

13 Tipo de Depósito

13.1 Pórfidos de Cobre Ricos en Oro

Según las conclusiones de Perelló y Cabello (1989), en la revisión de las características geológicas más relevantes de una población de 47 depósitos tipo pórfido cuprífero con leyes cabeza promedio $\geq 0,3$ gpt Au, se extracta lo siguiente:

- Su edad queda comprendida entre el Arqueano (2.700 Ma) y el Plio-Pleistoceno (1,1-1,2 Ma) predominando los depósitos terciarios. Si bien este hecho se puede atribuir a un menor nivel de erosión, la identificación de sistemas porfídicos en terrenos precámbricos resulta más especulativa y problemática debido a que la deformación y metamorfismo obliteran las características primitivas de los depósitos.
- Las rocas de caja varían desde complejos volcánicos comagmáticos con los intrusivos, hasta rocas sedimentarias y metamórficas. Los intrusivos pertenecen tanto a las series calcoalcalina como alcalina y shoshonítica. La composición de los intrusivos en los depósitos de afinidad calcoalcalina, varía desde términos ácidos (riolíticos) hasta básicos (dioríticos). Los depósitos alcalinos se asocian, principalmente, con sienitas y los shoshoníticos, con andesitas y dacitas.
- Existe una correlación positiva entre la ley de oro y la profundidad de emplazamiento del sistema porfídico. Los sistemas subvolcánicos poseen, en general, leyes de oro superiores a los depósitos de emplazamiento más profundo. El oro se encuentra, principalmente, en su forma nativa, libre o como inclusiones en calcopirita y/o bornita. En algunos casos, se asocia a piritita, molibdenita y silicatos y, localmente, aparece en forma de telurios y electrum.
- Las leyes más elevadas de Au se alcanzan en zonas de alteración potásica con biotita, cuarzo, magnetita, anfíboles y en menor proporción, feldespato potásico. Valores altos de oro también se asocian a zonas de alteración argílica avanzada y cuarzo-sericítica±clorita, comúnmente sobreimpuestas a zonas tempranas de alteración potásica. La mayoría de los depósitos posee abundante magnetita y localmente, intensa silicificación. La magnetita puede estar contenida en la zona de alteración potásica o

formar, junto a cuarzo y anfíboles, el núcleo del sistema; o bien, distribuirse irregularmente en el depósito.

- Las leyes de Au muestran una correlación positiva con las de Cu en la mayoría de los depósitos. Un número considerable de yacimientos muestra leyes elevadas de Mo; similares contenidos de Au y Mo se observan algunos de variada composición y situación geotectónica. Esto es contrario a lo propuesto por Kesler (1973) en el sentido que los depósitos tipo pórfido cuprífero se agrupan en dos miembros opuestos: Cu-Mo y Cu-Au, sin términos intermedios. Favorece, por el contrario, la perspectiva de que estos sistemas forman parte de un amplio espectro que incluye, entre otros, pórfidos de Cu, Cu-Mo, Cu-Mo-Au, Cu-Au, Mo y Au.
- Debido a esta variación gradual en el contenido de Au y Mo, Cox y Singer (1988) señalaron que la división entre pórfidos cupríferos ricos y pobres en oro no debe depender solamente del contenido de oro en el sistema sino, más bien, debe tomar en cuenta la ley de Mo en cada caso, basado en la relación $Au \text{ (gpt)}/Mo \text{ (\%)} \geq 30$.
- La íntima asociación de oro con el cobre en zonas de alteración potásica sugiere condiciones de mineralización de alta temperatura. La información disponible indica que los fluidos responsables de esta mineralización poseerían temperaturas por encima de los 500°C y salinidades superiores a 45% peso equivalente NaCl y serían, de esta manera, compatibles con un origen magmático. El transporte de oro, en estas condiciones, se realizaría mediante complejos clorurados. El hecho que pórfidos ricos en oro se encuentren en variados ambientes geotectónicos, muy diversos en cuanto a composición, petrología y rocas de caja, estaría, en opinión de los autores, en contra de un origen cortical del oro (y cobre). Este hecho favorecería, por el contrario, una fuente fundamentalmente subcortical, abarcando desde las zonas más profundas de la corteza hasta el manto superior. Conclusiones parecidas se han expresado en relación al origen del cobre y molibdeno en algunos pórfidos cupríferos andinos (Sillitoe y Gappe, 1984).

