



Geología y geocronología del pórfido de Cu-Au Zafranal, sur del Perú

Fernando Rivera

Minera AQM Copper Perú SAC, Calle Amador Merino Reyna 339 Of. 401-A, San Isidro, Lima, Perú

RESUMEN

Zafranal es un depósito de tipo pórfido de cobre ubicado a 90 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. Fue descubierto por Teck Cominco Perú en el año 2003. Actualmente Minera AQM Copper SAC opera el Proyecto Zafranal, habiendo completado un programa agresivo de exploración donde ha podido determinar recursos de 472.1 Mt @ 0.36 % Cu y 0.08 g/t Au (medidos e indicados), y 0.6 Mt @ 0.21 % Cu y 0.15 g/t Au (inferido).

Zafranal está localizado en la franja cretácea de pórfidos de cobre del sur del Perú, formando parte del Distrito Zafranal, el cual está conformado además por los pórfidos Campanero, Sicera Norte, Sicera Sur, Rosario, Victoria, y Zafranalito. Estos sistemas de tipo pórfido se encuentran controlados por la intersección de dos grandes sistemas de fallas regionales, la extensión noroeste del sistema de fallas Incapuquio (SFI) y el sistema de fallas Iquipí-Clavelinas (SFIC). Al igual que en los demás pórfidos de la franja cretácica del sur del Perú, los principales eventos intrusivos en el área de Zafranal ocurrieron durante el Cretáceo superior. El complejo intrusivo Zafranal tiene una orientación E-O y comprende rocas de composición intermedia que son las responsables de la importante mineralización y alteración en superficie (5 x 1.2 km)

de este depósito.

La alteración en el depósito Zafranal se presenta con cuatro tipos: propilítica (clorita + epidota ± pirita), fílica (cuarzo + sericita + arcillas), potásica (biotita secundaria + clorita + cuarzo ± feldespatos potásicos), y argílica supérgena (arcillas ± sericita) hasta los 50 m de profundidad. La mineralización primaria está asociada a una zona de alteración potásica con una ley promedio de 0.35 % Cu. La mineralización supérgena en Zafranal está representada por calcosina y covelita reemplazando calcopirita y pirita en asociación con la alteración fílica promediando hasta 1 % Cu. La mineralización en óxidos de cobre puede llegar a tener hasta 60 m de espesor con una ley promedio de hasta 0.4 % Cu.

Cuatro dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ indican que en Zafranal la alteración y mineralización de tipo pórfido ocurrieron en el Cretáceo superior. Una de estas dataciones se hizo en roca total de la unidad volcánica andesítica, y tres sobre biotita secundaria de los intrusivos principales que controlan la mineralización de cobre, las cuales dieron edades de 82.4 ± 0.4 , 83.4 ± 0.5 , y 81.2 ± 0.4 Ma. Hasta la fecha, el depósito Zafranal representa el pórfido de edad cretácea más importante y de mayor potencial económico encontrado en el Perú.

1. Introducción

El pórfido Cu-Au de Zafranal está ubicado en la franja cretácea de pórfidos de cobre del sur del Perú (Rivera et al., 2008). Esta franja cretácea, de entre 20 y 40 km de ancho, se localiza en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 13° y 16° S. Se extiende por 770 km de largo por 20 a 40 km de ancho, reconociéndose en ella más de 26 prospectos de tipo pórfido de cobre, de los cuales Zafranal es el más

importante y de mayor potencial conocido hasta la fecha.

El pórfido Cu-Au de Zafranal forma parte del Distrito Zafranal, que está conformado por los pórfidos Campanero, Sicera Norte, Sicera Sur, Zafranal, Rosario y Zafranalito.

Estos sistemas de tipo pórfido se encuentran controlados por la intersección de dos grandes sistemas de fallas regionales, la extensión norte del sistema de fallas Incapuquio (SFI) y el sistema de fallas Iquipí-Clavelinas (SFIC). El SFI está conformado por un conjunto

de fallas transpresivas de dirección preferente NO-SE que parecen controlar el emplazamiento de los depósitos de tipo pórfido de cobre del sur del Perú, como Cerro Verde, Cuajone, Quellaveco, y Toquepala. Este sistema de fallas se extiende desde Arequipa hasta la frontera con Chile. El SFIC es un rasgo estructural notable que comprende un conjunto de fallas subparalelas de dirección E-O, de carácter de cizalla a lo largo del cual se emplazan prospectos de Cu-Au (pórfidos, epitermales, y vetas mesotermiales) desde el límite oriental de la franja de depósitos de Cu-Fe-Au (IOCG) del Jurásico medio a superior (sureste de la mina Acari) hasta el oeste de la extensión sur del sistema de fallas Cusco-Lagunillas-Mañazo (oeste del prospecto Pinaya) (Mamani et al., 2009).

