

# MINERALIZACIONES TIPO COBRE PORFIDICO EN CHILE

HARRY NEUMANN J. *Instituto de Investigaciones Geológicas*

## RESUMEN

Las mineralizaciones tipo cobre porfídico se encuentran principalmente entre las latitudes 18° y 33° S, emplazadas en diversos tipos litológicos. Están espacial y genéticamente asociadas a rocas intrusivas de composición principalmente granodiorítica-tonalítica, cuyas edades corresponden al lapso Cretácico Superior-Plioceno. Estas mineralizaciones están caracterizadas por alteración hidrotermal, que contiene una fase sulfurada compuesta principalmente por pirita, calcopirita, molibdenita y bornita; en partes, la alteración hidrotermal ocurre zonada. Asociada a esta alteración existen brechas hidrotermales intrusivas y de reemplazo. Finalmente, se señala un modelo genético de la mineralización tipo cobre porfídico y se indican algunas guías de prospección.

## ABSTRACT

The porphyry copper type mineralisations are located mainly between the 18° and 33° latitude south, and are emplaced in different rock types. They are spatially and genetically associated to Upper Cretaceous-Pliocene intrusives predominantly of granodioritic-tonalitic composition. These mineralisations are characterised by hydrothermal alteration, which contain sulfides, mainly pyrite, chalcopyrite, molybdenite and bornite; in places, the hydrothermal alteration occurs in zoned form. Hydrothermal breccias of intrusive and replacement type are found associated with this alteration. Finally, a genetic model of porphyry copper type mineralisation and some prospection guides are given.

## INTRODUCCION

El presente trabajo (\*) se refiere al estudio de zonas de alteración hidrotermal tipo cobre porfídico y de chimeneas de brecha, que el autor comenzó a desarrollar en 1969, conjuntamente con el geólogo británico Richard H. Sillitoe, como programa del Instituto de Investigaciones Geológicas. Se visitaron aproximadamente 50 zonas, localizadas principalmente entre las latitudes 18° y 33° S (fig. 1); algunas de éstas fueron mapeadas mientras que otras sólo se reconocieron en forma preliminar. El tiempo de trabajo en cada área varió desde 3 semanas para aquellas en que se realizó levantamiento geológico, hasta 1 a 2 días para los reconocimientos preliminares.

Las observaciones de terreno han sido en gran parte confirmadas posteriormente por medio de técnicas de luz transmitida y reflejada, y por difracción de rayos X. Sin embargo, no se han realizado estudios sistemáticos de laboratorio. Además, se realizaron deter-

minaciones radiométricas por el método K/Ar en muestras representativas de roca y de alteración hidrotermal, en el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Queen's (Canadá).

Generalmente los estudios referentes a mineralización tipo cobre porfídico se han efectuado en yacimientos en explotación o que han sido trabajados, donde la geología está expuesta en tres dimensiones. El presente estudio incluye principalmente zonas que nunca han sido explotadas, salvo en muy reducida escala, por lo que la información de profundidad es limitada. Pese a ello, se puede obtener mucha información útil de los afloramientos de superficie, que en partes exhiben una componente vertical considerable. Las zonas examinadas varían desde eventuales yacimientos hasta áreas con alteración hidrotermal sin evidencias de mineralización útil.

En octubre de 1971 el colega británico regresó a su país, continuando el presente autor con el programa en forma interrumpida. Actualmente, se está completando la elaboración de los datos recolectados y se espera publicar en el IIG los antecedentes y conclusiones del programa completo. La presente publicación tiene por objeto dar a conocer algunos antecedentes generales de las mineralizaciones tipo cobre porfídico y algunas conclusiones alcanzadas durante el desarrollo del programa, especialmente aquellas relacionadas con prospecciones y que están siendo usadas por el Instituto de Investigaciones Geológicas.

Más de la mitad de la producción mundial de cobre proviene de los yacimientos de cobre porfídico. Estos corresponden a depósitos de gran tonelaje, y con baja ley y aproximadamente equidimensionales, cuya mineralización sulfurada, representada por pirita y calcopirita con menores cantidades de molibdenita y bornita, se encuentra diseminada y en venillas polidireccionales; generalmente contienen trazas de oro y plata. La mena hipógena raramente excede 1% de Cu, y comúnmente es menor que 0,5%. Un importante aumento de estos valores se ha producido en muchos yacimientos por procesos supérgenos. Los desarrollos hidrotermales tipo cobre porfídico corresponden a áreas con características de cobre porfídico,

(\*) Presentado en las Jornadas de Trabajo 1972 del Instituto de Investigaciones Geológicas celebradas en enero de 1973 en la ciudad de Antofagasta.

especialmente aquellas relacionadas con alteración hidrotermal, aunque no necesariamente constituyen depósitos de leyes comerciales.

