



PORFIDOS CUPRIFEROS

Depósitos de Cu (Mo) de gran tonelaje y baja ley

50 a 500 Mt de mineral con ~1% Cu y 0.02% Mo
en Chile algunos >1000 Mt y con >1% Cu

Más del 50% de la producción de Cu mundial proviene de este tipo de depósitos. La mayor parte de la producción chilena de cobre proviene de 16 pórfidos cupríferos en explotación, 12 en el Norte de Chile y 4 en la Zona Central. Chile posee algunos de los pórfidos cupríferos más grandes del mundo como El Teniente y Chuquibambilla.

Los pórfidos cupríferos son esencialmente depósitos minerales de baja ley y gran tonelaje. Se denominan pórfidos porque frecuentemente, pero no exclusivamente, se asocian con rocas ígneas intrusivas con fenocristales de feldespato en una masa fundamental cristalina de grano fino.

La textura porfírica indica que los magmas intruyeron y cristalizaron cerca de la superficie y debido a su naturaleza relativamente poco profunda se denominan intrusivos epizonales, pero ellos pueden ser equigranulares con grano moderadamente grueso.

Los depósitos de pórfido se pueden subdividir en distintos tipos considerando su contenido metálico. Estos tipos incluyen Cu-Mo, Cu-Au, Cu, Au y Mo. En general los pórfidos ricos en Cu o Au se asocian a intrusivos derivados por cristalización fraccionada de magmas máficos originados en fusión parcial del manto en márgenes convergentes de placas (márgenes continentales activos y arcos de islas). Los pórfidos de molibdeno se asocian a intrusiones félsicas derivadas de magmas con una importante componente de corteza continental re-fundida.

Los depósitos de tipo pórfido están relacionados genética y espacialmente con intrusiones ígneas félsicas. Por lo general existen varios cuerpos de rocas intrusivas, emplazadas en varios pulsos y los pórfidos cupríferos se asocian frecuentemente con enjambres de diques y brechas. Las rocas de caja intruidas por los pórfidos pueden ser de cualquier tipo.

Tanto los intrusivos, como las rocas de caja típicamente muestran un fracturamiento fuerte y pervasivo. La única condición para la mineralización es que la roca huésped sea rígida o frágil desde el punto de vista estructural.

La mineralización y alteración pueden presentarse tanto en intrusivos, como en las rocas de caja. El núcleo del sistema mineralizado presenta la alteración hidrotermal más intensa, la que se denomina potásica debido a que se agrega potasio a las rocas afectadas por esta alteración. En la zona potásica se desarrollan biotita, feldespato potásico y cuarzo a expensas de minerales previamente existentes en las rocas. El predominio de biotita o feldespato potásico depende esencialmente de la disponibilidad de Fe o Mn en las rocas



alteradas o en el fluido hidrotermal, de modo que rocas más máficas con alteración de este tipo presentan usualmente dominio de biotita, mientras rocas más félsicas dominio de feldespato potásico. La zona potásica grada hacia fuera a una zona fílica que contiene cuarzo y muscovita, usualmente en una variedad de grano fino denominada sericita que es en realidad una fase intermedia entre illita y muscovita. La zona fílica pasa hacia fuera a una zona argílica donde se desarrollan minerales de arcilla y cuarzo. La alteración hidrotermal más externa corresponde a la zona propilítica que contiene clorita, epidota y carbonato, la cual grada hacia fuera a rocas inalteradas o frescas. Todas estas zonas de alteración no necesariamente se presenta en todos los depósitos de tipo pórfido: cualquiera de ellas puede estar ausente, por Ej. la zona argílica, típicamente la más pequeña, frecuentemente puede estar totalmente ausente.

Generalmente la mineralización presenta un núcleo de baja ley que contiene pirita diseminada que grada hacia fuera en una zona de mena. En la zona de mena se presentan vetillas y diseminación de pirita con calcopirita subordinada (mena de cobre) y molibdenita (mena de molibdeno). Es frecuente el desarrollo de una zona de pirita externa la que pasa hacia fuera a roca no mineralizada. La zona de mena en los pórfidos cupríferos usualmente se presenta dentro del núcleo de alteración potásica y puede extenderse dentro de la zona fílica, frecuentemente en el sector más interno se presenta una mayor proporción de sulfuros ricos en cobre como bornita, gradando hacia fuera a una mayor proporción de calcopirita, para finalmente en el sector más externo solo sulfuros de Fe (pirita). Normalmente no existe un límite físico del cuerpo mineralizado que puede ocurrir tanto en intrusiones, como en rocas de caja, consecuentemente el límite de un yacimiento de este tipo es fijado en términos económicos con una ley de corte.