Según Sillitoe (1990), los depósitos de cobre pórfido ricos en oro poseen todas las características geológicas esenciales de sus homólogos pobres en oro. El oro puede estar

presente en zonas de existencias de vetillas y/o diseminado dentro o cercano a los intrusivos pórfidicos. Estas reservas pueden constituir los focos de sistemas hidrotermales más extensos, dentro de los cuales pueden producirse oro de vetas epitermales de alta y baja sulfuración, skarns y reemplazos en rocas carbonatadas y no carbonatadas. Los depósitos presentan características de baja ley pero contienen altos tonelajes, con una ley media de 0,4-1,0% de cobre, < 1 gpt de oro y tonelajes de 50-500 Mt (Titley y Beane, 1981 y Sillitoe, 2000).

Sillitoe (1979) sostiene que son pórfidos ricos en Au todos aquellos que poseen una ley media $\geq 0,4$ gpt Au (e.g.: Bajo de la Alumbrera, Argentina; Saindak, Pakistán y Ok Tedi y Panguna, Papúa y Nueva Guinea).

Para Cox y Singer (1988), la división entre pórfidos cupríferos ricos y pobres en oro deben tomar en cuenta la ley de Mo, basado en la relación $\text{Au (gpt)/Mo (\%)} \geq 30$.

El proyecto BED presenta una ley media de 0,33 gpt para el Au y de 0,12% para el Cu, tiene una relación $\text{Au/Mo} \geq 80$.

Según Gendall (1994), algunas características de estos depósitos semejantes a BED son:

- Los depósitos de pórfido de cobre-oro pueden estar relacionados con la profundidad, evidenciada en la zonación vertical asociada de los metales de mena.
- La meteorización y la erosión controlan la preservación.
- Las relaciones de $f\text{O}_2/f\text{S}_2$ dentro de un sistema pórfido y la presencia o ausencia de magnetita puede determinar el potencial de oro.
- Los depósitos de pórfido cobre-oro son generalmente de menor tamaño que sus homólogos de cobre-molibdeno.
- La meteorización, la erosión y la exposición de los tipos de alteración, dan una indicación de que el pórfido está siendo mineralizado.
- Los tipos de alteración pueden ayudar a distinguir entre sistemas favorables de pórfido de oro-cobre y depósitos de pórfido estéril.

- La composición mineral del pórfido intrusivo puede indicar el potencial de los posibles portadores de oro-cobre.
- Las estructuras regionales y los lineamientos estructurales pueden favorecer la concentración de estos depósitos.
- El grado de fractura y vetillas pueden indicar los sitios más favorables para la deposición de mineral.
- Una sola característica no puede ser usada como base para la exploración para estos sistemas de pórfido de cobre-oro. El empleo de criterios ponderados de varias características puede ser el único método posible de poner en práctica un programa de exploración acertado.

Las rocas hospedantes no controlan el contenido de oro del depósito, pero su composición o característica estructural puede controlar la deposición de mineral más allá del *stock* de pórfido. La liberación de fluidos ricos en oro, mayormente en ácidos y altamente salinos del cuerpo magma, emplazado en rocas carbonatadas será más adecuado para un depósito de oro periférico que si las rocas de caja son una cuarcita no reactiva. Por lo tanto, las reacciones químicas entre las soluciones de mineral y las rocas hospedantes son importantes para localizar los fluidos ricos en minerales más allá del intrusivo porfídico.

Según Murakami *et al.* (2009), la correlación de la relación Cu/Au con la profundidad está influenciada principalmente por las variaciones del grado total de Au. A pesar de los controles mineralógicos locales dentro de algunos yacimientos, la relación general Cu/Au de los depósitos no muestra una correlación significativa con el tipo predominante de sulfuro de Cu-Fe, es decir, calcopirita o bornita. La fuente primaria de magma probablemente contribuye a la dotación de metal en la escala del distrito minero y en algunos depósitos individuales, pero no explica la amplia correlación de las proporciones de los metales con la presión de la formación de mineral.

