimiento iniciales, subiendo en las zonas más tardías.

No hay evidencias de ebullición, puesto que no se encuentran inclusiones de vapor en ninguna parte del sistema.

No se observan variaciones obvias de temperatura o salinidad entre muestras situadas en distintos horizontes estratigráficos, sino que parecen estar zonadas respecto de distintos centros o conductos de ascenso de soluciones.

Debido a que la edad de la mineralización no se conoce en detalle, las correcciones de presión para El Soldado sólo pueden ser estimadas en forma aproximada. En la tabla 3 se da a conocer el ejercicio de corrección realizado, suponiendo que la

**TABLA 2. ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS, EL SOLDADO
MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE ZONAS DE CUERPOS MINERALIZADOS**

No. ORDEN	No. MUESTRA	SECTOR MINA	ASOCIACION PARAGENETICA	GANGA ESTUDIADA	ROCA ENCAJADORA
1	MP-420	Morro Inferior Nivel + 50	Zona de calcopirita	Cuarzo y calcita	Traquita, con vetillas anchas de cuarzo + calcita + calcopirita
2	MP-422	Morro Inferior Nivel + 100	Zona de bornita-calcopirita	Cuarzo y calcita	Traquita con vetas de cuarzo + calcita + chalcantita
3	MP-423	Morro Inferior Nivel + 100	Brecha en zona de falla con calcita y especularita	Calcita	Traquita
4	MP-424	Filo Nivel +100	Zona de bornita + calcita	Cuarzo y calcita	Andesita con vetas de cuarzo + calcita
5	MP-428	Arauco Sur-Central Nivel +29	Zonas calcopirita-bornita	Calcita	Traquita
6	MP-430	Block AB Nivel + 50	Zona de bornita	Cuarzo y calcita	Andesita
7	MP-431	Sondaje FF-12 Caserón 380 Nivel + 5	Zona de bornita	Calcita	Andesita
8	MP-439	Sta. Clara Inf. Caserón 380 Nivel + 5	Zona de pirita calcopirita	Cuarzo y calcita	Andesita? con vetas de calcita, epidota y cuarzo con pirita-calcopirita
9	MP-481	Mina Resguardo Punta del Cobre*	Asociación de pirita-calcopirita	Calcita	Veta tardía de calcita estéril cortando albitófiro mineralizado
10	MP-482	Sector Taller Nivel ±0	Vetilla estéril tardía	Calcita	Andesitas
11	MP-483	Block 12 Nivel ±0	Vetilla tardía	Calcita	Andesitas
12	EX-1	Mina Veta del Agua*	Zona de bornita-calcita	Calcita	Brecha andesítica
13	EX-2	Mina Veta del Agua*	Estéril	Calcita	Vetas anchas de calcita en brecha andesítica

* Muestras de otros yacimientos incluidas para fines comparativos.

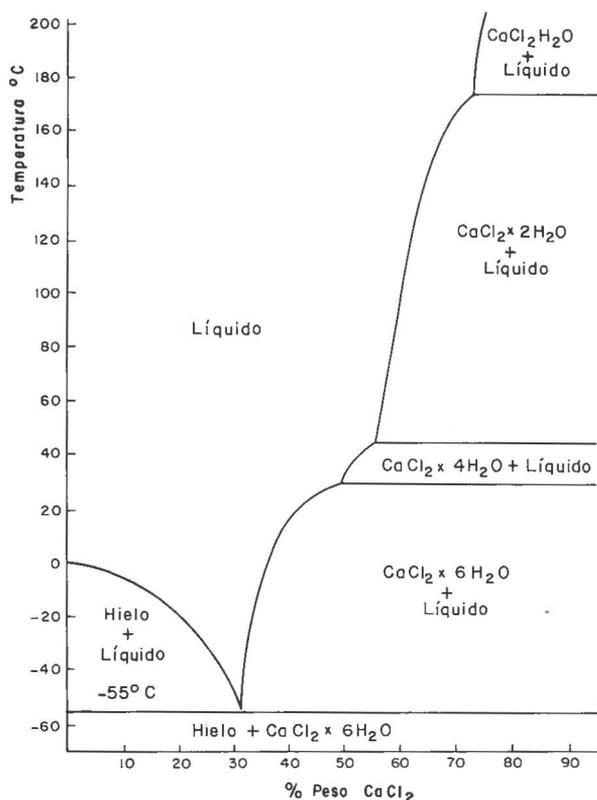


FIG. 8. Sistema CaCl₂, H₂O (Linke y Seidell, 1965).