### MARCO GEOLOGICO

En Chile, los yacimientos tipo cobre porfídico y los desarrollos hidrotermales del mismo tipo conocidos, se distribuyen longitudinalmente en una franja de dirección aproximadamente N-S y de varios kilómetros de ancho, que según los antecedentes actuales continúa hacia el norte hasta Ecuador. Dicha franja corresponde en grandes rasgos a la posición de la dorsal miolimitar que separa los ambientes eu y miogeosinclinal del Ciclo Andino (Frutos, 1972), que hacia el sur se extiende hasta la latitud  $36,5^{\circ}$  donde pasaría el territorio Argentino (Frutos, *op.cit.*). En Magallanes, la naturaleza paleogeográfica de la separación de estos dos ambientes no está bien definida pero aparentemente la mayoría de las intrusiones graníticas (*sensu lato*) están emplazadas en el dominio eugeosinclinal (Suárez, comunicación personal, 1972).

En Chile, los desarrollos hidrotermales tipo cobre porfídico se encuentran emplazados en diversos tipos litológicos siendo los más comunes las rocas volcánicas andesíticas, los intrusivos félsicos y las rocas sedimentarias marinas o continentales, que corresponden al lapso Triásico-Terciario. Generalmente estos desarrollos no se presentan asociados directamente con fallas regionales, aunque en zonas como Copacura, El Abra, Domeyko y Chuquicamata entre otras, existen tales estructuras.

### ROCAS INTRUSIVAS

Las rocas intrusivas responsables de los procesos hidrotermales presentan generalmente composición tonalítica o granodiorítica; sin embargo, se encuentran también composiciones más ácidas, como el granito de Los Loros, y más básicas, como el pórfido andesítico de Andacollo. Estos intrusivos corresponden normalmente a pequeñas apófisis, ya sean pórfidos o rocas faneríticas porfíricas, que tienden a presentar textura más equigranular y gruesa en profundidad a medida que se aproximan al plutón félsico al cual están asociados. El grado de erosión de una determinada zona es factor importante que controla, entre otras características, el afloramiento o no de estos intrusivos hipabisales o su carácter textural (Neumann y Sillitoe, 1972). Así tenemos situaciones como Cerro Colorado donde no aflora el intrusivo responsable de los fenómenos hidrotermales (Neumann, 1971), o como Los Loros donde éste corresponde a un granito equigranular de grano relativamente grueso y casi sin fases porfídicas evidenciando una erosión avanzada,

pasando por todas las variaciones texturales intermedias.

Estas apófisis hipabisales también pueden corresponder a complejos intrusivos, es decir, los fenómenos hidrotermales pueden estar asociados a varios intrusivos félsicos comagmáticos prácticamente sincrónicos, como es el caso de El Abra donde la etapa más intensa de mineralización-alteración está asociada a pórfido riódacítico existiendo también otras anteriores (y posteriores) de importancia mucho menor relacionadas con otros intrusivos del mismo complejo félsico.