La correlación observada de la relación Cu/Au con la presión del fluido, puede explicarse por el transporte dominante de Cu y Au en un vapor rico en S, que coexiste con menor salmuera en dos fases en sistemas magmático-hidrotermales. A una profundidad relativamente moderada (aproximadamente < 3 km), la solubilidad de ambos metales

disminuye rápidamente con la disminución de la densidad de la pluma de vapor ascendente, forzando la coprecipitación de Cu y Au. En contraste, el enfriamiento de vapor magmático a niveles más profundos (aproximadamente > 3 km) y una mayor presión de confinamiento es probable que precipite $\text{Cu}\pm\text{Mo}$ solamente, mientras que el oro en complejos bisulfurados permanece disuelto en el vapor relativamente denso.

Al enfriarse, este vapor puede finalmente contraerse a un líquido epitermal de baja salinidad, que puede contribuir a la formación de depósitos de oro epitermales a varios kilómetros por encima del depósito de pórfido $\text{Cu}\pm\text{Mo}$ pobre en Au. Los sistemas de baja presión de salmuera+vapor son favorables para la coprecipitación de ambos metales, lo que genera depósitos de pórfido $\text{Cu}\pm\text{Au}$ ricos en Au. Los depósitos epitermales de oro pueden estar asociados con tales sistemas superficiales, pero es probable que deriven sus componentes formadores de mineral de una fuente más profunda, que puede incluir en un depósito de pórfido $\text{Cu}\pm\text{Mo}$ oculto.

13.2 Modelo Geológico y Conceptos

Los depósitos de cobre pórfidico ricos en oro se encuentran típicamente en cinturones orogénicos y en los límites de las placas convergentes o en asociación con el emplazamiento de existencias de alto nivel durante el tectonismo extensional relacionado con la falla de deslizamiento y expansión de retroarco. Normalmente hay múltiples emplazamientos intrusivos en profundidades someras, evidenciados por la preservación de secuencias volcánicas contemporáneas.

Sus litologías varían de cuarzo-diorita calcoalcalina hasta granodiorita y cuarzo-monzonita. Generalmente los intrusivos son cuerpos cilíndricos o en forma de campana con pequeñas expresiones superficiales pero son muy grandes en profundidad. Comúnmente estos pórfidos son concéntricos, formando una zona anular de alto grado con un núcleo estéril (Sillitoe, 2000).

Los depósitos de pórfido ricos en oro se encuentran generalmente en el nivel superficial de la corteza, a 1-2 km de profundidad. La mayor parte de los depósitos varían desde > 100 m hasta < 1 km de diámetro y el tramo vertical de toda la suite de alteración está aproximadamente a 4 km de la paleo-superficie (Sillitoe, 2000).

13.3 Características Geológicas

En este punto, y aprovechando la información generada por las perforaciones DDH de las campañas de exploración en las principales áreas diseminadas del CVFN, se interpreta y se da a conocer una revisión de las variables geológicas que pudieran condicionar la presencia de oro en los sistemas de pórfidos. Entre éstas hay que considerar factores regionales (edad de los depósitos), factores específicos (rocas de caja, tipo de intrusivos, afinidades petrológicas y alteración hidrotermal) y la presencia del oro (nivel de erosión, oxidación y mineralogía), su posición al interior del sistema porfídico y su relación con los diferentes tipos de alteración hidrotermal (Tabla 13.1).