Formación Veta Negra se encontraba ya depositada sobre la parte superior de la Formación Lo Prado (de donde proceden las muestras). Este ejercicio es válido puesto que hay una ausencia de discordancia entre ambas formaciones y se estima una acumulación rápida de la secuencia volcánica. Daticiones Rb-Sr sugieren que las lavas experimentaron metamorfismo de carga poco después de su ex-

trusión (Åberg *et al.*, 1984). De esta forma, se puede ejemplarizar acerca de las condiciones y temperaturas de formación para un ambiente metamórfico de carga, otra de las tesis genéticas que se han propuesto para este tipo de yacimientos.

Si la mena se hubiese depositado contemporáneamente con la Formación Lo Prado, en la parte superior, donde las rocas han sido interpretadas como características de un ambiente marino muy somero (documentado por las intercalaciones calcáreas fosilíferas), se tendría que evidenciar alguna mezcla con fluidos meteóricos o ingesión de agua marina produciendo fluidos de salinidad notablemente menor que los verificados. También sería muy factible encontrar evidencias de ebullición.

Por otra parte, algunos antecedentes mineralógicos sugieren la presencia de condiciones de metamorfismo de carga (facies prehnita-pumpellyita) previas o, al menos, vigentes durante la precipitación de la mena. Un estudio de cloritas con microsonda electrónica mostró que las cloritas de distribución aparentemente regional, son diabantitas y las relacionadas con la mineralización son picnocloritas. En muestras en que coexisten ambas cloritas, las relaciones texturales sugieren que las diabantitas son cortadas por picnocloritas.

La mena finamente diseminada en las traquitas sugiere, de preferencia, condiciones de presión litostática durante la mineralización. Sin embargo, las muestras proceden esencialmente de relleno de fracturas, puesto que ahí se desarrollan los mejores cristales de ganga para este tipo de estudio. En todo caso, se tabularon los resultados sin corregir y corregidos, para condiciones de presión hidrostática y litostática (Tabla 3).

DISCUSION DE UN MODELO GENETICO PARA EL SOLDADO

Varias posibilidades genéticas han sido propuestas por diversos autores (Ruiz *et al.*, 1971; Camus, 1980) para la mina El Soldado. Algunas quedan automáticamente descartadas a partir de los resultados ya expuestos, por lo que sólo discutiremos aquéllas que, de alguna manera, se podrían compatibilizar con estos resultados.

a. Origen epigenético, asociado a un magmatismo ácido subvolcánico, pero relativamente profundo.

La fuente de las soluciones hidrotermales sería

el producto de la etapa de decaimiento de la actividad volcánica ácida, en un régimen ahora compresivo, que permitiría la acumulación de soluciones residuales, las que aportarían principalmente S, H₂O, CO₂ y algunos metales. El Cu podrían provenir, al menos en parte, de la lixiviación de la secuencia volcánica andesítica y de los sedimentos infrayacentes. Esto está sugerido no sólo por los "backgrounds" de Cu de estas rocas, sino también por las razones Co/Ni y Zn/Pb, entre otros elementos trazas de la mena, cuyos va-