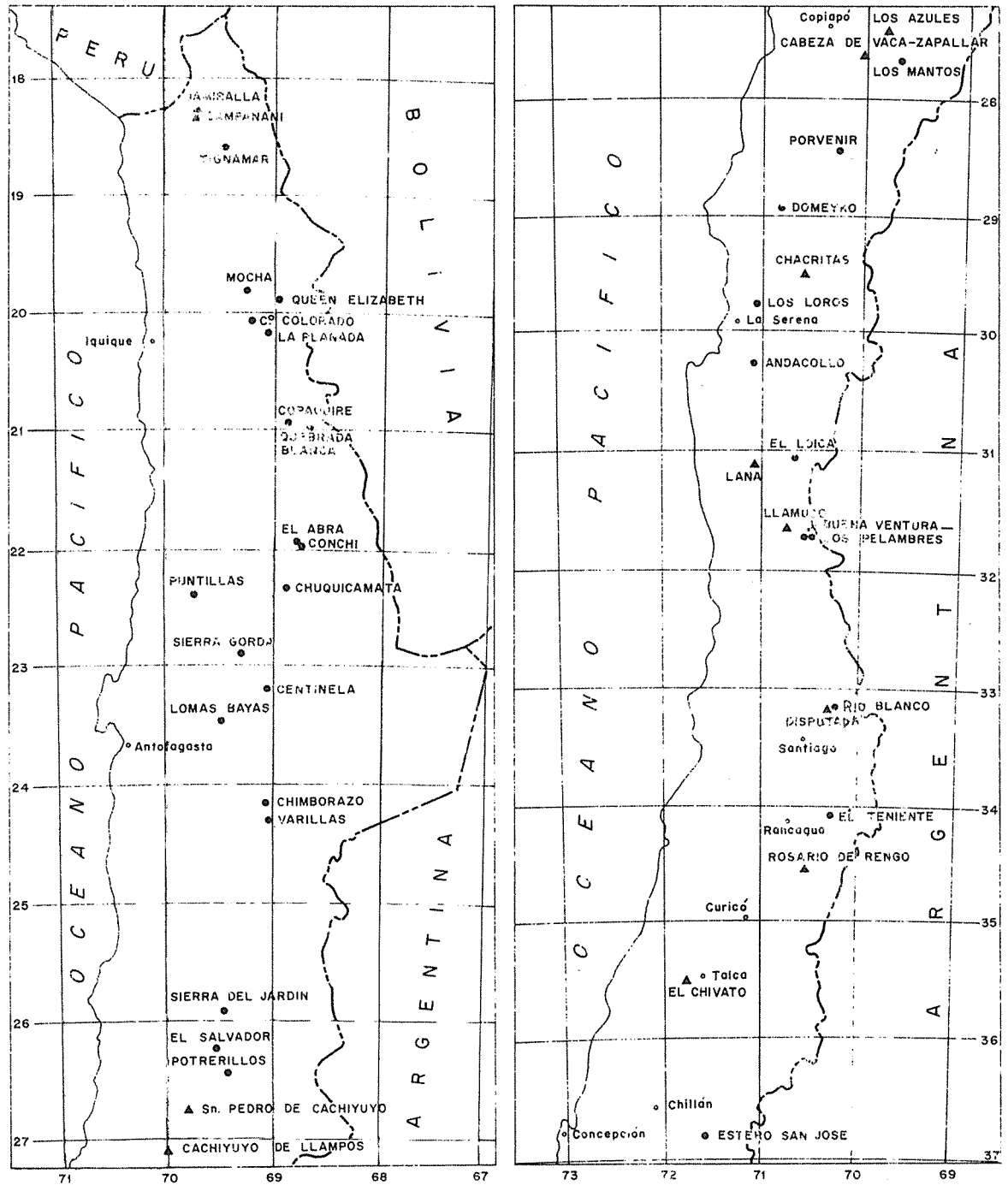
Según las dataciones radiométricas efectuadas, los intrusivos y sus desarrollos hidrotermales asociados son mayormente de edad oligocena. Sin embargo, el rango de edades varía desde la parte media del Cretácico Superior (Los Loros:  $89 \pm 0,6$  m.a.) hasta el Plioceno (El Teniente:  $4,32 \pm 0,88$  m.a. y  $5,62 \pm 0,11$  m.a.; Río Blanco:  $4,59 \pm 0,08$  m.a.). Los desarrollos tipo cobre porfídico aparentemente tienden a ser más jóvenes a medida que se encuentran a mayor latitud; sin embargo, el número de dataciones radiométricas efectuadas no es suficiente para demostrar tal hipótesis.

### ALTERACION HIDROTERMAL

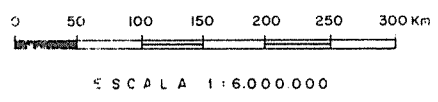
La alteración hidrotermal, fenómeno típico de las mineralizaciones tipo cobre porfídico, conlleva una fase metálica sulfurada y se caracteriza por la tendencia que presenta a disponerse en zonación concéntrica; el centro está ocupado por facies de estabilidad de feldespatos, rodeada por facies destructora de feldespatos la que a su vez está envuelta por propilitización. Para la clasificación de la alteración hidrotermal se han tomado los criterios definidos por Meyer y Hemley (1967) combinados con los de Creasey (1959; 1966).