La formación de este tipo de depósitos involucra un proceso magmático, que incluye un mecanismo denominado “segunda ebullición” o “ebullición retrógrada”, por el cual el agua (y otros volátiles) saturan un magma residual debido a la cristalización. Con el progreso de la cristalización de un magma, el volumen de agua disuelta en la masa silicatada fundida aumenta proporcionalmente, dado que el agua no se incorpora en los silicatos en cristalización. Por ejemplo, suponiendo que un magma tiene un 2% de agua disuelta en volumen, para cuando haya cristalizado un 50% de este magma en minerales silicatados, el magma remanente tendrá un contenido de agua disuelta de 4% en volumen.

Debido a que el agua hierve a 100°C y el magma tiene temperaturas que superan 600-700°C, el fluido liberado está inicialmente en estado supercrítico, pero al intersectar el solvus en un diagrama de fases se separan una fase líquida salina y una fase vapor diluida. Cuando se libera el fluido del magma (principalmente agua), elementos como el azufre, cobre, molibdeno y oro pueden concentrarse en solución. Cuando la parte acuosa del magma es expulsada el exceso de presión de fluido produce brechización y fracturamiento de las rocas intrusivas y rocas de caja, lo que provee vías permeables para que las soluciones hidrotermales de derivación magmática fluyan a través de las rocas y depositen su carga metálica.

Por otra parte, el subsecuente enfriamiento del magma intrusivo produce la circulación de aguas subterráneas en las rocas de caja circundantes en torno al centro de calor, generando



celdas convectivas similares a las que existen en los fondos oceánicos, cuyos conductos de emisión forman los depósitos de sulfuros masivos. Sin embargo, el rol principal que se asigna a estas celdas convectivas en los pórfidos cupríferos es el de producir un rápido enfriamiento del sistema a niveles someros, proveyendo una trampa fría para desestabilizar complejos iónicos clorurados que transportan metales y consecuentemente precipitar sulfuros metálicos concentrando mineralización.

Los pórfidos cupríferos se presentan en marcos geológicos similares a los depósitos epitermales de oro y ellos comparten muchas de las características y procesos de formación. Algunos depósitos epitermales son parte integral de sistemas mayores de tipo pórfido.

Los depósitos de tipo pórfido se encuentran en áreas orogénicas tales como Los Andes de Chile y Perú, la Cordillera de Canadá (British Columbia) y las regiones del Pacífico suroeste, tales como Filipinas, Indonesia y Papua Nueva Guinea.

Los pórfidos cupríferos son la fuente principal de cobre, contribuyendo más de la mitad de todo el cobre de mina en el mundo, y también son una fuente importante de oro. Estos depósitos son la fuente más importante de molibdeno y renio, este último un elemento del grupo del platino asociado a la estructura cristalina de la molibdenita. Además, se recupera plata y otros metales, incluyendo tungsteno, estaño, plomo y zinc en algunas operaciones de pórfidos.

Estos depósitos contienen de cientos de millones a billones de toneladas de mineral con leyes desde 0,2% a más de 1% Cu, 0,005% a 0,030% Mo y 0,4 a 2 gr/ton Au.

Como ejemplo, el pórfido cuprífero de Bingham, Utah (USA) contiene 2 billones de toneladas de mineral con 0,6% Cu. Este yacimiento ha producido más de 16 millones de toneladas de cobre desde que comenzó a explotarse en 1904. Otras regiones con pórfidos cupríferos incluyen: Butte, Montana (USA) con más de 2 billones de toneladas con ley de 0,85% Cu, Chuquibambilla, Chile, con más de 10 billones de toneladas de mineral con ley de 0,56% Cu y Ok Tedi en Papua, Nueva Guinea, con más de 375 millones de toneladas con 0,7% Cu y 0,66 g/t Au.