Depósito (Bajos)	Edad	Tipo de Intrusivo	Petrología	Roca de Caja	Alteración Hidrotermal	Asociación Alteración-Oro
1- Agua Tapada	6-8,5 Ma (K-Ar)	Pórfido dacítico	Shoshonítica (< calcoalcalina rica en K)	CVFN, intrusivo dacítico.	ADF sobreimpuesta, K, Ep-Cl. Silificación. Brechamiento.	Alt K, Mineraliz. dis y en vn Qz±FK+Mag, Qz±Ccp±Mag, Bx hidrotermal.
2- Las Pampitas	7-8 Ma (K-Ar)	Pórfidos diorítico y dacítico	Shoshonítica	CVFN)intrusivo Molzonítico Alto de La Blenda.	K, Ep-Cl, núcleo Qz-Mag, ADF sobreimpuesta. Silificación y brechamiento.	Alt K, Mineraliz. dis y en vn masivas de Ccp+Py+Mag+Hm/Mag y drusas de Qz. Vn tipo A y B, Qz+Py+± Ccp+bandeamiento de Mag, Ccp dis fina y en Vcp.
3- El Durazno	7-8 Ma (K-Ar)	Pórfido diorítico	Shoshonítica	CVFN, intrusivo diorítico.	K, Ep-Cl, núcleo Qz-Mag, ADF sobreimpuesta. Silificación y brechamiento.	Alt K, Mineraliz. dis y en vn Qz+Mag+Gp-Anh+Ccp, vn Mag+Py+Ccp, Ccp dis fina, V Ccp Qz+Ccp+Mag+Py. Sil y Bx Hidrotermales.
4- La Alumbraera	7 Ma (40Ar/39Ar)	Pórfido dacítico	Shoshonítica (< calcoalcalina rica en K)	CVFN, intrusivo dacítico.	K, Ep-Cl, núcleo Qz-Mag, ADF sobreimpuesta. Silificación y Calco-sódica en raíz sistema.	Alt K, Mineraliz. dis y en vn Qz+Mag, vn Gp-Anh+Ccp+Mol, vn Mag+Py+Ccp, Ccp dis fina, V Ccp Qz+Ccp+Mag+Py.
5- San Lucas	7 Ma (K-Ar)	Pórfido dacítico	Shoshonítica	Fm. Suncho (esquistos y pizarras), Fm. Capillitas (granito), intrusivo diorítico.	K, ADF sobreimpuesta. Calco-sódica en raíz sistema.	Alt K, Mineraliz. dis y en vn Qz+K ± Anh ± Py ± Mag, Qz+Gp/Anh±Cb±Ccp/Py/Mol.
Depósito (Bajos)	Nivel de Erosión	Nivel de Oxidación	Mineralización	Mineralogía Sulfuros de Cu	Otros	Mineralización de Oro
1- Agua Tapada	+400 a +450m con respecto a BLA, dependiendo del fallamiento del sector.	±30m	Pórfido de Au-Cu. Velas de SI (>>Qz-Cb+Au-Ccp-Sp-Gn). Vn Sulfuros <<Qz+Py+Ccp+Sp+Gn. Bx Hidrotermal.	Ccp	Py, Sp, Gn	En Ccp, libre y <Py.
2- Las Pampitas	+300 a +350m con respecto a BLA, dependiendo del fallamiento del sector.	±100m	Pórfido de Cu-Au. Venillas epitermales oxidadas (Au-Ccp-Bo/Ccp)	Ccp (<Bn/Ccp)	Py	En Ccp, libre y <Py.
3- El Durazno	+200 a +250m con respecto a BLA, dependiendo del fallamiento del sector.	±30m	Pórfido de Au-Cu. Brechas hidrotermales (Au-Cu)	Ccp (<Bn/Ccp)	Py, Mol, Spt	En Ccp, libre y <Py.
4- La Alumbraera	Cota promedio central 2.550m. Paleosuperficie +2.500m en el CVFN.	±30m	Pórfido de Cu-Au-Mo. Velas de SI (Qz-Cb+Au-Ccp-Sp-Gn)	Ccp (<Bn/Ccp, <Cc-Cv/Ccp-Py)	Py, Mol, Gn, Sp, Spt	En Ccp, libre y <Py.
5- San Lucas	-300 a -350m con respecto a BLA, dependiendo del fallamiento del sector.	±40m	Pórfido de Cu-Au-Mo.	Ccp (<Bn/Ccp, <Cc/Ccp)	Py, Mol	En Ccp, libre y <Py.

Tabla 13-1: Características geológicas de las principales áreas diseminadas del CVFN.
Abreviaturas usadas de la Tabla 8.1.