La *facies de estabilidad de feldespatos* corresponde a lo que comúnmente se denomina alteración potásica. Esta se ubica generalmente en la parte central de la zona de alteración hidrotermal y es común que afecte, además del intrusivo hipabisal, también a las rocas encajadoras. Se caracteriza por la presencia de feldespato potásico y biotita, con menores cantidades de anhidrita, sericita, algunos carbonatos y magnetita o hematita, y la ausencia de arcillas hipógenas. La razón pirita/calcopirita es en general baja; comúnmente existe también molibdenita y bornita; los sulfuros ocurren principalmente diseminados pero existen también en vetillas hacia los bordes de la zona con alteración potásica, sugiriendo el carácter magmático tardío de la facies. Las mejores leyes hipógenas de Cu (y de Mo) de muchos yacimientos se encuentran en esta zo-

Fig. 1. MAPA DE UBICACION DE MINERALIZACIONES TIPO COBRE PORFIDICO Y BRECHAS HIDROTERMALES DE COLAPSO.



- Mineralización tipo cobre porfídico
- ▲ Brecha hidrotermal de colapso
- Ciudad



na.

La *facies destructora de feldespatos* está representada por sericitización, argilización y silicificación. La primera comúnmente ocupa una posición interior y está tipificada por la destrucción de la textura original de la roca y la presencia de un agregado de cuarzo y sericita. La razón pirita/calcopirita es mayor que en el caso anterior; también puede haber molibdenita; los sulfuros se encuentran principalmente en vetillas, y en muchos casos la mayor concentración de mineralización sulfurada se presenta en una zona ubicada en el límite de esta alteración con la facies de estabilidad de feldespatos. La sericitización grada a argilización y silicificación.

La alteración argílica está caracterizada por la alteración de los feldespatos a arcillas (caolinita y/o montmorillonita) con algo de sericita y por la ausencia de epidota. Pirita es el sulfuro dominante y se encuentra esencialmente en vetillas. La argilización grada a silicificación y, externamente, a alteración propilítica.

La silicificación no ocupa una posición preferencial y está caracterizada por el reemplazo de la roca por cuarzo criptocristalino acompañado por cantidades menores de sericita, arcillas y clorita, indicando transición hacia asociaciones sericiticas, argílicas y propilíticas, respectivamente. En general pirita es el único sulfuro presente, comúnmente diseminada y en partes en grandes cantidades.

La propilitización constituye la zona más externa de los desarrollos hidrotermales y se caracteriza por la presencia de clorita, epidota, calcita y albita; los sulfuros son escasos y están representados casi exclusivamente por pirita.

En rocas calcáreas los procesos hidrotermales producen alteración a silicatos cálcicos, caracterizada por epidota, granate, actinolita y pirita. En Potrerillos esta alteración se presenta en una extensa zona marginal al yacimiento y en Copaquire ocupa una angosta franja.

Esta zonación de alteración se observa en varios desarrollos hidrotermales tipo cobre porfídico en Chile, entre ellos Copaquire y Los Pelambres; sin embargo, en algunas localidades se presenta incompleta, como es el caso de Cerro Colorado, Lomas Bayas y Los Morteros, o es menos simétrica como en El Abra, Quebrada Blanca, Mocha y Domeyko (Neumann y Sillitoe, 1972), lo que depende, entre otras causas, del grado

de erosión alcanzado.

## BRECHAS HIDROTERMALES

Generalmente en las áreas con desarrollos tipo cobre porfídico existen brechas hidrotermales. Estas han sido clasificadas en base a una modificación de la terminología propuesta por Bryner (1961; 1968). Se distinguen fundamentalmente tres tipos: brecha intrusiva hidrotermal, brecha de reemplazo y brecha hidrotermal de colapso. Las dos primeras variedades son típicas de desarrollos tipo cobre porfídico. Generalmente todas exhiben alteración hidrotermal en los fragmentos y efectos de corrosión química; los clastos normalmente están sericitizados, argilizados y/o silicificados.

