

POSIBLE MODELO GENETICO PARA LOS YACIMIENTOS DE COBRE DEL DISTRITO MINERO PUNTA DEL COBRE

FRANCISCO CAMUS

Hendaya 46, Santiago, Chile

RESUMEN

El distrito minero Punta del Cobre es uno de los centros productores de cobre más importantes de la pequeña minería de Chile. Como tal, ha sido objeto de numerosos trabajos geológicos destinados a conocerlo, especialmente entre los años 1959 - 1975. Sin embargo, sus particularidades geológicas han dificultado su interpretación y han sido motivo de más de alguna controversia. El presente artículo describe la geología del distrito y entrega un modelo que postula un origen volcánogénico del tipo sulfuro macizo para Punta del Cobre, de forma que, tanto las vetas y las zonas fracturadas como los cuerpos de brecha presentes en el distrito, constituyen elementos integrados de un mismo esquema genético, dando lugar a los conductos de descarga y precipitación de soluciones y los mantos, ubicados sobre estos conductos, representan la expresión submarina de esta actividad hidrotermal. Todo ello habría ocurrido durante la evolución de la cuenca marina neocomiana.

Además, se discute la relativa falta de desarrollo de este tipo de yacimientos en el país, señalándose aquellos casos en que pueden aplicarse las ideas aquí expuestas.

ABSTRACT

The Punta del Cobre district, one of the most important copper producers of the small-size mining of the country, has been for long time a subject of debate among Chilean economic geologists. This paper describes the geology of those deposits and attempts to give a more coherent explanation for its genesis, suggesting a volcanogenic origin for them, assuming that more properly, they correspond to massive sulfides within the Neocomian marine basin. According to this conceptual idea, the veins, stockwork and breccia bodies present and precipitation of mineralized solutions, and the mantos located on top of these conduits are the expression of submarine hydrothermal activity.

An attempt to explain the lack or scarcity of this type of deposits is also made. It is considered that Punta del Cobre is not a unique case within the Andean tectonic cycle.

INTRODUCCION

El distrito minero de Punta del Cobre, ubicado en la provincia de Atacama, III Región, 15 kms al sur de Copiapó (Fig. 1), es uno de los más importantes centros productores de cobre de la pequeña minería del país. Los inicios de su explotación se remontan a los comienzos del siglo XIX, pero es con el establecimiento de la fundición de Paipote, en 1952, que su explotación se fue incrementando

gradualmente hasta llegar, en los últimos 10 años, a cifras anuales del orden de 5.000-10.000 toneladas de cobre fino. Las principales minas del distrito son Abundancia, Bateas, Agustina, Buena Esperanza y Manto Verde. La producción total del distrito en el período 1800 - 1978 alcanza una cifra del orden de 3,5 millones de toneladas de mena, con una ley media de 6% Cu total.

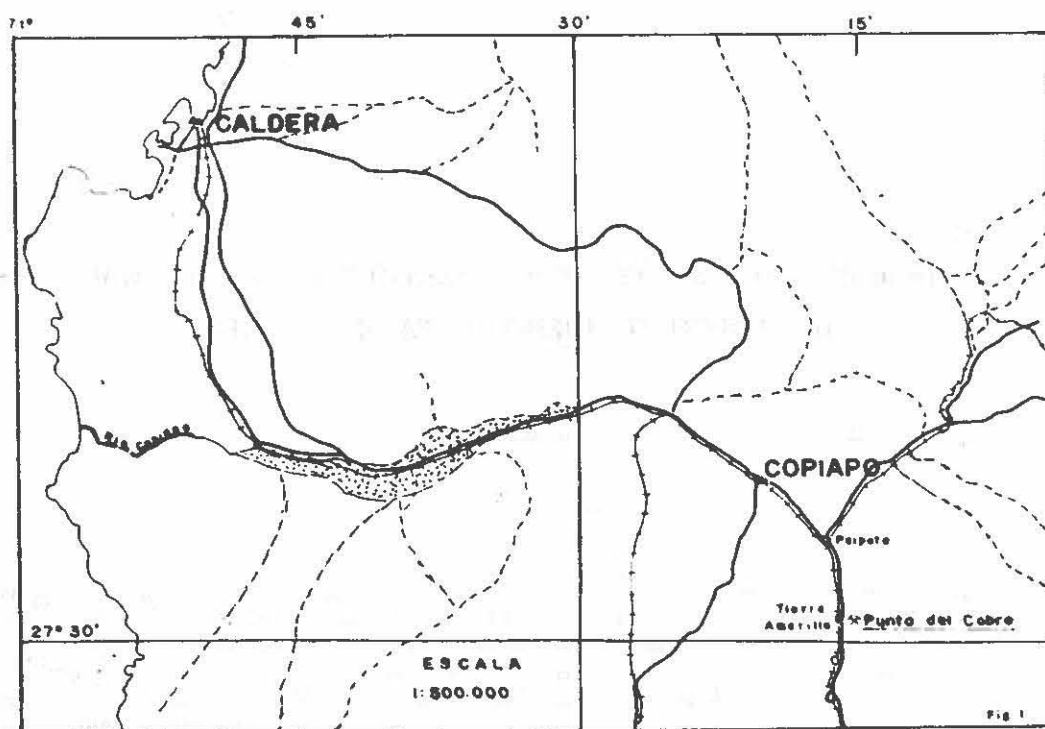
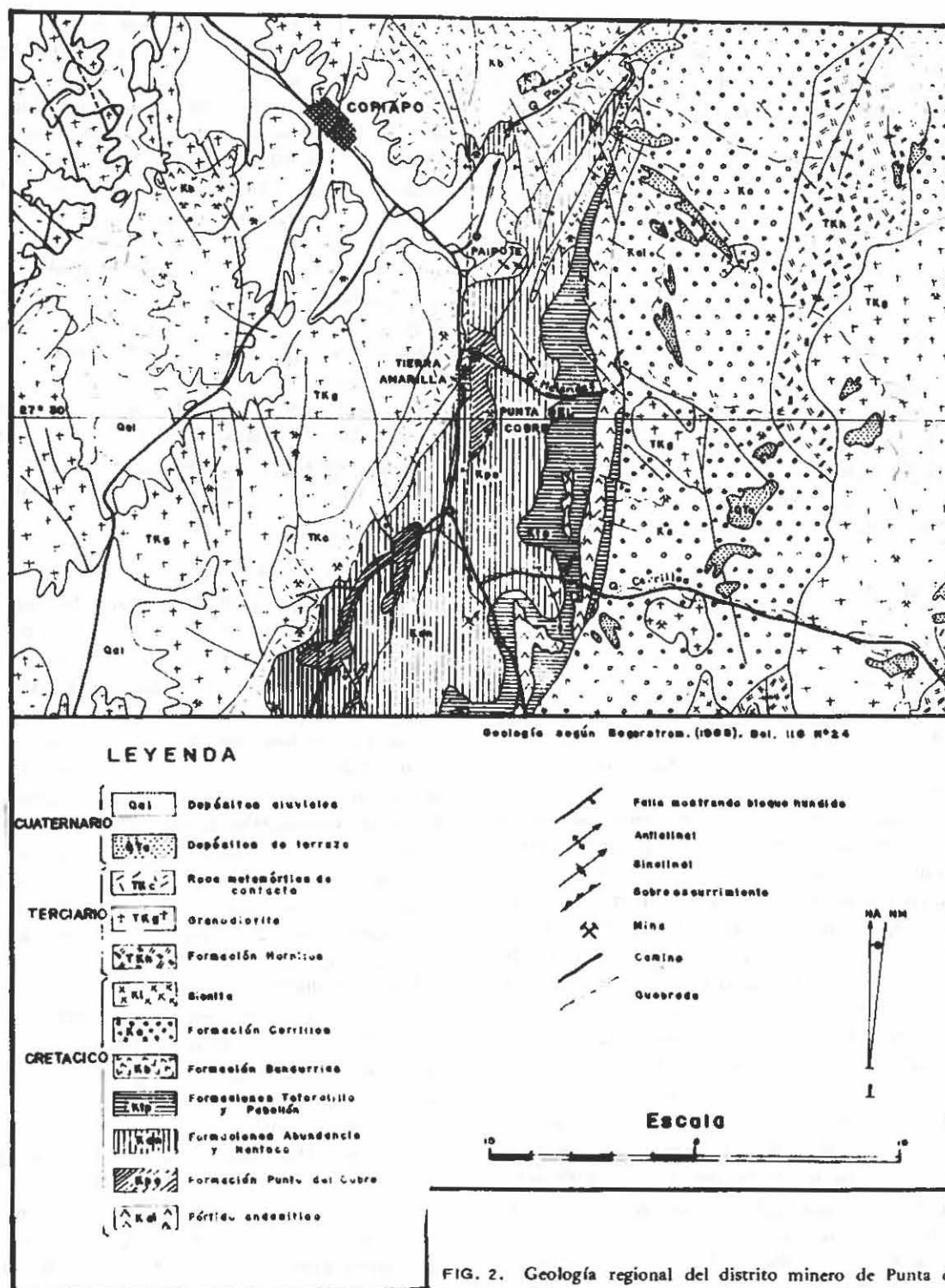


FIG. 1. Mapa de ubicación del distrito minero de Punta del Cobre.

Aunque sobre este distrito existen numerosos estudios, la mayoría inéditos, como los de Flores (1938), Moore *et al.* (1959), Ortiz *et al.* (1969), Alfaro (1967), Von Osten (1969), Araya *et al.* (1970) y N.U. (1971), ninguno ha entregado un modelo integral para explicar el origen de estos depósitos. El trabajo de Ortiz *et al.* (1966), ya citado, es el más completo y abarca la totalidad de la geología del distrito, con gran detalle. El presente artículo describe un modelo genético que, creemos, está más de acuerdo con la información geológica disponible a la fecha. Para su definición se han usado todos los datos existentes, más las observaciones personales del autor. Particularmente valiosos han sido los resultados del programa de exploración con sondajes que realizó el IIG en el año 1969 y ENAMI entre los años 1971 - 1974. El modelo aquí presentado parte de la premisa básica de asignar a Punta del Cobre un origen volcánico, del tipo sulfuro

macizo, y sobre esa base, se ha desarrollado el esquema genético. Hay que hacer notar que este modelo se basa también en las numerosas investigaciones que, sobre este tipo de depósitos, se han realizado en los últimos 10 años, entre los que se destacan los de Sangster, 1972; Hutchinson, 1973; Large, 1972; Sato, 1977; Henley y Thornley, 1979; y Solomon y Walshe, 1979.

El propósito al escribir este artículo ha sido llamar la atención a la comunidad geológica sobre la existencia de un tipo genético de yacimiento no reconocido anteriormente y que, aparentemente, estaba ausente en nuestra Cordillera, teniendo ella los ambientes geológicos para su desarrollo. La impresión del autor es que Punta del Cobre no constituye un caso aislado y que existen otros yacimientos estrato-ligados (strata-bound) chilenos, de claro origen volcánico, que presentan características parecidas a las aquí descritas y que pueden asimilarse al modelo presentado.



MARCO GEOLOGICO

Los yacimientos del distrito Punta del Cobre ocurren dentro de una cuenca volcano-sedimentaria de edad neocomiana, de rumbo aproximado NNE,

caracterizada por la presencia, hacia el oeste, de un dominio volcánico andesítico, emplazado sobre un alto fondo marino del cual emergía una serie de centros eruptivos, constituyendo un archipié-

lago de islas de dirección aproximada N-S (Abad, 1977). Hacia el este, existiría un dominio sedimentario marino marginal, con su línea de costa oriental ubicada aproximadamente en la longitud 70°W y constituida por rocas jurásicas (Abad, 1977). Todo este conjunto sedimentario fue intruido, durante el período Cretácico medio a Terciario inferior, por sucesivos pulsos ígneos que dieron origen a rocas batolíticas, con composiciones que varían desde dioritas a granodioritas (Fig. 2).

Fuertes plegamientos afectan a las diferentes unidades estratificadas presentes, dando lugar a anticlinales y sinclinales los cuales, a su vez, han sido cortados por numerosas fallas de gran ángulo.

Un fuerte metamorfismo de contacto ha generado una extensa aureola, que afecta a las unidades estratificadas, produciendo rocas córneas, skarns calcosilicatados y metavolcanitas (Tilling, 1962).

ROCAS ESTRATIFICADAS

La serie neocomiana, huésped de los yacimientos del distrito Punta del Cobre, está constituida principalmente por calizas, volcanitas y sedimentos continentales, que han sido agrupados en dos unidades mayores: Grupo Chañarcillo (Segerstrom y Ruiz, 1962) y Formación Bandurrias (Segerstrom, 1960) (Fig. 3).