Debido a sus bajas leyes la minería de pórfidos debe ser de bajo costo y ello se logra mediante una minería masiva no selectiva. Además, para que el costo sea menor muchos de estos depósitos se explotan a rajo abierto, lo cual es menos costoso que operaciones mineras subterráneas. El tamaño de estos depósitos hace que estas operaciones sean gigantescas. Por ejemplo, la excavación más grande del mundo es el rajo de la mina Bingham, Utah (USA) con 800 m de profundidad y 4 Km. de diámetro.

La exploración para este tipo de depósitos se concentra en regiones donde existen rocas intrusivas félsicas a intermedias, particularmente aquellas donde existe una historia con múltiples intrusiones y brechización o fracturamiento de las rocas en contacto con las rocas de caja. Exploraciones de más detalle se concentran en definir halos de alteración que gradan lateralmente desde el núcleo del sistema mineralizado.



Una zonación vertical de la mineralización cuprífera también se puede desarrollar en zonas áridas cálidas, donde las aguas superficiales tienden a redistribuir el cobre de un sistema de pórfido expuesto, concentrándolas en otro lado. Estos enriquecimientos se denominan supérgenos y contienen minerales de alta ley de cobre tales como los del grupo de la calcosina. Las aguas oxidantes superficiales disuelven el cobre del mineral hipógeno o primario original y lo transportan en forma de sulfatos descendiendo hasta el nivel de aguas subterráneas donde encuentran una zona reductora y precipita como sulfuro supérgeno. La presencia de un nivel de enriquecimiento supérgeno indica la existencia previa de un gran sistema porfírico hipógeno original que fue exhumado hasta zonas superficiales oxidantes.

Las técnicas de exploración útiles incluyen estudios geoquímicos regionales tanto por los metales, como alteración, como el potasio. Levantamientos geofísicos incluyendo métodos electromagnéticos, magnéticos y de espectrometría de rayos gamma pueden ser útiles para localizar este tipo de mineralización.

Los sistemas de pórfidos de Los Andes son detectables en imágenes de satélite que muestran anomalías de color relacionadas a sus halos de alteración hidrotermal. Los levantamientos geofísicos de superficie incluyen la polarización inducida (IP) para detectar sulfuros diseminados y magnetometría, ya sea para detectar la presencia de magnetita hidrotermal o destrucción de minerales magnéticos por alteración filica.

Síntesis

- Depósitos epigenéticos: mineralización hipógena (primaria) introducida en las rocas.
- Relacionados espacial y temporalmente con cuerpos intrusivos. Stocks subvolcánicos (intrusiones epizonales; 1-5 km de profundidad) de composición félsica, usualmente porfíricos con fenocristales de plagioclasa, biotita y hornblenda. Usualmente multifase (varias fases intrusivas). Probablemente apófisis en cúpulas de batolitos.
- Alteración hidrotermal pervasiva aproximadamente centri-simétrica; zonas de alteración concéntricas en y en torno al complejo intrusivo. La intrusión(es) crea(n) el sistema hidrotermal.
- Sulfuros de cobre y molibdeno como minerales de mena primarios dentro de los halos de alteración hidrotermal.
- Amplios sistemas de fracturas que tienden a estar centrados en la porción ápical de uno o más cuerpos intrusivos y sus rocas de caja adyacentes.

Marco tectónico

Márgenes convergentes de placas y arcos magmáticos ligados a subducción.

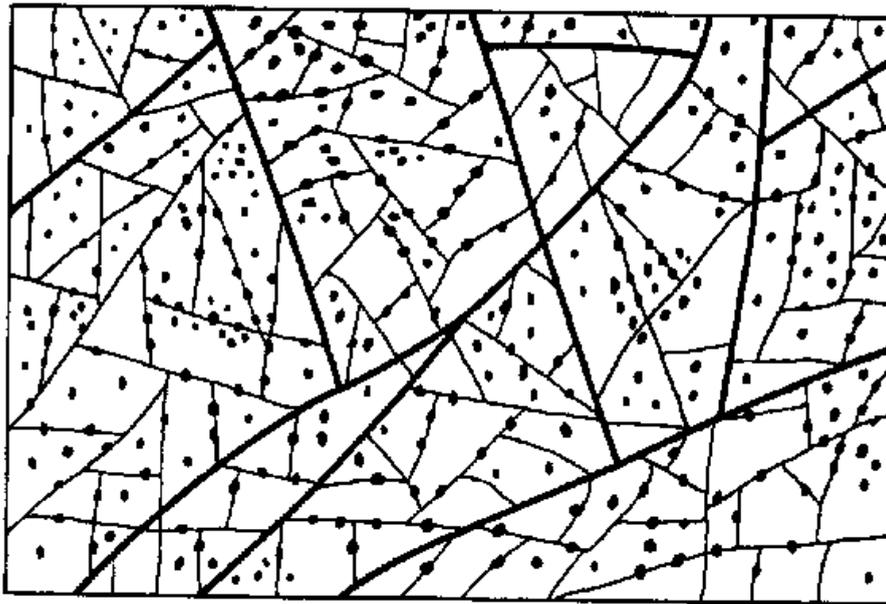
- Pórfidos Cu-Mo = Márgenes continentales activos
- Pórfidos Cu-Au = Arcos de islas
- Pórfidos de Mo = Parte interna (lado del continente) de arcos magmáticos).
- Pórfidos de Sn-W = Tras-arco