TABLA 3. ESTUDIO DE INCLUSIONES FLUIDAS, EL SOLDADO
SINTESIS DE RESULTADOS DE ALGUNAS MUESTRAS REPRESENTATIVAS

No. MUESTRA	ZONA MEDIDA	TEMP. MAX. NO CORREG. °C	CORREC. POR LITOST. °C	CORREC. POR HIDROST. °C	OBSERVACIONES
MP-420	Zona de crecimiento interior en cuarzo	119	275	175	Densidad 1,1
	Zona de crecimiento interior en cuarzo	141	295	205	
	Zona de crecimiento exterior en cuarzo	234	400	305	Densidad 1,0
	Zona de crecimiento exterior en cuarzo	257	420	320	
	Zona interior de calcita	230	400	295	
	Zona exterior de calcita	170	345	244	
MP-428	Zona de alta bornita	145	295	205	
MP-430		151	310	220	
MP-481	(Temp. O -32eC)	254	—	—	Mina Resguardo, Punta del Cobre
MP-439	Zona de crecimiento interior en cuarzo	151	310	215	Densidad 1,1
	Zona de crecimiento exterior en cuarzo	234	405	300	Densidad 1,0
MP-482		104	260	175	
EX-2		105-124	250	165	Mina Veta del Agua
		194-249	395	305	
EX-1	Una zona de crecimiento	113-137	240	155	Mina Veta del Agua
	Segunda zona de crecimiento	196-202	340	250	Mina Veta del Agua

Premisas de corrección, mina El Soldado. Corrección por presión para condiciones litostáticas: 1856 bars (gradiente 270 bars/km). Para condiciones hidrostáticas: 686 bars. Espesor de la columna de roca: 7 km. Temperaturas en grados Celsius.

lores recuerdan los de estas mismas rocas. Esto sería compatible con la extremada salinidad de las soluciones, con los valores de los isótopos de azufre, la ausencia de ebullición (fuente relativamente profunda), con el bajo gradiente de temperatura en las inclusiones fluidas del área, y con la presencia de material bituminoso, movilizado desde los sedimentos infrayacentes a través de las brechas de fallas mineralizadas. La salinidad extremadamente alta de las soluciones descarta la posibilidad de mezcla con aguas meteóricas y/o marinas. Sólo no puede descartar la mezcla con fluidos metamórficos (como se discutirá bajo la hipótesis de origen metamórfico).

La traquita se constituyó en una buena **roca huésped** por su patrón de fracturamiento, permeabilidad y reactividad. Es probable que las andesitas hayan desarrollado más clorita, inicialmente, en sus planos de fracturas, lo que las hizo impermeables y menos reactivas (McKnight, 1983).

La relación espacial de los grandes cuerpos mineralizados con los filones alimentadores traquíticos se interpreta como una relación estructural. El patrón de fallas que sirve de conductos a las soluciones, en parte, se sobreimpuso paralelamente a las direcciones de emplazamiento de estos diques, que habrían representado planos de debilidad preformados, respecto de la cámara magmática.

El **mecanismo de precipitación** de la mena más probable, considerando los resultados del análisis de inclusiones fluidas, es, en primer lugar, la reacción de los fluidos con la roca encajadora. Así debió precipitar la calcita en primer lugar y, posteriormente, los fluidos que transportaban el Cu como iones complejos clorurados, disminuyeron su pH o bien la concentración de Cl^- al reaccionar éstos con su fuerte ligante Ca^{2+} , de este mismo carbonato, precipitando el metal (Barnes, 1979). Un segundo lugar podría atribuirse al descenso de la temperatura, documentado por las discretas diferencias de temperaturas de cada paragénesis. Por último, y en sentido general, los cambios de potencial de reducción-oxidación podrían también haber influido en la localización final de la mena, siempre emplazada en los horizontes reducidos, infrayacentes a los estratos oxidados, que representan los sedimentos y rocas volcánicas rojizas de la base de la Formación Veta Negra, interpretados como de ambiente continental.

La alternativa más obvia es relacionar la minera-

lización a intrusivos del mismo magmatismo anómalamente alcalino como el descrito. Este magma peculiar, con características de muy hidratado (a juzgar por el tipo de vidrio presente) no pudo fijar el Ca en los feldespatos y, por lo tanto, carbonatizó extensivamente las rocas de sus alrededores y generó, al final, la anomalía de cobre. La otra alternativa, menos probable, es relacionarla con un intrusivo granodiorítico del tipo que se describe regionalmente, el que no estaría expuesto cerca de la mina, y que se supondría emplazado bajo el Miembro Patagua de la Formación Lo Prado.