El Grupo Chañarcillo lo constituyen las formaciones Punta del Cobre, Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón. De estas cinco, sólo afloran las dos primeras en el área de Punta del Cobre. La composición petrográfica de este grupo de formaciones es, con excepción de Punta del Cobre, básicamente sedimentaria. Según Corvalán (1974) la secuencia total tiene un espesor variable entre 1.700 y 2.000 m, y está constituida por rocas clásticas, en porcentajes variables de 24-32%, y por rocas de origen químico principalmente calizas y, en menor proporción, pedernal, en porcentajes de 76-68%. Hacia el oeste, las rocas del Grupo Chañarcillo se engranan con la Formación Bandurrias, constituida por un espesor indeterminado de lavas volcánicas, brechas y areniscas.

La Formación Punta del Cobre constituye la base del Grupo Chañarcillo y es la unidad encajadora para los depósitos de cobre del distrito (Fig. 6). La edad de esta unidad de roca es valan-

giniana (Ortiz *et al.*, 1969). En la figura 4 se da una descripción detallada de su litología según Ortiz *et al.* (1966).

Sobre la Formación Punta del Cobre se dispone, concordantemente, la Formación Abundancia, compuesta por 70 m de calizas y rocas clásticas interestratificadas. La edad de esta última unidad es valanginiana superior (Segerstrom y Ruiz, 1962).

Cubriendo parcialmente a las formaciones antes descritas, se observa una serie de depósitos de terrazas fluviales y conos de deyección, que constituyen una unidad indiferenciada, compuesta por bolones y bloques sub-redondeados con escasa selección, que yacen en una matriz de gravas, arena y limo, en parte cementadas por arcilla (Ortiz *et al.*, 1966). En la actualidad, estos depósitos aparecen disectados por la topografía local y, muy especialmente, por la quebrada del río Copiapó.

EL ALBITÓFIRO

Con este nombre, Ruiz (1942) definió una unidad de roca, que aflora en la quebrada Meléndez y en el distrito Punta del Cobre, y que se intercala entre las lavas inferiores (Kpeli) de la formación del mismo nombre y los sedimentos (Kpcs) (Fig. 4). Se trata de una roca de color gris-verdoso, compacta, con una masa fundamental traquítica, presentando estructura fluidal. El mineral más abundante es la plagioclasa (albita-oligoclasa), en forma de fenocristales y masa fundamental, presentándose turbia y muy difusa; en menor grado, ocurren alterados a calcita y sericita. Se observan localmente restos de ferromagnesianos alterados totalmente a clorita y, en menor proporción, a hematita-magnetita.

Estructuralmente, el albitófiro constituye dos unidades que han sido denominadas albitófiro norte y albitófiro sur (Alfaro, 1967; Von Osten, 1969). El primero ocurre al sur de la desembocadura de la quebrada Meléndez y tiene características claramente intrusivas, constituyendo un cuerpo de forma algo irregular, con carácter de apófisis. El albitófiro sur se extiende desde Punta Bateas hasta la mina Tirana (Fig. 6); conforma un cuerpo alargado, en forma de lengua y presenta, en su parte superior, cuerpos de brechas tabulares, aunque de formas irregulares. No se observa reabsorción de los sedimentos Kpcs que lo cubren, ni metamorfismo de contacto. En muchos sectores,

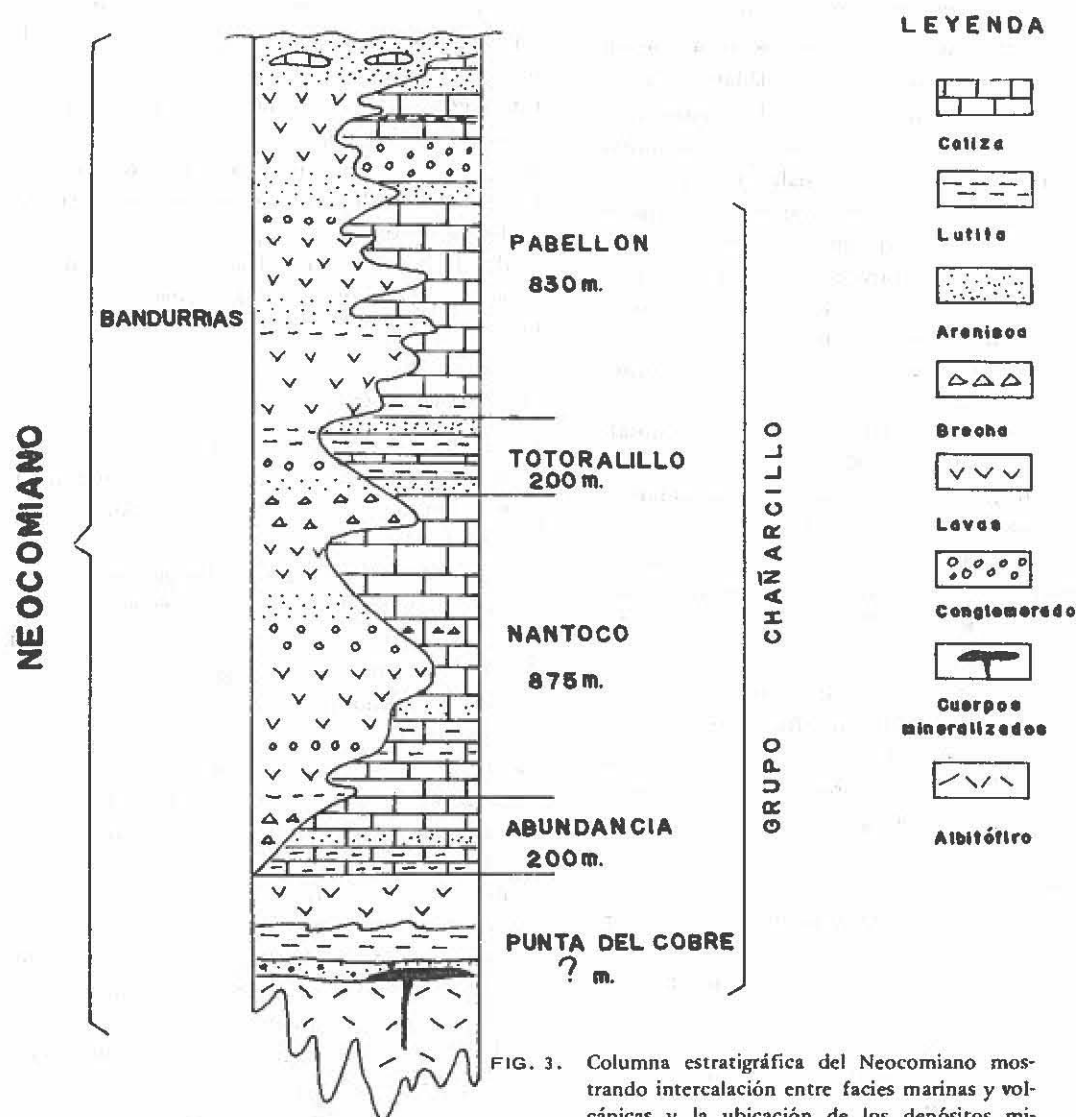


FIG. 3. Columna estratigráfica del Neocomiano mostrando intercalación entre facies marinas y volcánicas y la ubicación de los depósitos minerales.

el contacto entre el albitófilo y los sedimentos suprayacentes es totalmente concordante, laminar y sin deformación. En su extremo sur se observan algunas zonas de replegamiento y cizalle.

Casi todos los autores que han estudiado el albitófilo, desde Ruiz (1942) en adelante, lo consideran un intrusivo de carácter lacolítico y el directo responsable de la mineralización existente en el distrito. El presente autor considera que el albitófilo sur tiene características petrográficas y estructurales que sugieren más un origen efusivo

a partir de un conducto, que sería el denominado albitófilo norte. Los argumentos en pro de esta hipótesis se enumeran a continuación.

a) Las características petrográficas y texturales del albitófilo sur indican que se trata de una lava de composición posiblemente andesítica claramente efusiva, de acuerdo a su estructura fluidal. Si bien en las muestras de la Tabla 1, se indican valores altos en Na_2O , mayores de 4%, también los hay menores, lo que puede hacer pensar en andesitas alteradas hidroter-

nalmente a espilitas o queratófiros.

- b) La presencia de un diaclasamiento columnar típico de enfriamiento de coladas de lavas.
- c) El carácter concordante de los sedimentos Kpcsb que cubren el albitófiro. Existen lutitas de carácter laminar, las cuales no presentan efectos estructurales que denoten una intrusión forzada, como tendría que haber sido la de un eventual lacolito. Localmente, existen micropliegues pero ellos se pueden deber a estructuras primarias de los sedimentos afectados o a los plegamientos posteriores que sufrió la Formación Punta del Cobre.
- d) No existen efectos de metamorfismo de contacto en los sedimentos Kpcsb afectados. Parece difícil imaginar que en una roca, que supuestamente trajo mineralización y produjo una fuerte alteración hidrotermal con cambios químicos y mineralógicos, estos últimos hayan estado restringidos sólo al albitófiro sin afectar a las rocas encajadoras.
- e) Todas las fallas y estructuras menores de carácter pre-mineral afectan sólo a las lavas inferiores y al albitófiro y nunca a las unidades inmediatamente superiores (Kpcs y Kpcls). Mientras que las estructuras post-minerales se reconocen en todas las unidades, tanto superiores como inferiores y tienen orientaciones diferentes. Las estructuras pre-minerales tienen una dirección N45°-60°W; N20°-35°W y son oblicuas a los plegamientos principales del área (anticlinorium de Tierra Amarilla) (Ortiz *et al.*, 1966). Las estructuras post-minerales, en cambio, son N40°E, N60°E, N75°W y N20°W, constituyendo un esquema estructural conjugado, que puede perfectamente asimilarse a los plegamientos principales de la zona. (Fig. 5).
- f) La presencia en los sedimentos (Kpcsb), entre otros, de fragmentos de albitófiro cementados por minerales hidrotermales, en las zonas de ocurrencia de mineralización mantiforme, lo cual parece difícil de explicar por un proceso de mera intrusión; no ocurriendo, por otro lado, lo inverso, es decir, fragmentos de sedimentos litificados o reabsorbidos en el albitófiro, lo cual, por el carácter forzado de una intrusión lacolítica, sería lógico esperar.

En consecuencia, se considera al llamado albitófiro sur como una unidad efusiva perteneciente

a la Formación Punta del Cobre, constituyendo un episodio efusivo más dentro de su desarrollo. Su origen habría estado en un conducto constituido por el albitófiro norte. Su papel en la generación de los depósitos de cobre sigue siendo válida, pero no en el sentido que se le ha dado hasta ahora. A ello nos referiremos posteriormente.

En la columna estratigráfica de la figura 4, tomada de Segerstrom y Ruiz (1962), aparece el albitófiro como parte de la Formación Punta del Cobre.

FILONES DE LAMPROFIRO

En el interior de las minas han sido reconocidos varios filones de lamprófiro, que presentan una gran extensión y homogeneidad en su composición litológica.

Se trata de una roca de color gris oscuro, porfírica, con fenocristales de ferromagnesianos alterados a calcita y clorita, dentro de una masa fundamental afanítica de color gris oscuro. Estructuralmente, los filones tienen cajas bien definidas y han ocupado el lugar de fallas pre-minerales. En algunos sectores (minas Manto Verde, Abundancia y Bateas), los filones aparecen desplazando a las vetas, demostrando con ello su carácter post-mineral.

En la mina Manto Verde, se han mapeado 4 filones con rumbos preferentemente N10°W e inclinaciones 75°-55°W. Su espesor llega a un metro y su extensión, en corrida, a 250 m. En la mina Abundancia, se han reconocido 3 ó 4, con rumbos N10°W y manteos de 75°-80°W y N30°-50°E y 85°N. Su espesor llega sólo a 20-30 cm y sus corridas no superan los 200 m. En las minas Agustina y Bateas, se ha reconocido un filón en cada una, con rumbos N10°W.