Estilos

Pórfidos dominados por venillas \Leftrightarrow Pórfidos dominados por brechas

Esquema mostrando como se distribuye la mineralización de sulfuros en pórfidos



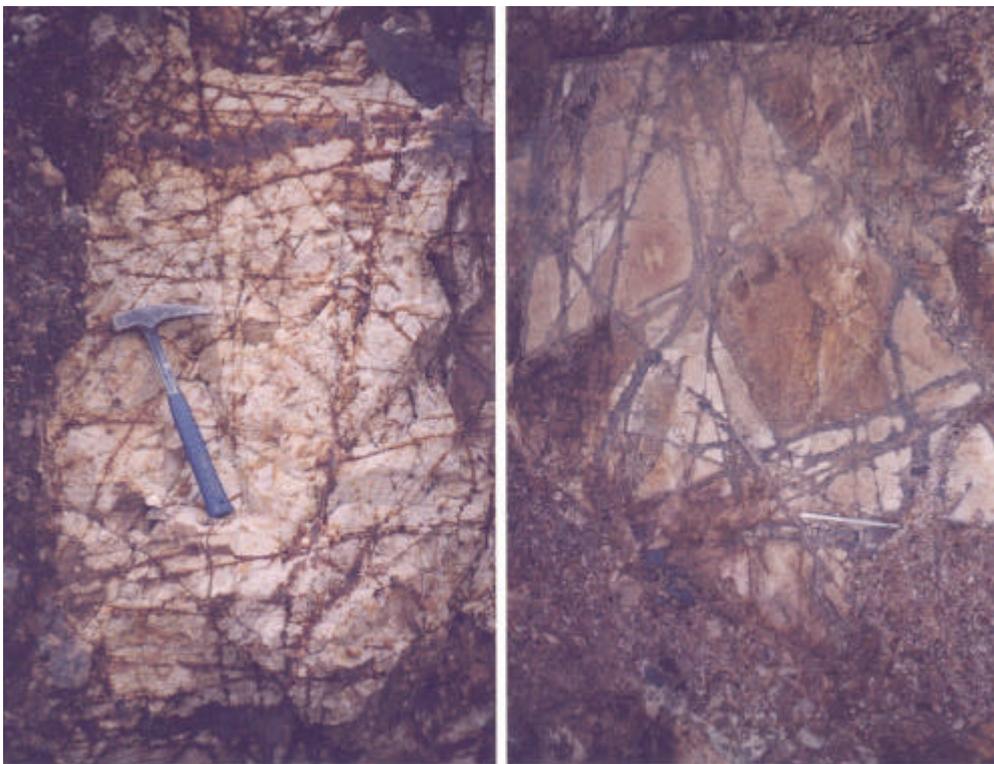
Disseminated Mineralization Along Fractures in a Porphyry Copper Stockwork Deposit.

cupríferos en un "stockwork" o enrejado de venillas.