Las *brechas intrusivas hidrotermales* varían desde rocas fracturadas *in situ* (o brecha de ruptura) caracterizadas por vetillas polidireccionales sin movimiento de fragmentos, hasta estructuras formadas por clastos completamente redondeados con alto grado de esfericidad, contenidos en una matriz de polvo de roca (p. ej.: filón de guijarros, más comúnmente denominado "pebble dike"). El grado intermedio, y más frecuente, corresponde a brechas intrusivas hidrotermales compuestas por clastos angulosos de diversa litología, que generalmente evidencian ascensión de material, rodeados por una mezcla de polvo de roca, cuarzo, turmalina y sericita en diversas proporciones y en partes acompañados por otros minerales. Se les denomina "intrusivas" porque se supone son formadas por fluidos hidrotermales ascendentes que generalmente también transportan material.

Las brechas de ruptura son comunes en casi todas las áreas con desarrollo hidrotermal; ocurren en zonas sericitizadas y argilizadas y en partes también en el borde del núcleo con alteración potásica. Los filones de guijarros se ubican sin posición preferencial dentro de la zonación hidrotermal, siendo más escasos en las zonas de alteración potásica y propilítica; generalmente son poco abundantes, existiendo zonas donde no han sido encontrados; sus potencias varían desde pocos centímetros como se observa en Copaquire, donde son relativamente abundantes, hasta algunos decímetros, aunque excepcionalmente se encuentran de 3 m como en Conchi. La corrida de estos filones es generalmente corta (menor que 3 m).

La brecha intrusiva hidrotermal propiamente tal, para diferenciarla de los casos extremos como los señalados anteriormente, es más común y muy variada en cuanto a dimensiones, componentes y abundancia. Al igual que los filones de guijarros, no ocupa una po-

sición preferencial. En Los Loros prácticamente no existe; en Mocha y Los Pelambres se presenta en pequeños cuerpos aislados; en Copaquire aflora un gran cuerpo cuya extensión visible es de 1.700 m, con variaciones internas desde leve dislocación de fragmentos angulosos hasta formación de bolones de 30 cm de diámetro. Generalmente el cemento es polvo de roca acompañado por minerales de alteración con o sin pirita; no así en Domeyko donde se encontró una brecha a 180 m de profundidad cuyo cemento es yeso, en gran parte selenita. No siempre las brechas intrusivas hidrotermales son estériles; así por ejemplo, en Queen Elizabeth gran parte de la mena (junto con polvo de roca y especularita) está contenida en el cemento de una brecha aproximadamente vertical con 400 x 200 m de sección horizontal; también en El Abra se encuentra algo de cobre en las brechas dentro de la zona con alteración potásica, que en este caso están espacialmente asociadas al pórfido causante de la mayor etapa de alteración hidrotermal.

Las *brechas de reemplazo* corresponden a aquellas en que los fragmentos son angulosos, están constituidos por la litología circundante, y se encuentran separados por la matriz y dispuestos en estructura de mosaico similar a un "rompecabezas", evidenciando muy poco movimiento. Se forman por el reemplazo a través de fracturas de la roca previamente fracturada. Ocurren en varias localidades y tienden a ser marginales en la zonación hidrotermal. En Los Pelambres constituyen pequeños cuerpos irregulares, cementados por turmalina, cuarzo y pirita, y en Mocha corresponden a estructuras vetiformes donde los fragmentos silicificados están contenidos en una matriz de turmalina.

Las *brechas hidrotermales de colapso* generalmente no están asociadas a desarrollos hidrotermales tipo cobre porfídico y corresponden a aquellas en que el movimiento de los fragmentos ha sido descendente con relación a las cajas. Los clastos, generalmente angulares, corresponden a la misma litología de las rocas circundantes; normalmente están sericitizados y contenidos en una matriz compuesta principalmente por cuarzo y/o turmalina, que permite el desarrollo de cavidades abiertas y geodas. Estas brechas de colapso constituyen cuerpos verticales, o casi verticales, de sección elíptica o groseramente circular, con diámetros variables entre 3 m y excepcionalmente 1.200 m (Disputada: Alfaro, 1970), limitados marginalmente por un fracturamiento laminado compuesto por fracturas cortas, rectas o ligeramente curvas, densamente espaciadas. Estos cuerpos se encuentran normalmente en grupos (p. ej. San Pedro de Cachiuyo:

24 cuerpos brechosos; Los Azules: 40; Llamuco: 6; Cabeza de Vaca - Zapallar: 100) emplazados en plutones félsicos o próximos a las márgenes de éstos. La alteración hidrotermal no presenta zonación y se restringe a los cuerpos brechosos no afectando más allá del margen laminado. Sin embargo, existen áreas de transición entre estas brechas y los desarrollos tipo cobre porfídico. Así, en La Planada existen pequeños sectores sericiticos rodeados por propilitización entre las brechas hidrotermales de colapso; en El Abra hay cuatro cuerpos brechosos que son marginales a la alteración potásica; en Centinela una extensa zona silicificada, que incluye pequeños sectores argílicos y sericiticos y que está rodeada externamente por propilitización, contiene dos brechas. Sierra Gorda también puede incluirse dentro de este grupo de desarrollos mixtos.