La **edad de la mineralización**, según cualquiera de estas alternativas sería aptiano-albiana, es decir, hacia finales de la depositación de la Formación Veta Negra, suponiendo que ésta sea la edad correcta de dicha formación.

b. Origen exhalativo-sedimentario o una variante de sulfuro macizo abortivo.

Compartimos lo discutido por Sato (1984), en el sentido de que no hay pruebas elocuentes que sostengan esta tesis, particularmente para El Soldado. La mena fue emplazada, con claro control estructural, en secuencias marino-continuales, sin evidencias de exhalitas, ni verdaderos depósitos mantiformes de mineral, ni ningún otro elemento considerado como típico en cuanto a elementos trazas: características isotópicas de azufre, presencia de baritina, u otros. En El Soldado sólo hay sectores muy locales con jaspes o piritas framboidales, siempre pre-mineralización cuprífera o estériles, que documentan más bien un ambiente de depositación y no un evento de mineralización. Si, además, los cuerpos mineralizados de El Soldado fuesen los conductos inferiores de un sulfuro macizo, probablemente, alguna mezcla con agua de mar se documentaría en las inclusiones fluidas y sería más factible encontrar evidencias de ebullición en un mar somero, como el que documentan las intercalaciones fosilíferas.

Como se ha dicho, no hay evidencias de una discordancia de erosión entre las formaciones Lo Prado y Veta Negra, como para haber erosionado completamente una eventual mineralización mantiforme asociada.

c. Origen Metamórfico

Cada vez más autores se inclinan por un posible origen metamórfico de carga para este tipo "El Soldado" de yacimiento (Sato, 1984).

Sin embargo, en el área en estudio no hay una bien documentada facies de esquistos-verdes, en los miembros inferiores de la Formación Lo Prado, capaz de haber generado efectivamente estos fluidos y que habrían migrado, luego, hacia las unidades litológicas en que actualmente se encuentra la mineralización. En el área de El Soldado sólo se ha documentado la facies prehnita-pumpellita con laumontita.

Pese a que T.J. Shepherd del British Geological Survey, London (Comun. verbal, 1984) opinó que la composición de las inclusiones fluidas de El Soldado tienen características típicas de fluidos con una historia prolongada de interacción con sus rocas huéspedes (como las observadas en yacimientos tipo Mississippi Valley), en la literatura no se han descrito salinidades para este tipo de metamorfismo, como las documentadas en este estudio. Se ha informado acerca de inclusiones fluidas tan salinas como éstas, atrapadas en cuarzo asociado al metamorfismo retrógrado de rocas metamórficas de la facies anfibolita y esquistos verdes (Crawford *et al.*, 1979).

Crawford (1981) informó sobre casos excepcionales, en sedimentos carbonatados metamorfizados, donde los fluidos metamórficos son de salinidad alta, máximo 23-25% NaCl equiv., pero los fluidos

no están saturados en NaCl. El CaCl_2 puede constituir alrededor de la mitad del total de sal disuelta. Otros casos excepcionales se señalan asociados a secuencias que incluyen evaporitas, lo que no es el caso en el área de El Soldado.

Por otra parte, la zonación de las temperaturas debió estar fuertemente controlada por la estratigrafía, en el caso de un origen por metamorfismo de carga. Sin embargo, encontramos temperaturas similares con muy diversos niveles estratigráficos y, como ya se ha dicho, más bien relacionadas con distintos centros o conductos de soluciones, muchas veces con diferentes "backgrounds" geoquímicos de sus elementos trazas. Estas temperaturas suelen ser más altas que las que limitan la estabilidad de la facies prehnita-pumpellita. Además, las texturas de los minerales, sus asociaciones, los halos de alteración geoquímicos que provoca la mineralización, sugieren fuertemente una relación con fuentes de origen magmático localizado, más que fenómenos de amplia distribución regional. En este sentido, la dispersión de los valores de σS^{34} presentes en los isótopos de azufre, como se ha mencionado, tampoco apoya el concepto de una reelaboración de origen metamórfico de tal naturaleza para estas rocas.