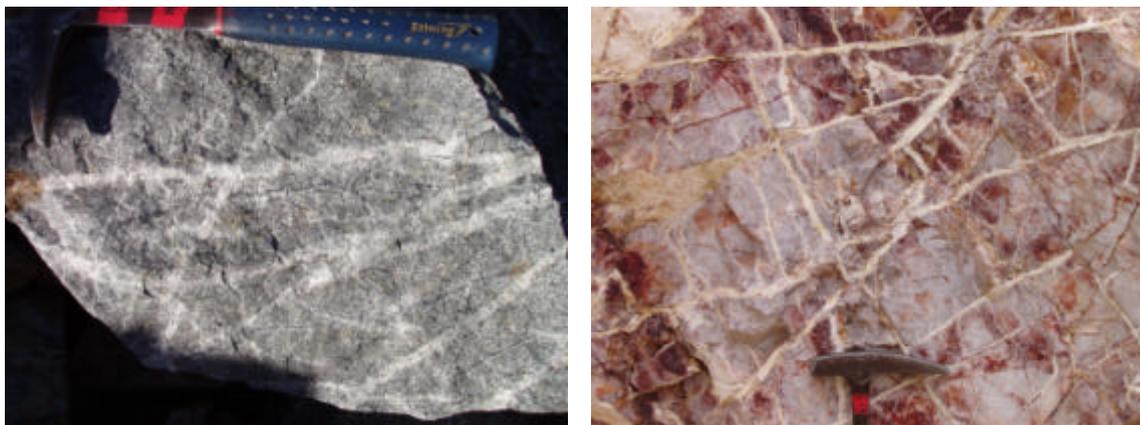
Mineralización hipógena diseminada, stockwork/venillas, brechas.

Petrografía de las intrusiones huéspedes

- Pórfidos Cu-Mo: Intrusivos porfíricos del Tipo I o Serie Magnetita
- Composición variable desde diorita, monzonita, granodiorita, granito.
- Pueden ser varias fases intrusivas; la mineralización generalmente está ligada a una fase intrusiva tardía.
- Magmas de origen sub-cortical.



Fotografías mostrando un típico stockwork de venillas en un pórfido cuprífero (aquí oxidadas por efectos supergenos); depósito La Granja en el norte de Perú.



Fotografías mostrando ejemplos de stockwork de zona hipógena con alteración potásica (biotita) a la izquierda y con oxidación supérgena a la derecha (Minas Tricolor y Dos Amigos, Domeyko, Chile).



Fotografía mostrando brecha hidrotermal con matriz de turmalina y sulfuros; fragmentos angulosos con alteración cuarzo-sericítica. Brecha Marginal del yacimiento El Teniente.



Fotografías mostrando ejemplos de brechas con matriz de turmalina. Mina Dos Amigos, Domeyko, Chile

Edad

En Chile existen varias franjas de pórfidos Cu-Mo de distintas edades:

- Cretácico Inferior: En explotación: Andacollo, Dos Amigos
- Paleoceno - Eoceno Inferior: Cerro Colorado, Lomas Bayas - Fortuna del Cobre en explotación; Spence en desarrollo.



- Eoceno Superior - Oligoceno Inferior: Quebrada Blanca, Rosario de Collahuasi, Ujina, El Abra, Radomiro Tomic, Chuquicamata, La Escondida, Cerro Zaldívar, El Salvador.
- Mioceno Superior - Plioceno: Los Pelambres, Río Blanco, Los Bronces, El Teniente.

Las dos franjas más jóvenes de pórfidos cupríferos chilenos son las más importantes desde el punto de vista económico tanto por el número, como por el volumen y ley de los yacimientos.

En Chile existen también pórfidos de Cu-Au en la zona de Maricunga (Alta Cordillera de Copiapó), los que son de edad Miocena (Ej. Cerro Casale). Algunos de ellos como Lobo y Marte son ricos en Au (1.43 y 1.6 g/t Au) y pobres en Cu (0.05 y 0.12% Cu) y Mo (46 y ~10 ppm) y han sido denominados pórfidos auríferos (Vila y Sillitoe, 1991).

El modelo clásico de Lowell y Gilbert (1970) Economic Geology V.65, p. 373-407; basado en el estudio de los depósitos de San Manuel – Kalamazoo y compilación de características de otros pórfidos cupríferos norteamericanos ha sido utilizado con éxito en la exploración de este tipo de depósitos; un modelo más actualizado se presenta por Giggenbach (1997) ver Figs. 1, 2 y 3.

- **Zonación de tipos de alteración hidrotermal** relacionados a intrusiones ígneas:

Zona potásica, en el núcleo del sistema: biotita, ortoclasa y cuarzo.

Zona Fílica (Sericítica), envuelve al núcleo potásico: cuarzo, sericita y pirita (hasta 20% del volumen).