QUIMISMO DE LAS ROCAS EFUSIVAS

Ortiz *et al.*, (1966); Alfaro (1967) y Von Osten (1969) han realizado muestreos y análisis de roca total, a las diferentes unidades efusivas de las lavas inferiores, superiores y del albitófiro. Estos análisis se resumen en la Tabla 1. Desgraciadamente, todas las muestras fueron tomadas en las cercanías o dentro del área de influencia de los cuerpos mineralizados, de tal forma que, los resultados de los análisis de roca total, reflejan

T A B L A I

ANALISIS QUIMICOS DE ROCA TOTAL EN FORMACION PUNTA DEL COBRE

%	Lavias inferiores		Albitófirio							Lavias superiores					
	1+	2°	3°	4°	5+	6+	7+	8°	9°	10+	11+	12x	13x	14x	15x
SiO ₂	56.04	57.17	64.14	63.56	64.51	61.67	60.86	65.96	64.34	47.76	44.58	45.44	50.00	54.33	52.05
Al ₂ O ₃	15.50	13.86	14.58	14.73	14.97	14.85	14.87	15.90	14.82	16.09	16.12	15.62	17.53	15.35	14.03
Fe ₂ O ₃	1.42	1.20	2.72	1.18	1.60	2.09	5.29	3.61	4.10	1.84	0.92	0.18	1.85	2.23	9.74
FeO	9.24	9.19	4.66	8.18	6.30	5.42	5.58	2.47	5.03	4.27	5.81	8.38	9.76	4.68	9.17
CaO	2.71	2.39	1.56	0.53	1.06	1.04	0.59	0.73	0.85	9.65	11.88	10.32	1.29	5.53	0.99
MgO	4.47	3.80	0.18	0.88	0.72	1.04	1.50	0.52	0.86	3.44	2.73	2.55	3.82	4.50	0.07
Na ₂ O	2.21	0.32	3.22	3.44	7.27	2.15	4.90	8.00	2.91	3.96	5.05	2.71	0.21	2.83	0.25
K ₂ O	5.23	6.17	6.47	5.17	0.82	7.79	2.36	0.45	4.88	2.93	1.32	2.70	8.94	2.84	10.40
P ₂ O ₅	0.12	0.19	0.11	0.09	0.25	0.24	0.17	0.18	0.18	0.20	0.25	0.17	0.07	0.23	0.14
TiO ₂	0.74	0.67	0.41	0.42	0.57	0.51	0.53	0.47	0.44	0.84	0.85	0.80	0.95	0.91	0.70
MnO	0.16	0.23	0.04	0.07	0.10	0.08	0.07	0.04	0.05	0.41	0.40	0.41	0.25	0.33	0.12
H ₂ O ⁺	2.09	3.85	1.16	1.34	1.57	1.79	2.11	1.07	1.53	3.82	3.85	3.30	3.69	3.31	0.78
H ₂ O ⁻	0.22	0.29	0.11	0.14	0.25	0.36	0.34	0.28	0.09	0.63	0.48	0.15	0.17	0.18	0.13
S	0.08	0.02	0.03	0.06	0.05	0.02	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02	0.12	0.12	0.05	0.29
CO ₂	0.008	0.07	0.32	0.05	0.32	0.53	0.51	0.03	0.08	4.23	5.91	6.85	0.02	2.39	0.13
Cu (ppm)	313	1695	456	758	313	286	363	229	776	90	301	416	3104	298	941
Total	99.59	100.27	99.76	99.90	100.39	99.61	99.70	99.77	100.25	100.09	100.22	100.96	99.00	99.97	99.91

° Muestras tomadas por Alfaro (1967).

+ Muestras tomadas por Ortíz y otros (1966).

x Muestras tomadas por Von Osten (1969).

Para descripciones microscópicas de estas muestras se remite a los lectores a los trabajos de los tres autores citados.

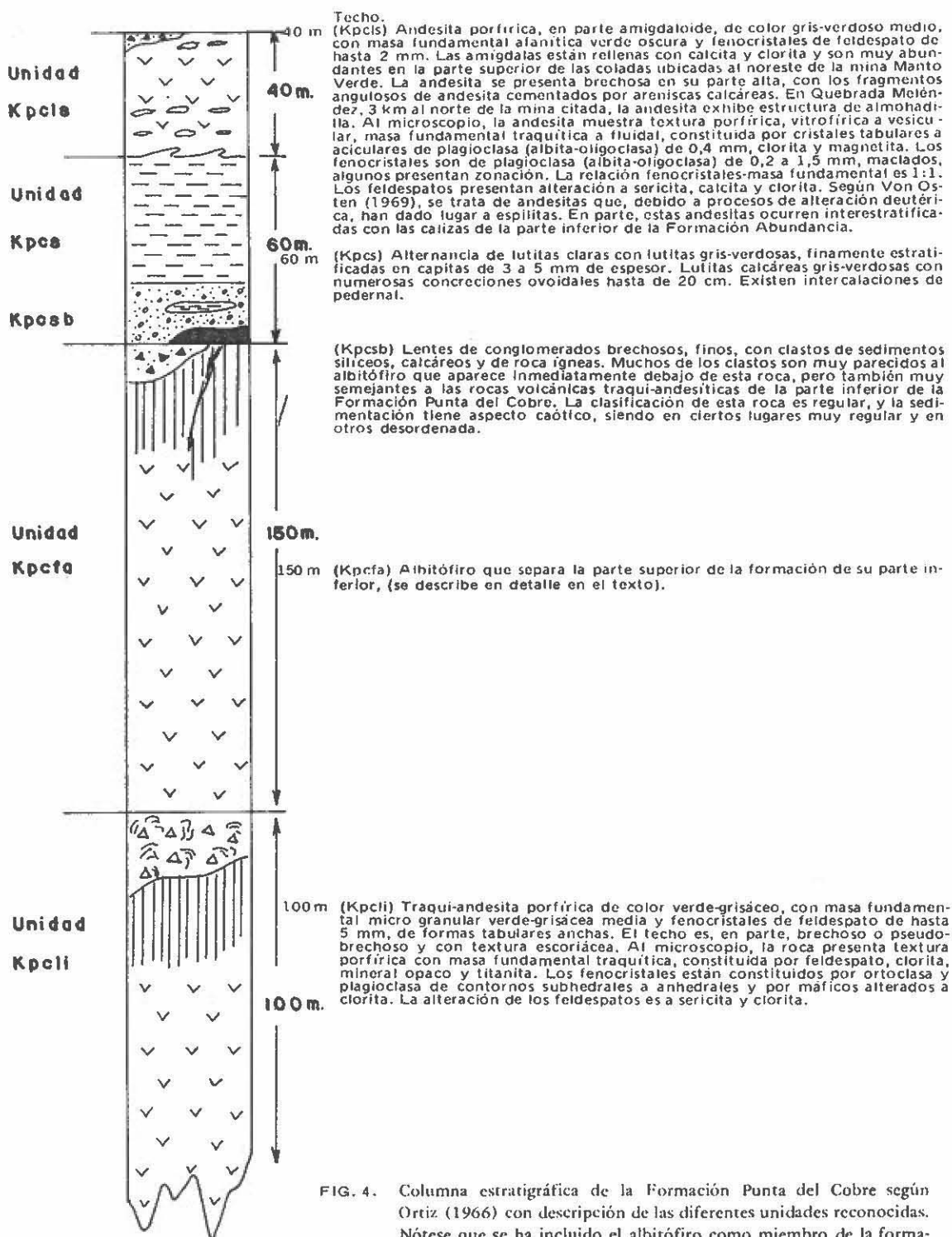


FIG. 4. Columna estratigráfica de la Formación Punta del Cobre según Ortiz (1966) con descripción de las diferentes unidades reconocidas. Nótese que se ha incluido el albitófiro como miembro de la formación y se destaca la ubicación de los depósitos de cobre.

la suma de todos los procesos hidrotermales y de mineralización que han afectado a estas rocas. hecho que los autores antes citados han reconocido. Como consecuencia, no es posible usar diagramas de variación u otro método para caracterizar estas rocas. A continuación revisaremos los resultados de los análisis de roca total por tipo de roca.

Albitófiro

El aspecto más destacado de los análisis químicos del albitófiro es su alto contenido en SiO_2 , Na_2O , Fe total y K_2O , todo lo cual está revelando un típico proceso de alteración hidrotermal. El alto contenido en SiO_2 se explica por un cierto grado de silicificación, tanto de la roca misma como de aquélla introducida a través de venillas de cuarzo. El Na_2O se explica por la extensa albitización de las plagioclasas, que al microscopio se muestran turbias y de contornos difusos. El K_2O se explica en base a la sericitización, y el Fe total tiene que ver con el proceso de mineralización. Al respecto, cabe señalar que las muestras 5, 6 y 7, que corresponden al techo, centro y parte basal, respectivamente, del albitófiro muestran una clara disminución en Fe_2O_3 , lo que es un reflejo de la zonación mineralógica en la cual el hierro férrico, fijado como óxido, disminuye hacia arriba a hierro sulfurado. Por su parte, el hierro ferroso muestra un aumento hacia arriba, aunque leve.

El albitófiro, en la práctica, representa una roca efusiva cuyas características texturales originales se mantienen, pero donde la alteración ha producido cambios substanciales en su composición química. No hay diferencias en este aspecto entre el albitófiro norte y el sur. Consecuentemente, es posible considerar al albitófiro como el producto de la alteración hidrotermal de lavas de composición originalmente andesítica, las cuales han sido transformadas a espilitas o queratófiros.

Lavas Inferiores

Característica de esta unidad es su alto contenido en hierro total (especialmente ferroso), magnesio, potasio y alta H_2O^+ . Esta situación estaría explicada por el proceso de alteración-mineralización que afectó a estas rocas. Como lo hemos señalado anteriormente, hay una zonación metálica que se caracteriza por presentar abundante hierro en profundidad, lo cual es particularmente notorio en las lavas inferiores (Araya *et al.*, 1970).

La cloritización y sericitización explicarían los altos contenidos en K_2O , MgO y H_2O^+ .

Lavas Superiores

Se destaca el alto contenido en calcio y magnesio, y los valores extraordinariamente altos, para algunas de las muestras, en hierro y potasio. Esto estaría indicando efectos de alteración y el relleno de las amígdalas.

ESTRUCTURA

La totalidad de las rocas estratificadas presentes están afectadas por fuertes plegamientos y fallamientos, siendo el rasgo estructural más destacado, el anticlinal de Tierra Amarilla descrito por Segerstrom *et al.* (1963), cuyo flanco oriental ocurre en la zona de Punta del Cobre. Esta estructura corresponde más propiamente a un anticlinorium compuesto por muchos pliegues, uno de los cuales aparece desarrollado en el distrito. Esta última estructura (Fig. 5) tiene rumbo $\text{N}20^\circ\text{W}$ en las cercanías de las minas Agustina, Abundancia y Bateas, que se hace N-S en dirección a la mina Santos. En su flanco este y en su extremo sur se ubican todos los depósitos. El flanco occidental aparece cubierto por los depósitos aluviales del valle del río Copiapó. La cresta del pliegue ha sido totalmente erosionada, dejando los flancos este y sur como remanentes.

Además a estos pliegues mayores, las unidades estratificadas presentan pliegues menores de carácter local, micropliegues y flexuras.

El fallamiento es un fenómeno que ha afectado fuertemente a la zona, controlando parte de la mineralización y dislocando, posteriormente, los cuerpos mineralizados producidos. Se pueden establecer varias generaciones de fallas, las cuales se han dividido en pre-minerales y post-minerales (Von Osten, 1969). En general, estas fallas presentan escaso desplazamiento, tanto vertical como horizontal; parece tratarse de fallas de "charnela". Sin embargo, dos de ellas, ubicadas en y cerca del valle del río Copiapó, han producido movimientos verticales del bloque occidental cercanos a los 50 m (Fig. 7).

Von Osten (1969) distinguió entre fallas mineralizadas o preminerales y fallas sin mineralización o post-minerales. De sus diagramas se desprenden los siguientes sistemas de fallas.

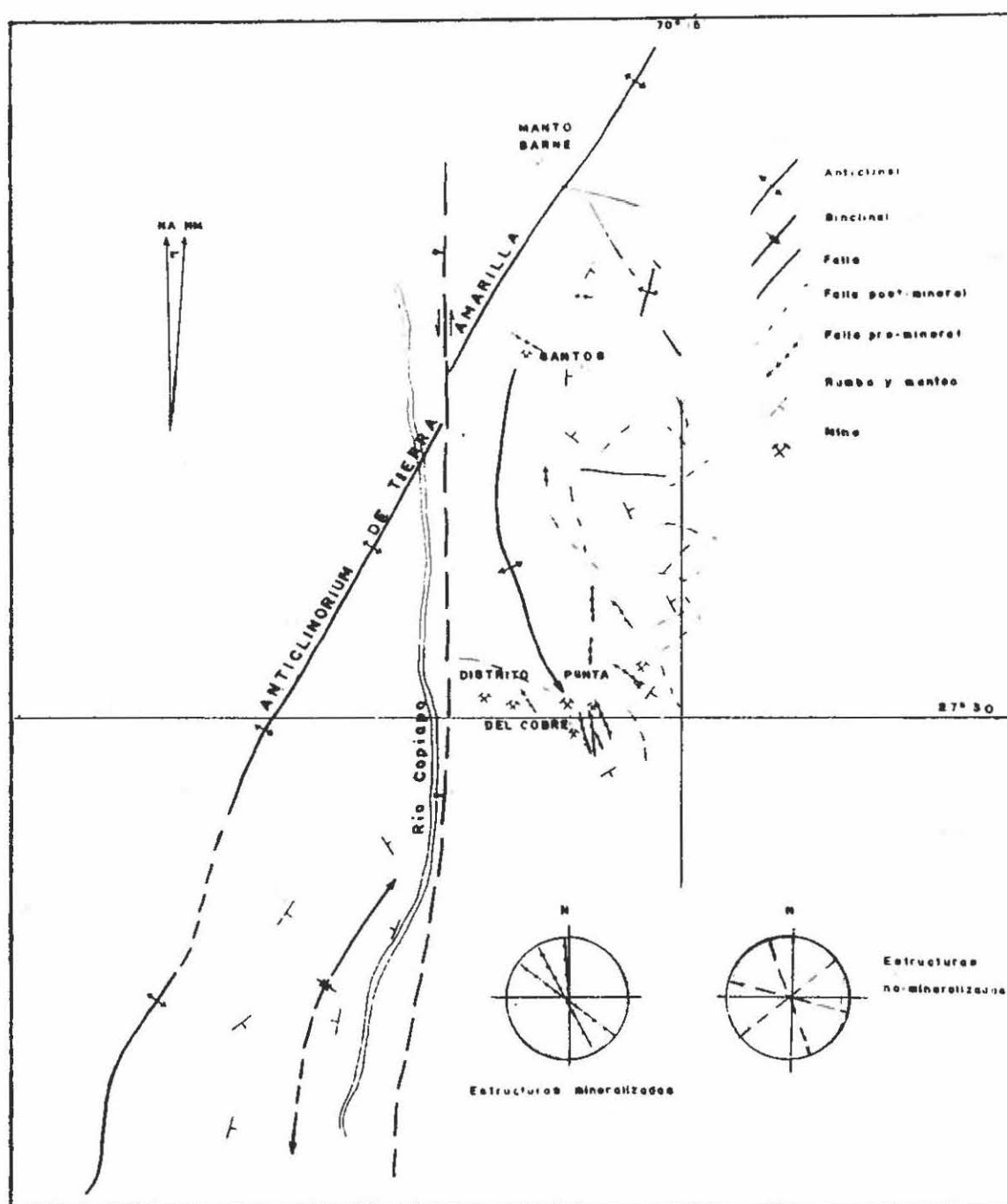


FIG. 5. Cuadro estructural del distrito Punta del Cobre y alrededores.