Muchas brechas hidrotermales de colapso constituyen yacimientos, y han sido explotadas por diversos elementos. La mineralogía metálica normalmente se encuentra en el cemento y está representada principalmente por especularita, scheelita, pirita, calcopirita, bornita, oro, molibdenita y galena.

#### ALTERACION SUPERGENA

Los procesos supérgenos comúnmente dificultan el reconocimiento de las rocas y de la zonación hidrotermal; las primeras pueden también estar enmascaradas por alteración hidrotermal que cambia la composición original de ellas. Además de este efecto perturbador de la geología, la alteración supérgena, como es bien conocido, ha tornado económicamente explotables numerosos yacimientos al formar una zona de enriquecimiento secundario. Para que esta zona se genere y se preserve, se necesitan condiciones geomorfológicas y climáticas especiales. Dichas condiciones han existido en algunas partes del país, como son Chuquicamata, El Salvador, Potrerillos y Andacollo, mientras que en otras localidades, por efecto de una denudación más rápida, se han conservado sólo restos de una antigua zona de enriquecimiento (ej. Mocha, Cerro Colorado) o ha sido casi completamente erodada como en Queen Elizabeth. Por efecto de las glaciaciones pleistocénicas no se ha desarrollado zona de enriquecimiento en áreas como Los Pelambres, Río Blanco o El Teniente, sino sólo delgadas películas de calcosina pulverulenta sobre los sulfuros hipógenos, inmediatamente bajo una restringida zona de oxidación.

#### CONCLUSIONES

Las observaciones efectuadas durante este trabajo concuerdan con las de otros autores en otras partes del mundo, especialmente en la costa pacífica de Nor-

teamérica. El modelo genético de las mineralizaciones tipo cobre porfídico actualmente aceptado corresponde a una apófisis intrusiva hipabisal emplazada aproximadamente a una profundidad entre 2 y 3 km bajo la superficie (Lowell and Guilbert, 1970). Según dicho modelo, un magma félsico es saturado en agua a medida que asciende a la superficie, cristaliza en su parte externa que es subsecuentemente fracturada por el escape de los fluidos acumulados, los que producen la alteración hidrotermal-mineralización según la zonación ya descrita. Los fenómenos de intrusión y alteración-mineralización están íntimamente ligados en tiempo y espacio, ya que no presentan diferencias apreciables de edad (Livingston *et al.*, 1968; Moore and Lanphere, 1971). Las brechas hidrotermales, especialmente la variedad intrusiva, son fenómenos tardíos en la secuencia hidrotermal; la casi generalizada ausencia de mineralización cuprífera en las brechas intrusivas hidrotermales, la escasez de intrusivos posteriores a ellas y la ocurrencia de fragmentos de sulfuros (calcopirita, pirita) en algunos filones de guijarros, atestiguan la suposición anterior.

En Chile, el emplazamiento de los intrusivos hipabisales habría estado controlado por la zona de debilidad de la corteza representada por el fracturamiento de la dorsal miolimitar durante la evolución del Ciclo Andino (Frutos, 1972), entre el Cretácico Superior y el Plioceno; pero también puede suponerse que tanto el fracturamiento como el emplazamiento de las apófisis calcoalcalinas son consecuencia de la subducción de la placa oceánica del Pacífico Oriental bajo la corteza continental.

Respecto al origen de los metales de las mineralizaciones tipo cobre porfídicos actualmente existe gran controversia. Se ha postulado que sería corteza continental, principalmente rocas sedimentarias de ambiente reductor con concentraciones metalíferas, que aportaría dichos metales a los magmas al ser fundida en la zona de Benioff. Sin embargo, esta hipótesis no explica aquellos yacimientos como los de las islas Salomón bajo los cuales la corteza continental casi no existe (Coleman, 1966). También se ha postulado que el origen estaría en una distribución inhomogénea de metales en el manto superior (Sillitoe, 1972), pero no se explica la razón de dicha distribución anómala.