Zona argílica, externa a la sericítica: minerales de arcilla, montmorillonita, clorita, pirita.

Zona propílica, halo de alteración más externo, normalmente fuera del cuerpo de mena económica: clorita, epidota, albita, calcita.

A niveles profundos reconocen un núcleo de cuarzo, sericita, clorita, feldespato potásico y una zona externa de clorita, sericita, epidota, magnetita.

- **Zonación de mineralización hipógena** (primaria; Fig. 1):

Núcleo de baja ley: bajo contenido de calcopirita, pirita, molibdenita; magnetita en porción profunda.

Zona de mena, formando un cilindro en la parte externa de la zona de alteración potásica e interna de la zona de alteración sericítica: calcopirita (1-3%), pirita (1%), molibdenita (0,03%).

Zona de Pirita, corresponde ~ zona fílica: pirita (10%), calcopirita (0.1-3%), trazas de molibdenita.

Zona de baja pirita, ~ coincidente con zona propílica: 2% pirita.

Zona Periférica: calcopirita, galena, esfalerita, Au, Ag.



Fig. 1. Esquema general de un pórfido cuprífero indicando la zona de mena en torno a un núcleo de baja ley, el halo de pirita diseminada y la aureola de alteración hidrotermal hipógena.

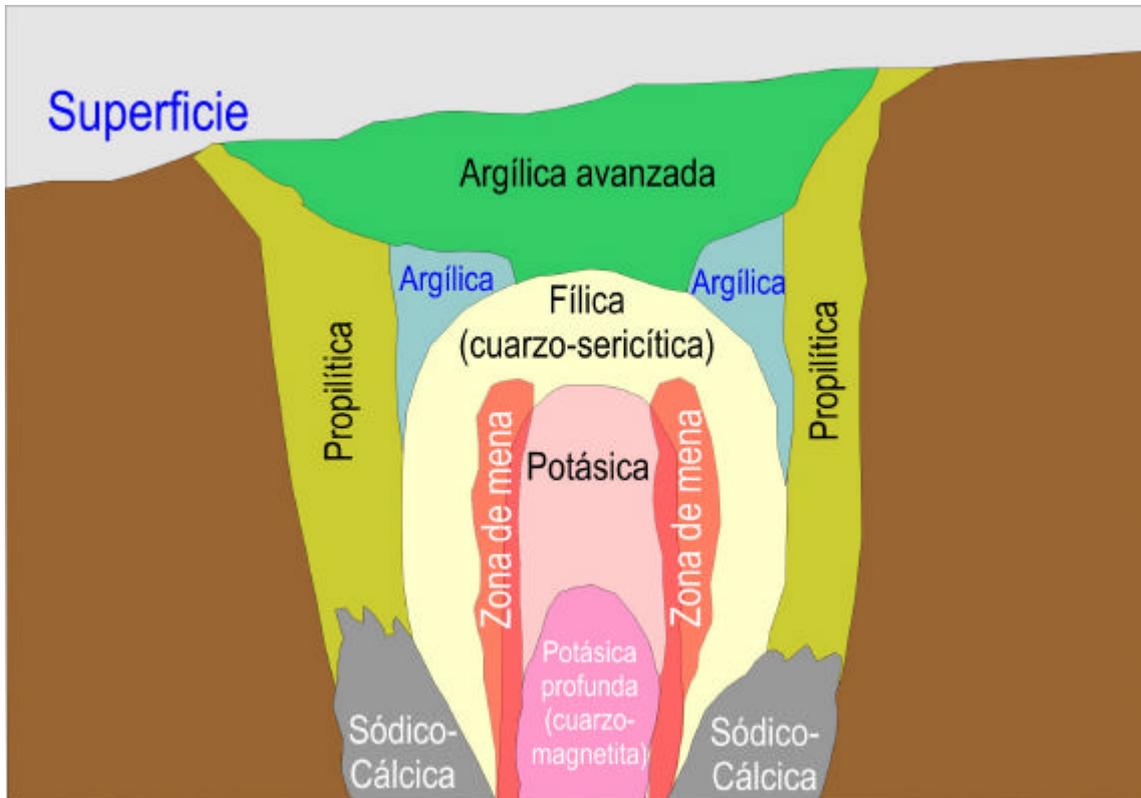


Fig 2. Distribución de zonas de alteración hidrotermal en un pórfido cuprífero combinando los modelos de Lowell y Gilbert (1970), Gustafson y Hunt (1975) y Giggenbach (1997). Núcleo de alteración potásica rodeado de alteración fílica (cuarzo-sericítica), alteración argílica intermedia local en torno a zona fílica, halo externo de alteración propilítica, alteración sódico-cálcica profunda (Carten, 1986; Dilles & Einaudi, 1992) y cubierta de alteración argílica avanzada.