a) Fallas mineralizadas

- N45-60°W,
- N20-35°W, y
- N-S-N5°W

b) Fallas no-mineralizadas

- N40°E,
- N60°E,
- N75°W, y
- N20°W

Las fallas mineralizadas o pre-minerales sólo ocurren afectando a las unidades de lavas inferiores Kpeli y al albitófiro Kpefa y no atraviesan las rocas suprayacentes, a menos que hayan sufrido removilizaciones locales, como es el caso de la veta Buena Esperanza (Ortiz *et al.*, 1966), la cual se extiende parcialmente hacia los sedimentos Kpes.

Sin embargo, las fallas no-mineralizadas o post-minerales atraviesan absolutamente a todas las unidades de rocas presentes.

En la figura 5 se han dibujado las principales estructuras del área, además de las orientaciones principales de fallas mineralizadas y no-mineralizadas según Von Osten (1969). El esquema de fallas no-mineralizadas pareciera corresponder, estructuralmente, con el anticlinorium de Tierra Amarilla, pero no está claro con que rasgo se relacionarían las fallas mineralizadas.

El fracturamiento general de las diferentes unidades de rocas es bastante irregular en su distribución, pero tiene un carácter moderado a fuerte.

Se hace muy fuerte en las inmediaciones de los cuerpos de brecha tabulares y de fracturas multidireccionales (stockwork).

METAMORFISMO

Hacia el este de Copiapó, la serie neocomiana descrita está intruida por un complejo batolítico, que produjo un extenso metamorfismo de contacto generando skarns calcosilicatados, rocas córneas y rocas metavolcánicas (Tilling, 1962).

En Punta del Cobre, los efectos de este metamorfismo sólo se evidencian en las unidades calcáreas superiores de la formación, las cuales aparecen reemplazadas por granate-escapolita. Por su parte, las rocas volcánicas no presentan evidencias de metamorfismo, salvo por un cambio en la composición de la plagioclasa de tipo albitico, en las rocas no-metamórficas, a oligoclasa-andesina, actinolita, hornblenda verde o diópsido con pequeñas cantidades de titanita y apatita (Tilling, 1962), en las rocas metamorfizadas.

GEOLOGIA DE LOS YACIMIENTOS

FORMA Y ESTRUCTURA

Cuatro tipos diferentes de depósitos, aunque todos interrelacionados, constituyen el distrito. Ellos son: vetas; cuerpos de brecha tabulares; zonas fracturadas o "stockwork", rodeando a los cuerpos de brecha, a las vetas o bien aisladas; y mantos.

Los tres primeros tipos ocurren en el albitófiro. Además, han sido reconocidas vetas en la unidad de lavas inferiores (Kpeli). El cuarto tipo se restringe a los sedimentos Kpesb. Los cuatro tipos que ocurren dentro de un área de un kilómetro cuadrado, se ilustran en las figuras 7 y 8.

Vetas

Constituyen cuerpos de 0,1 a 1 metro de potencia, con sus cajas casi siempre definidas, aunque, en algunos casos, la estructura vetiforme grada a zonas de fracturamiento que dan lugar a potencias mineralizadas de hasta 5 m.

Ocurren según dos sistemas principales: 1) N25°W con manteos de 30°W-48°E y 2) N20°-60°W con manteos de 65°-80°W.

El primer sistema presenta longitudes conocidas

en el sentido del rumbo de 300 a 350 m (ejemplos: Manto Verde, Abundancia, Agustina y Bateas) y profundidades, en el sentido del manteo, de 150 m.

El segundo sistema tiene extensiones de hasta 600 m, con profundidades de 100 m. Ejemplos son Buena Esperanza, Independencia y Delirio.

Como ya se señaló, las vetas ocurren principalmente en el albitófiro, pero también se han reconocido en las lavas inferiores. Ejemplo es la mina Manto Negro.

La mineralización principal en las vetas es calcopirita con ganga de cuarzo, con menores proporciones de pirita y especularita. En profundidad, se produce un aumento de la pirita y, especialmente, de la magnetita, bajo el nivel del albitófiro.

Cuerpos de brecha tabulares

Ocurren sólo en el albitófiro y a lo largo de estructuras mayores o empalmes de estructuras. Tienen carácter vertical y se orientan mayoritariamente hacia el noroeste. Su extensión en el rumbo alcanza a un máximo de 150 m y su ancho fluctúa entre 1 m y 60 m. En profundidad, se

angostan hasta desaparecer en forma de digitaciones. Los ejemplos más destacados ocurren en el Socavón Rampla, mina Manto Verde y mina Agustina (Fig. 7).

La mineralización principal es calcopirita, pirita, especularita, cuarzo y calcita, la cual ocurre rellenando los espacios abiertos entre fragmentos.

Zonas fracturadas o "stockwork"

Se trata de enrejados de fracturas multidireccionales, rellenas con mineralización de cobre y hierro, que aparecen rodeando a los cuerpos de brechas o a las vetas. Han sido reconocidos en casi todas las minas del distrito.

Mantos

Corresponden a la parte inferior de la unidad de sedimentos Kpcsb y, localmente, a la parte superior del albitófiro. Se trata de cuerpos lenticulares con potencias que van desde un metro hasta 20 m. En la horizontal cubren superficies de 3.000 m² hasta 40.000 m².

Texturalmente constituyen sedimentos brechosos a conglomerádicos finos, compuestos por clastos angulares a subangulares pertenecientes a las unidades de lavas inferiores (Kpcli) y albitófiro (Kpcf), fragmentos de chert, calcáreos y de otras rocas ígneas indeterminadas, cementadas por calcopirita, pirita, especularita y cuarzo. Hacia arriba, la mineralización de cobre disminuye produciendo un incremento notable en el hierro hasta hacerse sólo especularita. Hay sectores, hacia los extremos de los cuerpos lenticulares, en que éstos lateralmente gradan a mantos exclusivamente ferríferos. (Figs. 7 y 8).

Localmente hay sectores, dentro de la unidad Kpcsb, donde los mantos con cobre aparecen cubiertos por lutitas bandeadas, que muestran la presencia de horizontes laminares de calcopirita y pirita alternados. Estos niveles no tienen más de un metro de potencia, y son relativamente restringidos en su extensión.

MINERALOGIA

La mineralogía de los depósitos de Punta del Cobre es bastante simple, existiendo, sin embargo, una zonación que es especialmente notoria en el sentido vertical, observándose hacia abajo un incremento en pirita y hacia arriba, en especularita.

Más en profundidad, y dentro de las lavas inferiores, se hace más importante la magnetita (Araya *et al.*, 1970). El único mineral de cobre presente es la calcopirita, la cual ocurre asociada, en porcentajes variables, con pirita y especularita. A continuación se hace una breve descripción de los minerales presentes, basada en Ortiz *et al.* (1966).

Calcopirita

Es el único mineral de mena. Ocurre en forma compacta en los mantos y vetas, relleno de fracturas y espacios abiertos, entre los fragmentos de brechas en el albitófiro y diseminada en esta última roca.

Especularita

Es el segundo mineral en importancia en los yacimientos. Ocurre en dos formas que se diferencian por el tamaño del grano. La especularita I, más gruesa, llega hasta 8 mm, y se asocia generalmente al cuarzo. Aparece sola o reemplazando a la magnetita y cruzada por guías de calcopirita y pirita. La especularita II, más fina, tiene un máximo de 1 mm y se presenta, invariablemente, acompañada por calcita; reemplaza a todos los otros minerales formando guías y venillas.

Magnetita

Se presenta finamente diseminada en el albitófiro. En sectores aparece martitizada. Es más abundante en las vetas de la parte sur del distrito. También constituye dos generaciones; la segunda generalmente ocurre reemplazando a la especularita. La primera es muy abundante en la unidad de lavas inferiores (Kpcli) ubicadas en la parte oeste del distrito.

Pirita

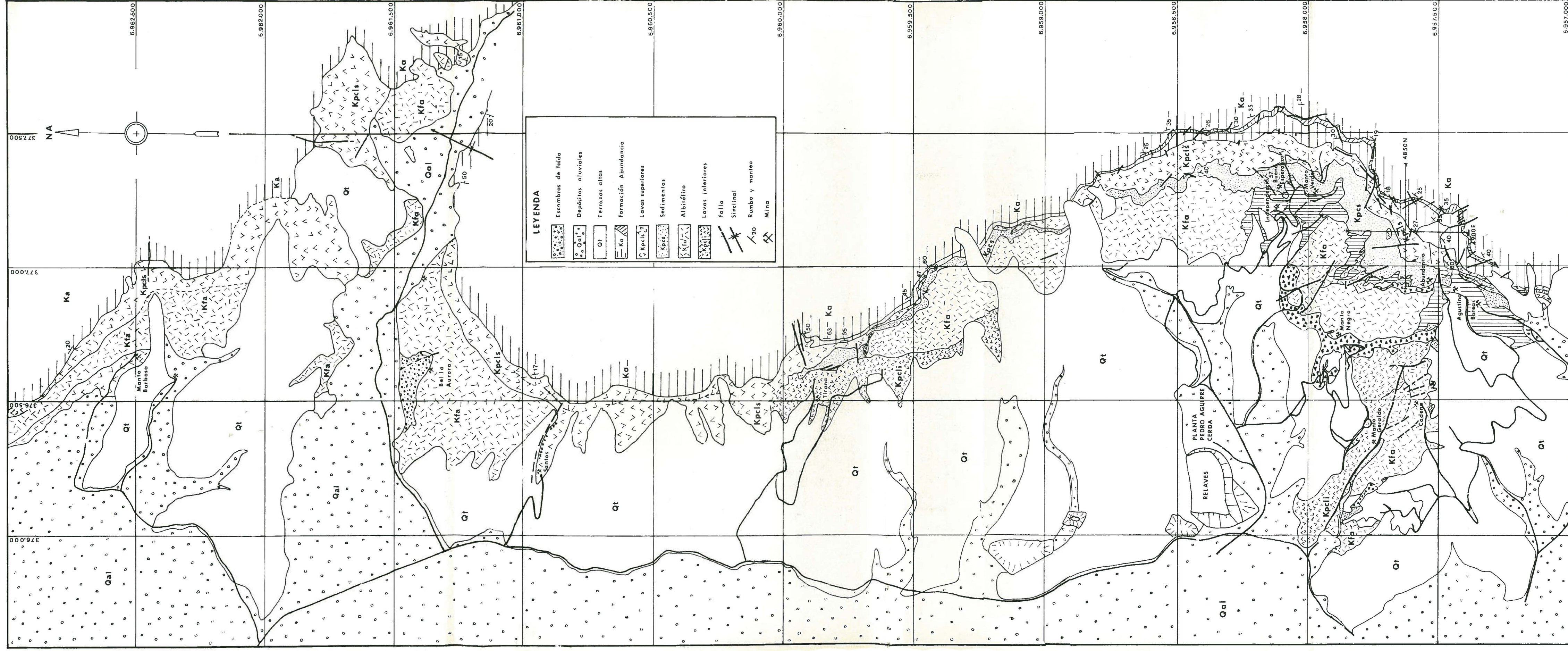
Es abundante pero ocurre subordinada a la calcopirita. Se reconocen dos generaciones. La pirita I es reemplazada por calcopirita, calcita y especularita II. La pirita II ocurre en cristales euhedrales a subhedrales y no es reemplazada por calcopirita.