CONCLUSIONES

El análisis de inclusiones fluidas en cuarzo y calcita muestra fluidos mineralizadores, altamente salinos y saturados. No hay evidencias de ebullición como mecanismo de precipitación de la mena. No se observan variaciones obvias de temperatura o salinidad entre muestras situadas en distintos horizontes estratigráficos, sino que parecen estar zonados respecto de distintos centros o conductos de ascenso de soluciones.

Las muestras de la mina Veta del Agua (V Región de Valparaíso) y de la mina Resguardo (Distrito Punta del Cobre, III Región de Atacama) evidenciaron las mismas características, intervalos de temperaturas similares para iguales paragénesis y ausencia de ebullición. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por otros autores para algunos otros yacimientos considerados como similares a El Soldado (Nisterenko *et al.*, 1974).

Los isótopos estables de azufre de las distintas zonas de los cuerpos mineralizados muestran σS^{34} cercanos a 0, contrastando con las razones de piritas framboidales y piritas singenéticas de los sedimentos infrayacentes a las rocas huéspedes de la mineralización, lo que indica un muy probable origen magmático del azufre. La dispersión de valores σS^{34} sugiere poca elaboración metamórfica de estas rocas.

Los antecedentes recopilados a la fecha se ajustan mejor y más sencillamente a un modelo de génesis hidrotermal epigenético, relacionado a una fuente magmática, probablemente asociada al período de decaimiento de la actividad volcánica ácida en el área. Algunas evidencias mineralógico-texturales sugieren que ya existían condiciones de metamorfismo de carga (facies prehnita-pumpellita) cuando se emplazó la mineralización cuprífera.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al Proyecto No. 249 del IGCP "Magmatismo Andino y su Marco Geotectónico".

Deseo agradecer a la Compañía Minera Disputada de Las Condes S.A. por autorizar la publicación del presente trabajo. A los Sres. L.D. Hayes, Vicepresidente Ejecutivo, Erik Klohn, Gerente del Departamento de Geología y, en general, a todos los geólogos de la Compañía que aportaron importantes ideas al mismo.

Un agradecimiento especial merecen los geólogos

del Geologic Research Department de Exxon Minerals Co., quienes facilitaron sus laboratorios y dieron importantes sugerencias para este trabajo. El Sr. Fernando Henríquez, de la Universidad de Santiago de Chile, contribuyó con muy oportunos consejos. Tanto él como los señores Francisco Hervé y Alvaro Puig, del Departamento de Geología y Geofísica y del Servicio Nacional de Geología y Minería, respectivamente, editaron este trabajo, a quienes se agradece sus críticas constructivas.