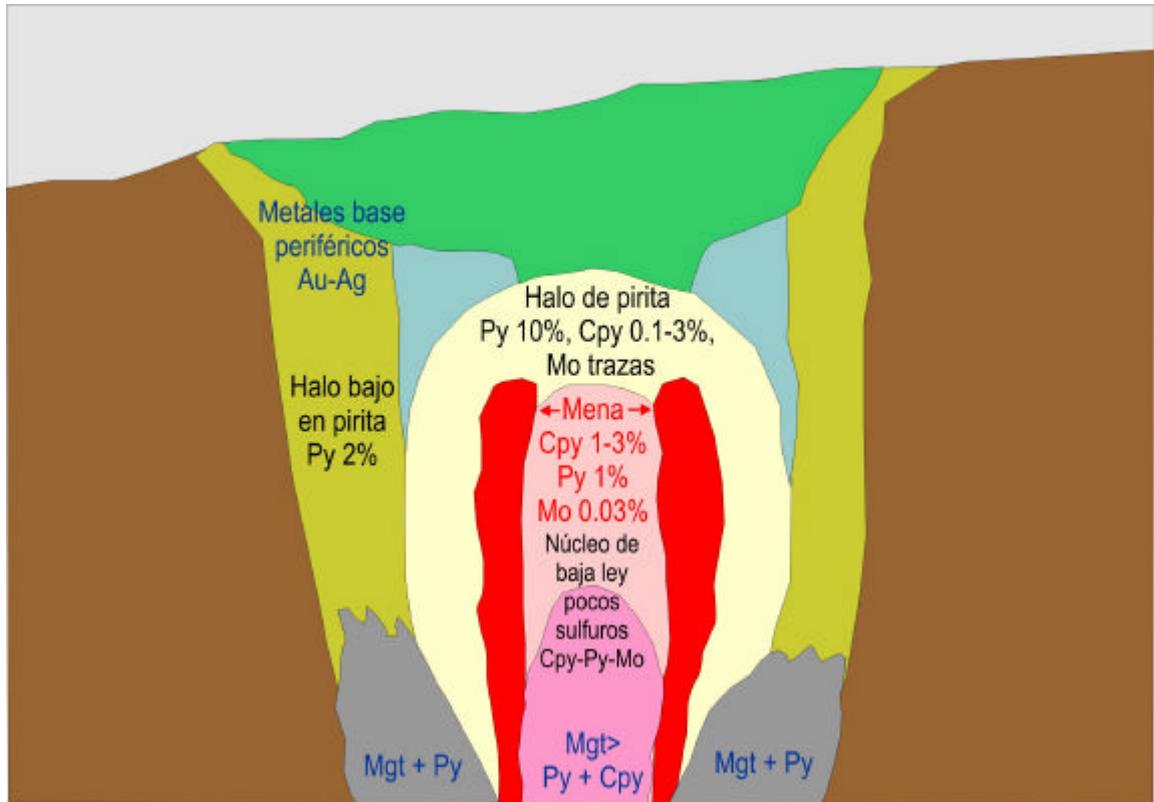


Fig. 3. Distribución de minerales de mena en un pórfido cuprífero típico. Py = pirita, Cpy = calcopirita, Mo = molibdenita, Mgt = magnetita.



Fig 4. Zonación por efectos supérgenos en un pórfido cuprífero: Gossan o sombrero de hierro en la parte superior (óxidos e hidróxidos de hierro), seguido en profundidad por una zona lixiviada (escaso contenido metálico), luego de una zona oxidada (minerales oxidados de cobre; crisocola, atacamita, malaquita), luego una zona de enriquecimiento supergeno (sulfuros secundarios; calcosina, covelina) y la zona primaria o hipógena en profundidad (sulfuros primarios; bornita, calcopirita, pirita).