Enargita

Es muy escasa y se presenta como inclusiones finas en granos de calcopirita.

Cuarzo

Se asocia a la mineralización de cobre constitu-



GEOLOGIA DEL DISTRITO MINERO PUNTA DEL COBRE

ESCALA 1:10.000

Geología según Orfz (1966), Alfaro (1967) y Von Osten (1963)

Fig. 6

yendo el mineral de ganga más importante. Se cree que existen dos generaciones que se han denominado cuarzo I y cuarzo II. El cuarzo I se asocia a la especularita I y el cuarzo II, a la pirita II.

Calcita

Presenta una fuerte asociación con especularita. Su mayor ocurrencia es como parte del cemento de los cuerpos de brecha tabulares, junto con el cuarzo. Ocurre también como mineral de alteración hidrotermal, en el albitofiro, reemplazando a las plagioclasas.

Clorita

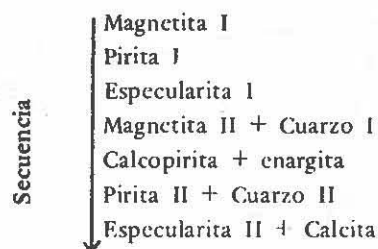
Corresponde a las variedades penninita y proclorita, y es muy abundante en el albitofiro como reemplazo de los fenocristales de máficos y de la masa fundamental. También es abundante en la unidad de lavas inferiores.

Baritina

Ocurre sólo localmente.

PARAGENESIS

Los estudios microscópicos de las asociaciones mineralógicas presentes permiten inferir el siguiente cuadro paragenético para Punta del Cobre, modificado de aquél sugerido por Ortiz *et al.* (1966).



ALTERACION HIDROTHERMAL

La alteración hidrotermal no es un proceso que haya sido particularmente destacado en los trabajos anteriores sobre Punta del Cobre, sin embargo, tanto las unidades de lavas inferiores como el albitofiro aparecen afectados, en grado variable, por fenómenos de alteración hidrotermal, siendo la cloritización, albitización, carbonitización y sericitización, los tipos de alteración más comunes.

Cloritización

Es el tipo de alteración más desarrollado en el distrito. Afecta principalmente a los ferromagnesianos, a la masa fundamental de la unidad de lavas inferiores y al albitofiro. Además, ocurre rellenando amígdalas en la parte superior de las coladas de lava, junto con calcita y zeolita. La cloritización es particularmente extensa dentro del ámbito geográfico de los depósitos, especialmente vetas, cuerpos de brecha y zonas fracturadas, dando a las rocas huéspedes un color característico. Coexiste en el albitofiro con especularita diseminada.

Albitización

Se manifiesta por un reemplazo total de la composición original de las plagioclasas del albitofiro

por albita-oligoclasa. Ella se refleja, bajo el microscopio, por la turbidez y aspecto difuso de las plagioclasas. Desde el punto de vista químico, esta situación está indicada por el alto contenido sódico de la roca (Tabla 1).

Carbonitización

Aparece en el albitofiro reemplazando a los fenocristales y diseminada en la masa fundamental. En zonas mineralizadas es muy poco abundante, aumentando fuera de ellas aunque no se ha reconocido una verdadera zonación. Las lavas inferiores también presentan carbonitización.

Sericitización

Ocurre rodeando a los cuerpos vetiformes, brechas tabulares y formando halos en torno a vetillas en las zonas fracturadas. Afecta de preferencia a los feldespatos.

Silicificación

Afecta también sólo al albitofiro y a las lavas inferiores. Ocurre asociada a la sericita en halos de venillas.

A la fecha, no se ha podido reconocer un cua-

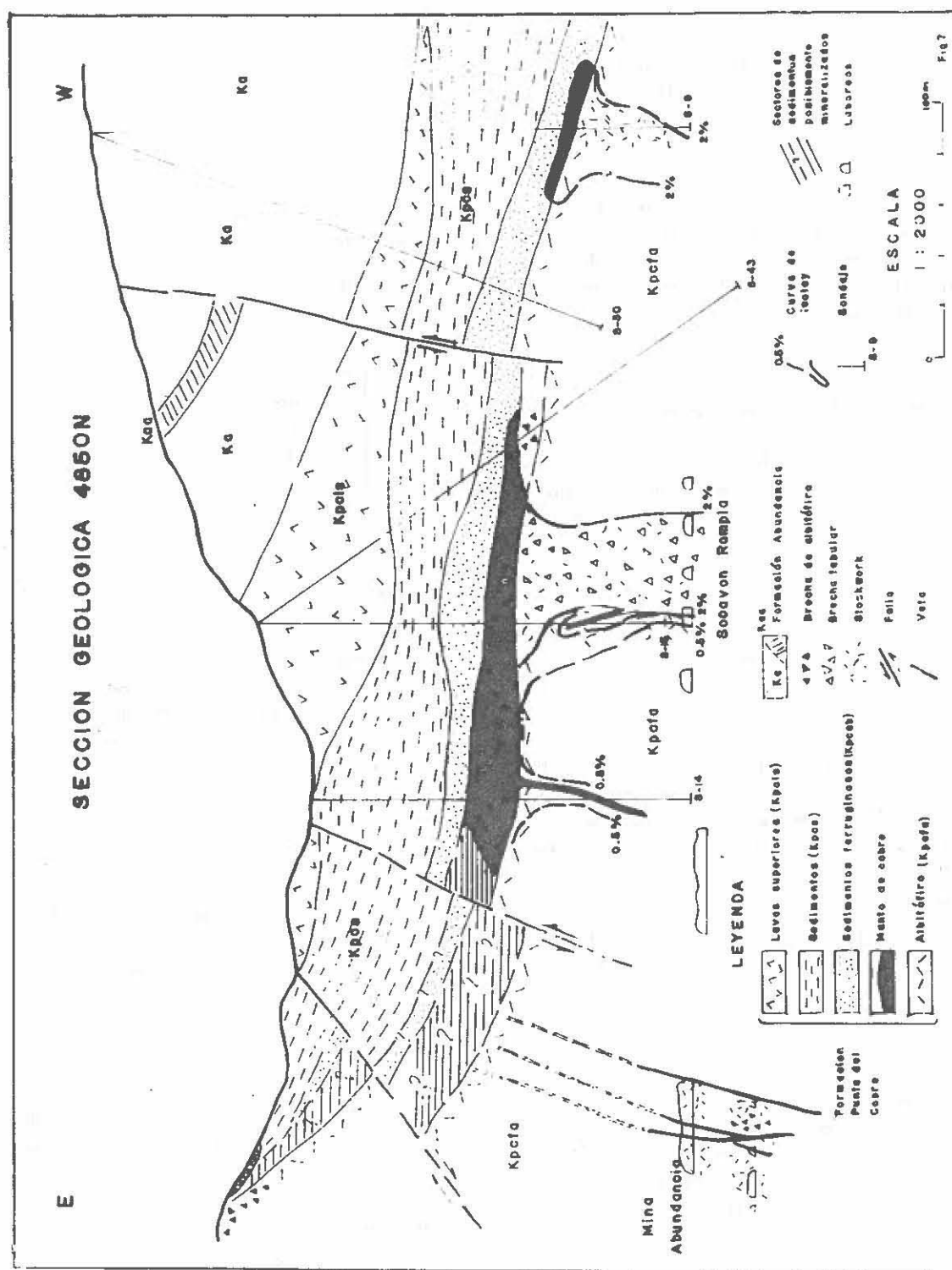


FIG. 7. Sección geológica 4850N mostrando configuración de uno de los cuerpos mineralizados de Punta del Cobre indicando las brechas, mantos, vetas y enrejados de fracturas.

dro específico en cuanto a la distribución de los minerales de alteración. Lo único claro es la ubicación espacial de la clorita y, localmente, la sericita con los cuerpos mineralizados, especialmente las brechas y enrejados de venillas, extendiéndose fuera de ellos por algunos metros. Fuera de este ámbito la cloritización es débil y se limita a afectar sólo a los ferromagnesianos. La sericita, por su parte, desaparece fuera de los cuerpos mineralizados. Los carbonatos parecen constituir ciertas zonas fuera del ámbito mineralizado, pero su importancia y posible relación con la mineralización se desconoce. El cuarzo, fuera de actuar como relleno de las brechas y vetas, su única acción adicional parece ser su relación con la sericita formando, esporádicamente, halos de vetillas.

Zonaciones de la alteración hidrotermal como la que existe en otros yacimientos volcanogénicos (Lambert y Sato, 1974), no se han reconocido todavía en Punta del Cobre. Es muy posible que la clorita pueda definir una cierta zonación en cuanto a la razón Fe/Mg que controla su composición, dada la variación espacial que sufre el Fe en los depósitos. Es posible esperar una clorita rica en Mg dentro del ámbito geográfico de los depósitos, que gradan a una clorita más rica en Fe y pobre en Mg, fuera de ellos.

Hay que hacer notar finalmente el hecho que, hacia la base del albitófiro, existe presencia de epidota, la cual se hace más importante hacia las lavas inferiores, presentándose en ellas una asociación de clorita-epidota-sericita y localmente, con zeolita.

DISTRIBUCION DE LEYES DE COBRE

La distribución de leyes sólo se conoce parcialmente en Punta del Cobre. Ninguna de las minas en operación mantienen programas sistemáticos de muestreo y ninguna organización de investigación estatal lo ha realizado, de manera que la única información disponible son las cifras de leyes producidas en cada una de las minas y los datos de los programas de sondaje realizados por ENAMI en los años 1971 - 1974 y el IIG en 1969.

Ante todo, hay que señalar que la distribución de valores de cobre está claramente controlada por la estructura de los depósitos. De tal forma que, en el caso de las vetas con contactos nítidos, el cambio en ley va desde sobre 12% Cu a menos de

0,5% Cu en forma brusca y en muy corto espacio. En el caso de las brechas tabulares (Fig. 7) su paso hacia el "stockwork" es gradual. Dentro de las brechas se producen concentraciones locales y altas, llegando a valores de sobre 10% Cu total. Sus valores medios bordean algo más del 2%. Los mantos son, en general, los cuerpos más ricos y han llegado a tener leyes de más de 20% Cu total. Valores medios de 2 - 3% son comunes. Las altas leyes de las porciones macizas de mantos y vetas, explican la ley media extraída desde el inicio de la explotación de Punta del Cobre.

Las figuras 7 y 8 muestran la forma y distribución de las curvas de isoleyes de + 0,5% Cu y + 2% Cu. Como se aprecia, estas curvas dan muy bien la forma de los depósitos y son, indudablemente, un claro reflejo de ellos. Se puede apreciar también en estas figuras el bajo contenido metálico de las rocas suprayacentes a los depósitos, especialmente al manto. En efecto, tanto los sedimentos que cubren los mantos como las lavas superiores tienen leyes en cobre que fluctúan entre 0,02 - 0,10% Cu, con esporádicos valores superiores. El cambio en ley entre la parte superior del manto cuprífero y los depósitos superiores es muy brusco y se pasa de sobre 2% Cu a menos de 0,2% Cu en pocos centímetros.

OXIDACION Y ENRIQUECIMIENTO SECUNDARIO

Los procesos de oxidación y enriquecimiento secundario están poco desarrollados en Punta del Cobre, a la luz de las observaciones actuales; predominando los minerales oxidados de cobre por sobre los minerales sulfurados de naturaleza supérgena.

La mineralogía presente en los sectores con enriquecimiento secundario incluye calcosina y covelina. En las zonas oxidadas se observan minerales hidratados de cobre como malaquita, antlerita, atacamita, crisocola, cuprita, cobre nativo, además de los llamados "almagres" que constituyen asociaciones mineralógicas compuestas por calcosina, cuprita, hematita y óxidos hidratados de hierro.