REFERENCIAS

- ÅBERG, G.; AGUIRRE, L.; LEVI, B.; NYSTRÖM, J.O. 1984. Spreading-subsidence and generation of ensialic marginal basins; an example from the Early Cretaceous of central Chile. *In* Marginal basin Geology; volcanic and associated sedimentary and tectonic processes in modern and ancient marginal basins (Kokelaar, B.P.; Howell, M.F.; eds.). Geological Society, Special Publications. Vol. 16, p. 185-193.
- AHUMADA, R. 1985. Eventos intrusivos en el yacimiento cuprífero El Soldado, V Región, Chile. *In* Congreso Geológico Chileno, No. 4, Vol. 3, p. 752-773.
- BARNES, H. 1979. Solubilities of ore minerals. *In* Geochemistry of hydrothermal ore deposits (Barnes, H.L.; ed.). John Wiley & Sons, p. 404-460. New York.
- CAMUS, F. 1980. Distrito Minero Punta del Cobre, modelo interpretativo". *Revista Geológica de Chile*, No. 11, p. 51-76.
- CHAVEZ, W. 1984. Alteration mineralogy and chemistry of rhyolitic and andesitic volcanic rocks of the Mantos Blancos copper silver district, Chile. Preprint, SME-AIME Meeting, February, 1984.
- CRAWFORD, M.L. 1981. Fluid inclusions in metamorphic rocks; low and medium grade. *In* MAC, Short Course of fluid inclusions applications to Petrology. (Hollister, L.S.; et al.; eds.). No. 6, p. 157-181.
- CRAWFORD, M.L.; FILER, J.; WOOD, C. 1979. Saline fluid inclusions associated with retrograde metamorphism. *Soc. Fr. Mineral. Cristallogr., Bull.*, Vol. 102, No. 5-6, p. 562-568.
- HOEFS, J. 1973. Stable isotope geochemistry. *Minerals, Rocks and Inorganic Materials*, No. 9, Springer-Verlag, 140 p. Berlin.
- LEVI, B. 1970. Burial metamorphic episodes in the Andean geosyncline, Central Chile. *Geol. Rundschau*, Vol. 59, No. 3, p. 994-1013.
- LINKE, W.; SEIDELL, A. 1965. Solubilities inorganic and metal organic compounds K-Z. American Chemical Society, Vol. 2, 4th. edition.
- McKNIGHT, J. 1983. Visit to El Soldado Deposit. *Cía. Minera Disputada de Las Condes S.A.* (Inédito) 15 p. Santiago. ☞
- NISTERENKO, G.V.; LOSERT, J.; CHAVEZ, L.; NAUMOV, V.B. 1974. Temperaturas y presiones de formación de algunos yacimientos cupríferos de Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 1, p. 74-80.
- OHMOTO, H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Econ. Geol.*, Vol. 67, No. 5, p. 551-578.
- OLCAY, L.; ALARCON, B. 1975. Alteración hidrotermal sódica de Mina El Soldado, Provincia de Valparaíso, Chile. *In* Congreso Iberoamericano de Geología Económica, No. 2, Vol. 2, p. 541-556. Buenos Aires.
- PFRANG, G.; MAYER, C.; ZHANG, Z. AMSTUTZ, G.C. 1982. Zur Genese Spilitischer (Albit-basaltischer) Gesteine des Perm der Glarner Decken (Schweiz). *Fortschr. Miner.*, Vol. 60 No. 1, 164 p.
- PIRACES, R.; MAKSAEV, V. 1977. Geología de la Hoja Quillota, escala 1:250.000. *Inst. Invest. Geol.* (Inédito), 140 p. Santiago.
- RUGE, H. 1985. Geología y mineralización del yacimiento de cobre El Soldado, V Región, Chile. *In* IV Congreso Geológico Chileno; No. 4, Vol. 3, p. 854-872.
- RUIZ, C.; AGUILAR, A.; EGERT, E.; ESPINOZA, W., PEEBLES, F.; QUEZADA, R.; SERRANO, M. 1971. Strata-bound copper sulphide deposits of Chile. *Japan Soc. Mining. Geol., Spec. Issue*, No. 3; p. 252-260.
- 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. *In* Special issue for overseas geology

- and mineral resources; I. Calcalkaline magmatism and related mineralization in Chile. Bulletin, Japan Geological Survey, Vol. 35, No. 11, p. 615-624.
- SATO, T. 1984.** Manto-type copper deposits in Chile; a review. *In* Special issues for overseas geology and mineral resources; I. Calcalkaline magmatism and related mineralization in Chile. Bulletin, Japan Geological Survey, Vol. 35, No. 11, p. 565-582.
- SPIRO, B. 1984.** Course on stable isotope Geochemistry. British Geological Survey. London.
- YANATIEVA, O.K. 1946.** Solubility polytherms in the systems CaCl_2 ; MgCl_2 ; H_2O and CaCl_2 ; NaCl ; H_2O . Zh. Prikl. Khim., No. 19, p. 707-722.