Respecto a la génesis de las brechas hidrotermales de colapso, o "breccia pipes", se ha publicado un extenso artículo (Sillitoe and Sawkins, 1971), donde se postula que por corrosión química causada por fluidos hidrotermales concentrados en un plutón félsico (emplazado a mayor profundidad que aquella de for-

mación de las mineralizaciones tipo cobre porfídico) se producen espacios abiertos o por lo menos la roca se torna altamente porosa no pudiendo soportar el peso de la columna lítica, la que se hunde al fracturarse; simultáneamente los líquidos hidrotermales ascenderían alterando la roca y depositando minerales en las cavidades. El autor del presente trabajo considera que este mecanismo no es satisfactorio para explicar la génesis de aquellos cuerpos brechosos inclinados.

De las características expuestas se desprenden algunas guías de prospección. Resulta obvio intensificar la búsqueda de yacimientos tipo cobre porfídico en la franja correspondiente a la dorsal miolimitar; en ella se deben seleccionar aquellas áreas cuyo desarrollo hidrotermal contenga facies de estabilidad de feldspatos y/o alteración sericitica, preferentemente con intrusivos aflorantes (Neumann y Sillitoe, 1972), ya que estos tipos de alteración contienen generalmente la mena.

#### REFERENCIAS

- Alfaro C., M., 1970, Estudio geológico de la Mina Los Bronces, Provincia de Santiago: Tesis de Grado, Univ. Chile, inédito, 87 p.
- Bryner, L., 1961, Breccia and Pebble columns associated with epigenetic Ore Deposits: *Econ. Geology*, v. 56, p. 488 - 508.
- , 1968, Proposed terminology for hydrothermal breccias and conglomerates: *Econ. Geology*, v. 63, p. 692 - 693.
- Coleman, P.J., 1966, The Solomon Island as an island arc: *Nature*, v. 211, p. 1249 - 1251.
- Creasey, S.C., 1959, Some phase relations in the hydrothermally altered rocks of porphyry copper deposits: *Econ. Geology*, v. 54, p. 351 - 373.
- , 1966, Hydrothermal alteration, en *Geology of the porphyry copper deposits, Southwestern North America*, ed. S.R. Titley and C.L. Hicks: Tucson, Univ. Arizona Press, p. 51 - 64.
- Frutos J., J., 1972, Sobre el posible control tectónico de los yacimientos de cobre porfídico en la cuenca andina chilena: *Inst. Invest. Geol., Inf. Inéd.*, 19 p.
- Livingston, D.E., Mauger, R.L. and Damon, P.E., 1968, Geochronology of the emplacement, enrichment and preservation of Arizona porphyry copper deposits: *Econ. Geology*, v. 63, p. 30 - 36.
- Lowell, J.D. and Guilbert, J.M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits: *Econ. Geology*, v. 65,

- p.373 - 408.
- Meyer, C. and Hemley, J.J.**, 1967, Wall rock alteration, en *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, ed. H.L.Barnes: New York, Holt, Rinehart and Winston, p. 166 - 235.
- Moore, W.J. and Lanphere, M.A.**, 1971, The age of porphyry-type copper mineralisation in the Bingham Mining District, Utha - A refined estimate: *Econ. Geology*, v. 66, p. 331-334.
- Neumann J., H.**, 1971, Estudios geológicos y mineralógicos de áreas tipo cobre porfídico en Cerro Colorado y Cerro Quipisca, Provincia de Tarapacá: Tesis de Grado, Univ. Chile, inédito, 168 p.
- Neumann J., H. y Sillitoe, R.H.**, 1972, Algunas consideraciones sobre alteración hidrotermal asociada con mineralizaciones tipo cobre porfídico en Chile, en *Coloquio sobre fenómenos de alteración y metamorfismo en rocas volcánicas e intrusivas*: Dept. Geología Univ. Chile, en prensa.
- Sillitoe, R.H.**, 1972, A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits: *Econ. Geology*, v. 67, p. 184 - 197.
- Sillitoe, R.H. and Sawkins, F.J.**, 1971, Geologic, mineralogic and fluid inclusions studies relating to the origin of copper-bearing tourmaline breccia pipes, Chile: *Econ. Geology*, v. 66, p. 1028 - 1041.