Todo el proceso de oxidación y enriquecimiento secundario ha sido, en su gran mayoría, controlado por las estructuras mayores del área. Esto ha hecho que, en las diferentes minas, las profundidades a que llegan los minerales secundarios es

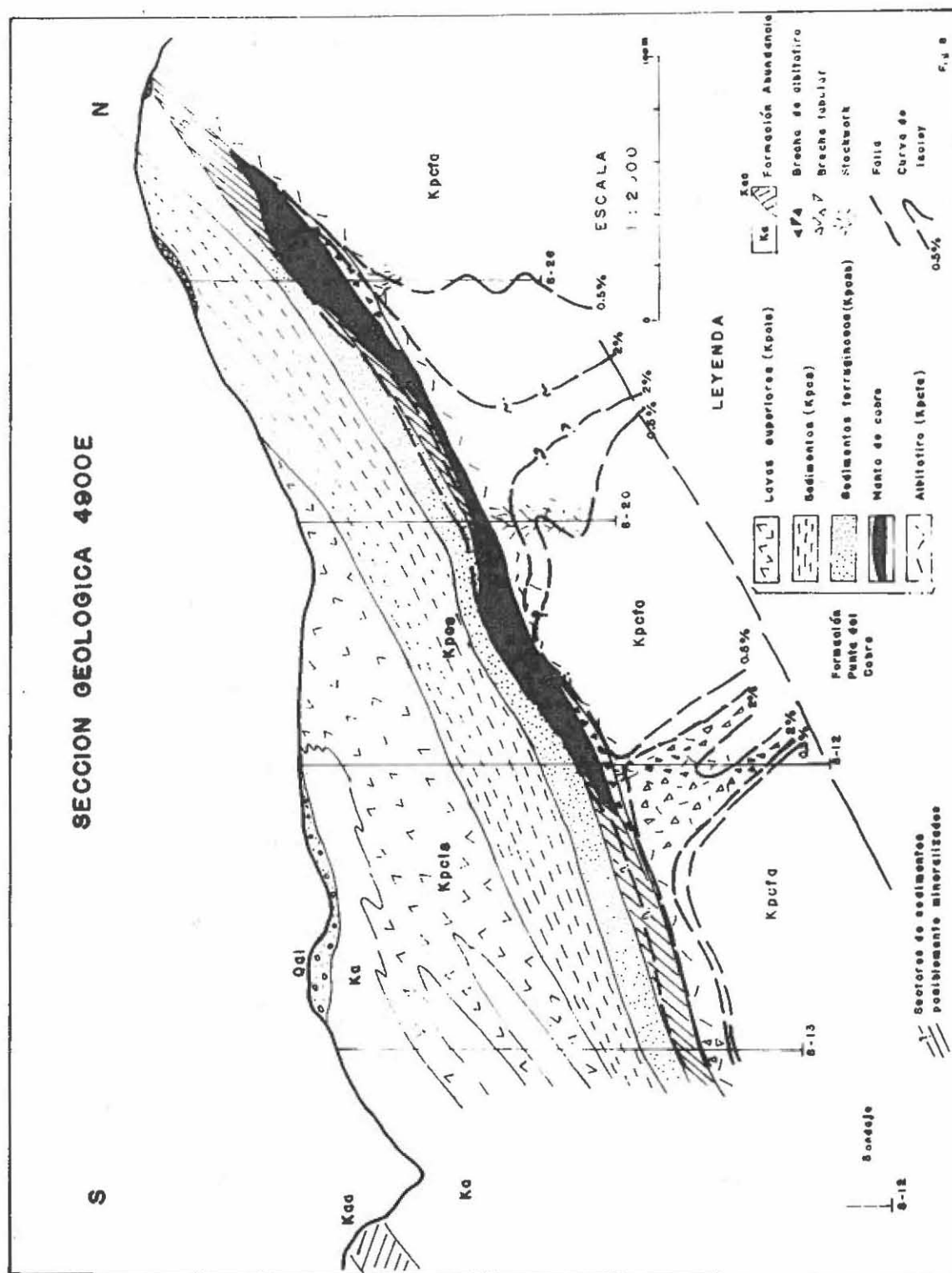


FIG. 8. Sección geológica 4900E transversal mostrando configuración de algunos de los cuerpos mineralizados, señalando ubicación de los mantos, brechas tabulares y enrejados de fracturas.

muy variable. En algunos casos la oxidación ha llegado hasta profundidades de 40 m mientras en otros llega a 200 m o más. En varios lugares de la zona de óxidos se pasa directamente a la zona de sulfuros primarios. En otros, se tiene la zonación completa con óxidos, sulfuros secundarios y sulfuros primarios, en ese orden descendente.

Este esquema, aparentemente caótico, tiene relación con los niveles de erosión que han afectado al distrito. Se sabe de la existencia de 4 fases de evolución geomorfológica en la parte sur del desierto de Atacama (Mortimer, 1973). Se estima que el valle del río Copiapó empezó a excavarse durante la fase 2 o Sierra Checo del Cobre, aunque su edad exacta no se conoce (Mortimer, 1973). La disectación, sin embargo, fue tan profunda que habría alcanzado a las rocas neocomianas, exponiendo probablemente algo de los depósitos de Punta del Cobre. Esta incisión siguió durante la fase 3, cubriendo posteriormente los valles resultantes con depósitos de gravas como parte del desarrollo del llamado pediplano Atacameño (Sillitoe *et al.*, 1968), que tuvo durante el Mioceno una extensión regional muy grande. Durante las fases 2 y 3 se producen los principales episodios de enriquecimiento secundario, que se observan en los depósitos de la región, los cuales aparecen hoy día truncados por la erosión producida durante la fase 4. Como la fase 2 y, posteriormente, la fase 3 disectaron profundamente el valle del río Copiapó, en la zona de Punta del Cobre, hasta el nivel de los depósitos neocomianos, es posible pensar que las eventuales zonas de enriquecimiento producidas fueron casi completamente erodadas, quedando sólo remanentes que son los escasos ejemplos que observamos actualmente en Punta del Cobre. Posteriormente, la fase 3 habría terminado con estas posibles zonas enriquecidas, dejando expuesta sólo las zonas primarias, las que durante esta fase han sufrido la oxidación que hoy observamos. Hay que pensar que la mayoría de los depósitos que han sido preservados en Punta del Cobre ocurren en el flanco este del pliegue anticlinal que los afecta; mientras

que el núcleo y el flanco oeste han sido casi totalmente erodados y con ellos los posibles depósitos que en ellos ocurrían. La única expresión de la existencia de esos depósitos son las vetas que se observan cortando al albitofiro y a las lavas inferiores allí expuestas (Fig. 6).

AMBIENTES DE DEPOSITACION

El carácter calco-alkalino de la actividad volcánica neocomiana inferior que se infiere por la litología de la Formación Punta del Cobre y las litofacies que se asocian, posteriormente, con esta actividad a través de las formaciones Bandurrias y Grupo Chañarcillo, han sugerido a varios autores (Abad, 1977 y Corvalán, 1974) que se trata de una depositación en un ambiente de poca profundidad, del tipo infralitoral a circa-litoral, asociado a una cuenca marginal, de rumbo aproximado a N-S, flanqueada hacia el oeste por un arco de islas o por una cadena volcánica. Este ambiente sugiere profundidades de hasta 200 m. Es muy posible, sin embargo, que estas profundidades hayan sido mayores en las etapas de mayor actividad volcánica producida durante la depositación de la Formación Punta del Cobre, momentos en los cuales la cuenca marginal habría tenido sus máximas dimensiones y desarrollo (Tobar, 1977). Las reales profundidades no se conocen, pero podemos estimar que ellas eran de naturaleza cercana a epibatial. En todo caso, es muy posible que la profundidad no haya sido suficiente para prevenir que soluciones hidrotermales ascendentes, escapando por fracturas en las rocas del fondo de la cuenca, hayan entrado en ebullición precipitando con ello su carga de elementos metálicos (Ridge, 1973). Es interesante, como lo veremos más adelante, determinar las profundidades de la cuenca andina, tanto durante el Jurásico como el Neocomiano, ya que éstas son las que controlan, en un grado importante, la formación de los yacimientos macizos (Ridge, 1973). Se hacen, en consecuencia, muy necesarios los estudios de batimetría de los períodos de tiempo señalados.

MODELO GENETICO

Las características estructurales, texturales, mineralógicas y la clara asociación con las rocas volcá-

nicas de Punta del Cobre, sugieren que se trata de yacimientos de origen volcanogénico del tipo de

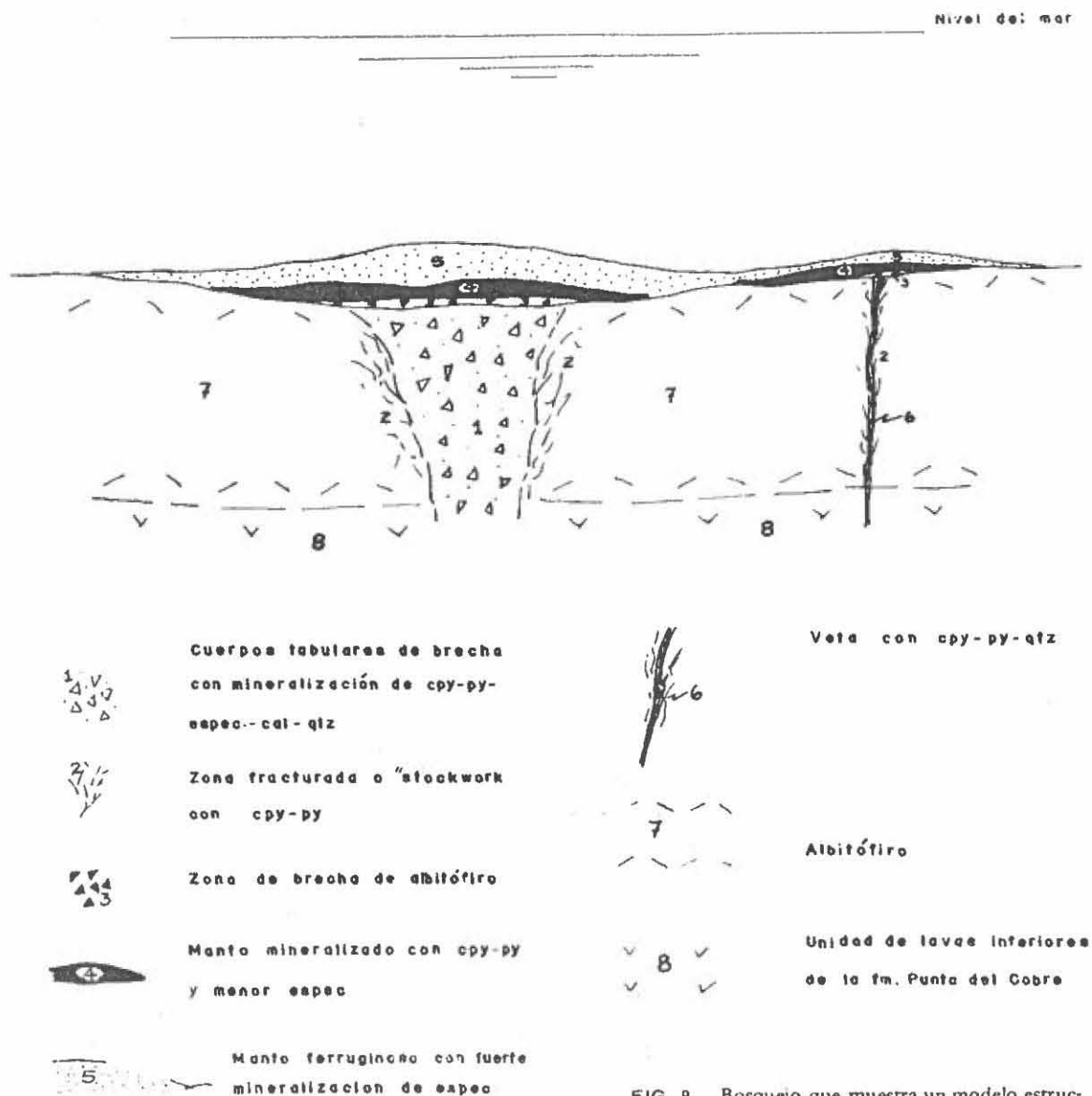


FIG. 9. Bosquejo que muestra un modelo estructural interpretativo e integrado de los diferentes tipos de unidades mineralizadas de Punta del Cobre.

los sulfuros macizos y se interpretan como representando la expresión submarina, durante el Neocomiano, de la actividad geotérmica. De acuerdo con esta hipótesis, tanto las vetas como las brechas, y los respectivos "stockworks" que las rodean, constituyen los conductos de ascenso o de escape de soluciones hidrotermales, siendo los mantos los productos de descarga de estas soluciones (Fig. 9).

Este esquema, así descrito, parecería ser com-

parable con los sulfuros macizos descritos en otros países. Sin embargo, un análisis cuidadoso nos muestra que ello no es totalmente efectivo. De hecho, si comparamos las características geológicas de Punta del Cobre con el cuadro de la figura 1 de Hutchinson (1973), observamos que Punta del Cobre no se asocia con ninguno de los tres tipos allí descritos. El tipo 3 (Chipre) parece ser el más semejante, desde el punto de vista mineralógico, sin embargo, éste corresponde a un ambiente pe-

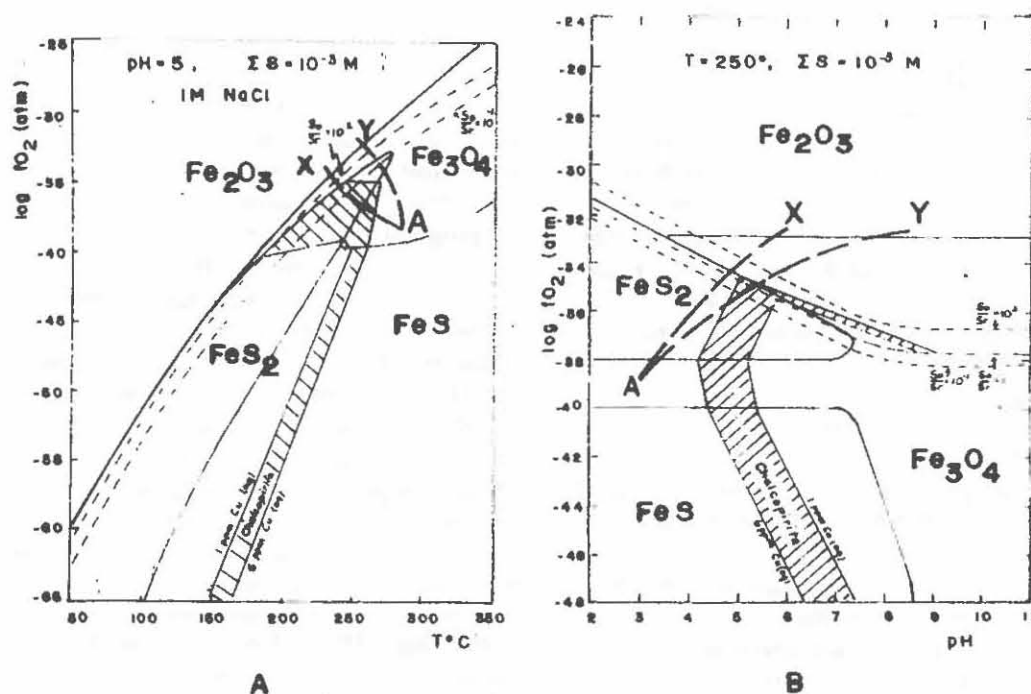


Fig 10

AX equivale a la etapa paragenética I con magnetita-pirita-especularita.

AY equivale a la etapa paragenética II con magnetita-calcopirita-pirita-especularita.

FIG. 10. Gráficos (A) fO_2 - $T^{\circ}C$ y (B) fO_2 - pH mostrando posibles trayectorias que explicarían la secuencia de la mineralización presente en Punta del Cobre. Gráficos tomados de Large (1977).

trológico-tectónico diferente. Si lo comparamos con aquéllos ubicados en ambientes petrológico-tectónico similares como es el tipo 2 (Kuroko) o 1 (Noranda), vemos que difieren en mineralogía. En consecuencia, aparentemente, estamos en presencia de otro tipo de sulfuro macizo con diferencias tales que parecen ubicarlo entre los tipos antes descritos. Hay que hacer notar además el hecho de que son escasos los ejemplos de sulfuros macizos descritos para el Neocomiano.

INTERPRETACION ESTRUCTURAL

Los cuatro tipos de depósitos que componen el distrito Punta del Cobre pueden interpretarse como varias unidades integradas, compuestas por 3 ó 4 de los tipos de depósitos descritos (Fig. 9). De esta forma, las vetas, cuerpos tabulares y zonas fracturadas, constituyen conductos o zonas permeables a través de los cuales se produjo el paso de las soluciones con mineralización. La forma-

ción de cada uno de estos 3 tipos dependió de la intensidad del fenómeno hidrotermal producido. Esta actividad tendría un carácter geotérmico y se habría producido en las rocas tanto bajo el fondo marino como sobre este último. Los mantos serían, en consecuencia, la expresión superficial de esta actividad con una fuerte depositación de minerales de Cu y Fe, entremezclados con sedimentos finos del fondo marino y fragmentos de las rocas infrayacentes. Como se aprecia, cada depósito-unidad de Punta del Cobre está compuesto por un conducto inferior que puede ser una brecha tabular o una fractura rodeada, en ambos casos, por una zona de fracturas a través de las cuales escapan soluciones que dan lugar a un manto superior horizontal a subhorizontal (Figs. 7, 8 y 9).

La mineralización en el manto es de carácter macizo de forma que los sulfuros de Cu y Fe constituyen más del 50% de la roca en volumen.

El cuerpo resultante es lenticular y en él se observa una clara zonación, tanto horizontal como vertical, presentando sectores centrales con una alta razón Cu/Fe; éstos gradan hacia sectores laterales y superiores donde la razón Cu/Fe se hace cada vez menor hasta llegar al límite, donde los sulfuros han sido totalmente reemplazados por especularita. Fuera de los minerales sulfurados y oxidados y de los sedimentos, no existe otro tipo de minerales salvo cuarzo y calcita que actúan como cemento y matriz. Texturalmente, presentan un carácter conglomerádico a brechoso de forma que, tanto los óxidos de hierro como los sulfuros de cobre y hierro, constituyen la matriz del manto, junto con cuarzo y calcita, en menor cantidad.

Como se puede notar, el control estructural ha sido muy importante en la generación de los depósitos.

El límite entre la parte superior ferrífera de los mantos y las rocas sedimentarias suprayacentes es muy definido y éstas aparecen totalmente desprovistas de todo tipo de mineralización.

La presencia de fragmentos de chert en el manto está sugiriendo la existencia, en un momento del tiempo, previo a la actividad hidrotermal que formó los depósitos, de un nivel ferruginoso ubicado sobre el fondo marino que fue violentamente fragmentado al momento de producirse los escapes hidrotermales quedando, posteriormente, como clastos angulosos cementados entre el fango marino y las soluciones ricas en cobre y hierro que se estaban depositando en el suelo oceánico.

Dislocaciones posteriores producidas por fallamiento y plegamiento, han desplazado, en bloques diversos, a los diferentes depósitos-unidad tal como se observan hoy día.

MECANISMO DE FORMACION

La formación de los depósitos habría comenzado con la efusión de lavas andesíticas, las cuales fueron posteriormente espilitizadas, dando lugar al albitófiro, luego de completarse el ciclo volcánico que dio lugar a la unidad de lavas inferiores (Kpeli). Después de la consolidación del albitófiro, se habrían producido fracturas en esta unidad que dieron origen al escape de soluciones ricas en hierro y sílice, las cuales se depositaron como chert en forma exhalativa, sobre el fondo marino obs-

truyendo, a la vez, las salidas de estas estructuras. Se estima que, a través de estos conductos, se produjo acumulación de soluciones moderadamente ácidas, con temperaturas entre 250° a 300°C, de alto contenido en CO₂ disuelto y baja concentración total de azufre. Temperaturas de este orden han sido determinadas por Nisterenko *et al.* (1974), en inclusiones fluidas, en minerales de ganga de otros yacimientos estratiformes del norte de Chile. Es muy posible que estas soluciones se hayan mezclado con agua de mar, dada la permeabilidad del albitófiro producido por su llamamiento y diaclasamiento de tipo columnar. Ello habría traído como consecuencia un aumento en el volumen de estas soluciones, las cuales habrían producido la ruptura de la cubierta de chert, una vez que su presión de vapor fuera mayor que la presión confinante y entraran en ebullición. Nótese que la profundidad de la cuenca era, probablemente, menor de 500 m. considerado límite para que una solución hidrotermal entre en ebullición (Ridge, 1973). Este fenómeno habría producido una descarga hidrotermal explosiva, la cual habría provocado un fuerte fracturamiento tipo stockwork y brechización del albitófiro, depositando mineralización en los espacios abiertos creados y en torno al conducto de descarga. Es posible que este fenómeno se haya repetido más de una vez. Así se explicaría la litología de los mantos mineralizados, donde se han reconocido fragmentos de albitófiro y lavas inferiores, cuya actual situación implica un proceso de tipo explosivo. Paralelamente, habría producido la alteración hidrotermal del albitófiro.

Este proceso explosivo, que implica descargas hidrotermales de alta energía, habría sido seguido por etapas de baja energía, las cuales habrían causado la depositación de sulfuros de tipo bandeado que se han reconocido en la parte alta de los mantos mineralizados (Henley y Thornley, 1979).

El proceso de depositación de sulfuros de cobre y óxidos de hierro está determinado por la solubilidad del Cu y Fe y por la formación de complejos. Estos dos parámetros son función del pH, temperatura, fugacidad de oxígeno y concentración total de azufre. Large (1977) desarrolló, usando estos parámetros, un modelo para la depositación de los sulfuros macizos. Sin embargo, sus conclusiones se restringen a depósitos formados a profundidades mayores de 500 metros, a 250°C

y 1 M NaCl, de forma que las soluciones no entren en ebullición, aunque reconoce que existirían depósitos macizos formados a menor profundidad, a temperaturas menores y a partir de soluciones con alto contenido en NaCl. Al respecto hay que hacer notar que Nisterenko *et al.* (1974) informaron de contenidos de hasta 35% en peso de NaCl para yacimientos tipo manto como El Salado, ubicado también en rocas neocomianas como Punta del Cobre. Es posible, según Solomon y Walshe (1979) que soluciones a 300°C comiencen a ebullición a 10 ó 100 m, bajo la interfase roca-agua de mar y asciendan, manteniéndose en la curva profundidad-punto de ebullición hidrostático. De acuerdo a esto, se produciría un descenso muy restringido de la temperatura y una leve pérdida de volátiles. A pesar de que se produciría precipitación, también habría formación de sulfuros macizos en el fondo marino.

Usando el modelo de Large (1977) y tomando en cuenta las características explosivas del fenómeno hidrotermal en Punta del Cobre, se puede explicar el esquema de depositación de los sulfuros y óxidos presentes. En la figura 10 se ha reproducido el gráfico fO_2 -T°C y pH- fO_2 , de Large (1977), que corresponde a las figuras 8 y 7, respectivamente, y en él se indican las posibles trayectorias que tomaron las soluciones hidrotermales en Punta del Cobre. Desgraciadamente, no tenemos ningún estudio que entregue datos sobre las características físico-químicas de las soluciones, de forma que las trayectorias indicadas son sólo ilustrativas, pero creemos se deberían acercar algo a la realidad.

En los gráficos A y B de la figura 10 el punto A se ubica a temperatura y fO_2 altas y a baja concentración total de azufre (ΣS) disuelto y pH bajo. Esta situación sería la existente a lo largo de los conductos de ascenso de soluciones. La mezcla con agua de mar generará un aumento en fO_2 , ΣS y el pH y un descenso de temperatura. Esto conlleva la precipitación de magnetita y luego pirita, a lo largo del conducto. La depositación de magnetita es particularmente notoria en las lavas inferiores (Araya *et al.*, 1970). Se estima que el mar neocomiano tenía carácter oxidante, de forma que su razón So/Sr (azufre oxidado/azufre reducido) era mayor que uno; ello favoreció la precipitación de especularita en la zona

de descarga, lo que está representado por el punto X de ambos gráficos. Esto demuestra que la fO_2 habría aumentado al llegar la solución a ponerse en contacto con el mar. La trayectoria A - Y de los gráficos A y B ilustra la etapa de depositación de la calcopirita, la cual precipitará junto con la pirita en la medida que aumenta la razón So/Sr hasta valores no superiores a 10^2 (Large, 1977). El descenso de la temperatura de la solución y el descenso de ΣS , producto de la precipitación de la calcopirita, incrementa relativamente el hierro disponible y la fO_2 ; como consecuencia de ello se irá depositando hierro como especularita sobre el manto cuprífero y se extenderá lateralmente inclusive fuera del depósito con cobre. Ello está indicado en los gráficos A y B (Fig. 10) por el punto Y. El resultado final será un conducto sellado por la precipitación de magnetita y pirita en profundidad, luego calcopirita con menos magnetita y pirita en profundidad, luego calcopirita con menos magnetita en las cercanías del conducto de descarga y calcopirita con menos pirita y especularita en la zona de descarga, constituyendo los mantos, para finalmente depositarse sólo especularita sobre el manto cuprífero. Este esquema es el que observamos actualmente en Punta del Cobre.

Paralelamente con la depositación de los sulfuros y óxidos, el paso de las soluciones por los conductos de ascenso produjo cierto grado de alteración hidrotermal. En todos los sectores, alrededor de vetas y brechas y dentro de éstas, se desarrolló una extensa cloritización y albitización acompañada por silicificación y carbonización. Tanto en vetas como en brechas se depositaron cuarzo, mayoritariamente, y carbonatos. Se ha observado un importante desarrollo de carbonatos como cemento de las brechas. Esto estaría explicado como producto de la ebullición de soluciones con alta fCO_2 , en presencia de una alta actividad de calcio debida a la albitización de plagioclasas. En algunos sectores se habría generado sericitización, producto de un aumento en la actividad de los iones H^+ , lo cual es una consecuencia de la depositación de magnetita y pirita en el conducto de ascenso, de acuerdo a las reacciones señaladas por Large (1977). La sericitización ha producido un cierto blanqueamiento del albitóforo y se restringe a las zonas mejor mineralizadas.

ORIGEN DE LAS SOLUCIONES HIDROTHERMALES

Sobre el origen de las soluciones hidrotermales que dieron lugar a Punta del Cobre, tampoco existe un consenso claro. Por ello se sugieren dos posibles mecanismos.

- a) Soluciones magmáticas provenientes de una fuente de origen profundo, las cuales habrían traído la gran mayoría de los elementos metálicos y habrían sufrido la mezcla con agua de mar en la medida que ascendían por los conductos existentes.
- b) Recirculación de agua de mar que habría descendido a través de las fracturas del albitóforo,

hasta alcanzar una fuente calórica, a una profundidad tal que elevase su temperatura permitiéndole lixiviar los elementos metálicos de las rocas atravesadas, generando con ello soluciones hidrotermales de más alta densidad, las cuales, al encontrar conductos hacia la superficie, habrían ascendido por ellos.

Mientras no se disponga de estudios de detalle acerca de la química del proceso de mineralización y alteración hidrotermal en estos depósitos, no es posible inclinarse por ninguna de estas alternativas. En consecuencia, aquí se dan como hipótesis de trabajo.

COMPARACION CON OTROS DEPOSITOS SIMILARES EN EL PAIS

Uno de los aspectos que llama la atención al analizar la metalogénesis chilena, es la falta de desarrollo de depósitos tipo sulfuros macizos, si consideramos que los ambientes volcánico-marinos han existido durante el desarrollo tanto de los ciclos Hercínico (Paleozoico) como Andino (Mezozoico). Vemos así que durante los inicios del ciclo Andino, que es el más conocido, especialmente durante el Jurásico y Cretácico Inferior, se desarrolló un arco volcánico, el cual limitaba hacia el oeste una cuenca marginal (cuenca andina) la que era interrumpida hacia el este por el continente. Esta cuenca emergió en forma definitiva a fines del Neocomiano, terminando con ello su evolución.

Durante la evolución de la cuenca y del arco de islas se produjo una gran actividad volcánica en este último, la cual se asocia con mineralización económica especialmente durante el Jurásico. Sin embargo, los depósitos formados no tienen características de sulfuros macizos, por lo menos los ya descubiertos, sino que constituyen yacimientos estratiformes y estrato-ligados donde, esencialmente, ocurre sólo cobre; éste está restringido a ciertos niveles de coladas volcánicas, concentrándose la mineralización en las partes vesiculares de estas coladas. Es así como, en la Formación La Negra, ocurre una serie de depósitos de este tipo que se extiende desde Tocopilla hasta Antofagasta. Sin embargo, las características geo-

lógicas de estos yacimientos sugieren que se trata de una mineralización más bien asociada a un volcanismo subaéreo, de tipo continental, y no submarino. Ahora bien, es posible que el carácter algo restringido de la cuenca Andina haya significado ambientes marinos de poca profundidad, lo que, bajo las condiciones reseñadas anteriormente en relación al problema de ebullición de las soluciones (Ridge, 1973), puede haber significado que no se produjeran descargas de estas soluciones al fondo marino, de tal manera que sólo encontraríamos, potencialmente, zonas de stock-work o vetas. Por otro lado, buena parte de los depósitos sedimentario-volcánico del Jurásico, que constituyeron la cuenca, se encuentran parcial o totalmente erodados y con ellos, los potenciales depósitos formados.

Durante el Neocomiano sigue la evolución del volcanismo y de la cuenca andina, produciéndose una restricción paulatina de esta cuenca por regresión del mar neocomiano, con una total emergencia de la cuenca durante el Aptiano-Albiano. Pero, dado que la erosión no ha eliminado los depósitos neocomianos, podemos observar mejor el desarrollo de este sistema, especialmente desde Chañaral al sur. En efecto, la interdigitación entre el neocomiano volcánico (Bandurrias) y marino (Grupo Chañarcillo) representa el ambiente perfecto para la ubicación de yacimientos macizos y es aquí, precisamente, donde se ubica Punta del Cobre.

Una ocurrencia tan clara como ésta se presenta en Aisén con el grupo Cerro Estatuas-El Toquí, donde ha sido reconocida, dentro del Neocomiano, mineralización de Cu-Pb-Zn, con características propias de yacimientos macizos (Reeves *et al.*, 1978). Fuera de estos ejemplos, no tenemos otros casos conocidos de mineralización maciza. Sin embargo, al igual que durante el Jurásico, se reconocen niveles volcánicos y volcano-clásticos con mineralización en vesículas, que tendrían un origen similar a aquél asignado a los yacimientos estratiformes jurásicos (Ruiz *et al.*, 1971). De nuevo valen las razones ya mencionadas para no encontrar estos yacimientos, las cuales serían aún

más críticas dado que la cuenca neocomiana tiene características de poca profundidad, lo que haría ebullición a las soluciones hidrotermales y precipitar sus metales antes de llegar a la interfase roca-agua de mar, si las condiciones de temperatura lo permitieran, (Ridge, 1973). El yacimiento El Soldado pareciera representar uno de estos casos. Se trata de cuerpos con forma de chimeneas, que estructuralmente constituyen verdaderos enrejados de fracturas, ubicados exclusivamente en lavas andesíticas. Es posible sostener la hipótesis que estas chimeneas constituyen los conductos de soluciones hidrotermales que, por entrar en ebullición, depositaron su carga de sulfuros sin llegar a descargarse en el fondo marino.

CONCLUSIONES

- a. Las características estructurales, litológicas, mineralógicas y la clara asociación con rocas volcánicas de los depósitos del distrito Punta del Cobre sugieren que se trata de yacimientos volcanogénicos del tipo sulfuros macizos y, como tales, representan evidencias de actividad geotérmica submarina durante el desarrollo de la cuenca andina en el Neocomiano.
- b. La zonación mineralógica presente se explica por sucesivos cambios en la química de las soluciones hidrotermales, a medida que ascendían y se mezclaban con agua de mar, hasta descargarse en el fondo marino.
- c. La presencia de cuerpos tabulares de brecha y stockworks se explica por la acción de soluciones de alta energía, que escapan a través del conducto de descarga al entrar en violenta ebullición. Ello aclara el carácter caótico de los mantos mineralizados, ubicados sobre el conducto de descarga.
- d. Las soluciones hidrotermales ascendentes, además de precipitar minerales metálicos, son las responsables del cuadro de alteración de las rocas silicatadas.
- e. El origen de las soluciones se explica por la recirculación dentro de un sistema convectivo, generado a partir de agua de mar descendiendo por percolación y calentada por alguna fuente térmica de profundidad, o bien por la mezcla entre el agua de mar percolante y soluciones hidrotermales de origen magmático más profundo.
- f. La cuenca andina presenta ambientes volcanosedimentarios favorables para encontrar yacimientos macizos similares a Punta del Cobre, o bien zonas de stockwork y vetas que, por entrar en ebullición, no alcanzaron a descargar en el fondo marino como parecen ser los depósitos tipo El Soldado.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento a los geólogos Sres. Walter Espinoza, Fernando Henríquez y George Armbrust por haber revisado críticamente el manuscrito original de este trabajo y por sus valiosos comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

- ABAD, E. 1977. Acerca de la paleogeografía neocomiana en la región al sur de Copiapó (Provincia de Atacama-Chile). *Asoc. Geol. Argent., Rev.*, Vol. 32, No. 1, p. 24-33.
- ALFARO, G. 1967. Geología y yacimientos metalíferos del área Punta del Cobre entre Tierra Amarilla y Quebrada Meléndez. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 120 p. Santiago.
- ARAYA, R.; SILVA, L.; ORTIZ, F. 1970. Informe geológico y geofísico sobre un programa de cuatro sondeos de exploración realizados en el distrito minero de Punta del Cobre, Tierra Amarilla, Provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol. (inédito)*, 71 p. Santiago.
- CORVALAN, J. 1974. Estratificación del Neocomiano marino al sur de Copiapó, Provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol., Rev. Geol. Chile*, No. 1, p. 13-36.
- FLORES, H. 1938. Informe geológico del mineral Punta del Cobre, Atacama. *Bol. Minas y Petróleo (Chile)*, Vol. 8, No. 80, p. 136-146.
- HAAS, J.L. 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Econ. Geol.*, Vol. 66, No. 6, p. 940-946.
- HENLEY, R.W.; THORNLEY, P. 1979. Some geothermal aspects of polymetallic massive sulfide formation. *Econ. Geol.*, Vol. 74, No. 7, p. 1600-1612.
- HUTCHINSON, R.W. 1973. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Econ. Geol.*, Vol. 68, No. 8, p. 1223-1246.
- LAMBERT, I.B.; SATO, T. 1974. The Kuroko and associated ore deposits of Japan: a review of their features and metallogenesis. *Econ. Geol.*, Vol. 69, No. 8, p. 1215-1236.
- LARGE, R.R. 1977. Chemical evolution and zonation of massive sulfide deposits in volcanic terrains. *Econ. Geol.*, Vol. 72, No. 4, p. 549-572.
- MOORE, S.L.; FALCON, E.; GRUENWELD, R. 1959. Geology and ore deposits of the Punta del Cobre district, Department of Copiapó, Province of Atacama, Chile. *Inst. Invest. Geol. (Chile) and U.S. Geol. Surv. (unpubl.)*, 126 p.
- MORTIMER, C. 1973. The Cenozoic history of the southern Atacama Desert, Chile. *Geol. Soc. Lond., J.*, Vol. 129, Part 5, p. 505-526.
- NACIONES UNIDAS; EMPRESA NACIONAL DE MINERÍA. 1972. Investigación detallada de minerales en áreas seleccionadas de las provincias de Atacama y Coquimbo. Proyecto Chile-28. NU, 22 Vols. Nueva York.
- NISTERENKO, G.; LOSERT, J.; CHAVEZ, L.; *et al.* 1974. Temperaturas y presiones de formación de algunos yacimientos cupríferos de Chile. *Inst. Invest. Geol., Rev. Geol. Chile*, No. 1, p. 74-80.
- ORTIZ, F.; ARAYA, R.; FRANQUESA, F.; *et al.* 1966. Informe geológico del distrito minero de Punta del Cobre. *Inst. Invest. Geol. (Chile), Publ. Espec.* No. 1, 4 Vols.
- REEVE, E.J.; WELLMER, F.W.; WENTZLAU, D.; *et al.* 1978. Stratabound base metal deposits of the Tōqui District, Aysen, Chile. (Abstract.) *Geol. Soc. Am., Abstr. Programs*, Vol. 10, No. 7, p. 477.
- RIDGE, J.D. 1973. Volcanic exhalations and ore deposition in the vicinity of the sea floor. *Miner. Deposita*, Vol. 8, No. 4, p. 332-348.
- RUIZ, C. 1942. Estudio geológico de la región Ojancos-Punta del Cobre. *In Congr. Panam. Ing. Minas y Geol.*, No. 1, Anales, p. 1186-1225.
- RUIZ, C.; AGUILAR, A.; EGERT, E.; *et al.* 1971. Yacimientos chilenos estratiformes de sulfuros de cobre. *Inst. Ing. Minas (Chile), Rev. Minerales*, Vol. 26, No. 115, p. 3-11.
- SANGSTER, D.F. 1972. Precambrian volcanogenic massive sulfide deposits in Canada: A review. *Can. Geol. Surv., Pap.* No. 72-22, 44 p.
- SATO, T. 1977. Kurako deposits; their geochemistry and origin. *In Volcanic processes in ore genesis (anonymous)*. *Inst. Mining Metallurg., London, Spec. Publ.* No. 7, p. 153-161.
- SEGERSTROM, K. 1960. Cuadrángulo Quebrada Paipote, Provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile*, No. 3, 35 p.
- SEGERSTROM, K. 1968. Geología de las hojas Copiapó y Ojos del Salado, Provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol. (Chile), Bol.*, No. 24, 58 p.
- SEGERSTROM, K.; RUIZ, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile*, No. 6, 115 p.
- SEGERSTROM, K.; THOMAS, H.; TILLING, R. 1963. Cuadrángulo Pintadas, Provincia de Atacama. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile*, No. 12, 52 p.
- SILLITOE, R.H.; MORTIMER, C.; CLARK, A.H. 1968. A chronology of landform evolution and supergene mineral alteration, southern Atacama Desert, Chile. *Inst. Min. Metall., Trans., Sect. B.*, Vol. 77, p. 166-169.
- SOLOMON, M.; WALSHE, J.L. 1979. The formation of massive sulfide deposits on the sea floor. *Econ. Geol.*, Vol. 74, No. 4, p. 797-813.
- TILLING, R. 1962. Batholith emplacement and contact metamorphism in the Paipote-Tierra Amarilla area, Chile. Ph. D. Thesis, Univ. Yale, 202 p.
- TOBAR, A.B. 1977. Stratigraphy and structure of the El Salvador-Potrerillos region, Atacama, Chile. Ph. D. Thesis, Univ. California, Berkeley, 153 p.
- VON OSTEN, G. 1969. Geología general y prospección geofísica del área Punta del Cobre entre Tierra Amarilla y Punta Bateas. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 143 p. Santiago.