Regionalmente afloran rocas volcánico-sedimentarias de edad Jurásico inferior (posiblemente de la Formación Chocolate) y sedimentos clásticos-calcáreos del Grupo Yura, del Jurásico superior-Cretáceo inferior, además de secuencias volcánico-sedimentarias del Cretáceo superior. Estos estratos están intruidos por intrusivos deformados, caracterizados por presentar textura gneisosa e intensa foliación y composición máfica (gabros y gabrodioritas). La foliación tiene una orientación preferente N130-140° (SFI) y N070-090° (SFIC), asociada al sistema estructural dentro del distrito. Las primeras intrusiones del Batolito de la Costa, del Cretáceo superior, fueron dioritas y granodioritas, seguidas de los diferentes complejos de intrusivos asociados a la alteración-mineralización en los diferentes depósitos que conforman el distrito Zafranal. Estos complejos de intrusivos están conformados por dioritas, microdioritas, cuarzdioritas, y monzodioritas.

En el lado occidental del área, en la zona de pampas, se encuentra gruesas secuencias de arenisca y lodolita roja (capas rojas) de la Formación Moquegua inferior del Eoceno superior sobre las cuales encontramos a los depósitos volcánico-aluviales y aluviales del Moquegua superior y del Cuaternario respectivamente.

2. Geología local del pórfido Zafranal

Zafranal está limitado tanto al norte como al sur por dos rasgos morfotectónicos que se extienden en forma rectilínea según un rumbo E-O. Estos rasgos responden a un fuerte control estructural determinado por la tectónica andina. Estas grandes estructuras de característica transpresiva representarían el control estructural original del emplazamiento del depósito y forman parte del sistema de fallas Iquipí-Clavelinas. Esta morfología estructural indica que Zafranal se ha emplazado en el centro de un jog transpresivo limitado tanto al norte como al sur por estas estructuras mayores. El emplazamiento de los cuerpos de intrusivos dentro del depósito así como la zona de alteración y mineralización coincide exactamente dentro del límite de estas grandes estructuras. Estructuralmente el pórfido de Cu-Au Zafranal ha sido formado como un sistema activo con introducción de magmas y soluciones hidrotermales a lo largo de estructuras geológicas en la roca (Rivera et al., 2010). Estas estructuras son el resultado de esfuerzos aplicados por fuerzas regionales y fuerzas magmáticas localizadas.

Las fuerzas regionales en el depósito Zafranal fueron importantes ya que controlan la localización y la forma de los cuerpos intrusivos y son evidentes en el conjunto de fallas observadas.

Rocas volcánicas afloran en toda el área, dominadas por intercalaciones de rocas sedimentarias y volcánicas. La secuencia sedimentaria comprende limolita, arenisca y brechas sedimentarias (*debris flows*); mientras que la secuencia volcánica consiste de tobas, brechas y flujos lávicos andesíticos, así como unidades sub-volcánicas de composición andesítica. Esta unidad está afectada por una fuerte alteración cuarzo-sericita y presenta altos grados de foliación (por cizallamiento) dentro de la zona de alteración del pórfido Zafranal.

En la zona norte del depósito se encuentran dos unidades de gran importancia de acuerdo a su gran extensión dentro del distrito. La unidad denominada "milonitas" está conformada por intrusivos de composición intermedia a máfica, siendo su característica principal su textura gneisosa de bandas de biotita-cuarzo-feldespatos potásico y localmente fuerte foliación. El bandeamiento y foliación están orientados según la dirección predominante del fallamiento, es decir N130-140° (SFI) y N070-090° (SFIC). Este intrusivo intruye al basamento volcánico y se emplazó contemporáneamente con los esfuerzos de cizalla a la que estuvo sometida la zona. Una unidad de diorita-granodiorita se encuentra localizada inmediatamente al norte de las "milonitas". Este stock grande es más joven que las "milonitas" y correspondería al intrusivo precursor del sistema de tipo pórfido, exhibiendo clorita y epidota correspondiente a su borde propilítico, de hasta 400 m de extensión.

Al igual que en los demás pórfidos de la franja cretácica del sur del Perú, los principales eventos intrusivos en el área de Zafranal ocurrieron durante el Cretáceo superior. El complejo intrusivo Zafranal tiene una orientación E-O y comprende rocas de composición intermedia que son las responsables de la importante alteración en superficie (5 x 1.2 km) y mineralización de este depósito. Este complejo de intrusivos comprende varias unidades, destacando las principales:

2.1. Diorita Zafranal

Es una roca de color gris verdosa, con textura porfirítica, conformada por plagioclasa, hornblenda, y cuarzo. En superficie aflora a manera de stocks y diques en todo el depósito, cortando a las rocas volcánicas. Este intrusivo exhibe en superficie alteración sericita-clorita-biotita presentando además vetillas de tipos D, B, y, en profundidad, A. Se postula que este intrusivo representa una fase temprana de mineralización hipógena de cobre en el depósito.

2.2. Microdiorita

Es de color gris verdosa, con textura de grano fino, conformada por plagioclasa, hornblenda, y poco cuarzo. Aflora principalmente a manera de stock y apófisis en la zona central del depósito, exhibiendo en superficie una alteración clorita-biotita y moderada sericita sobreimpuesta. En profundidad presenta una alteración

potásica: cuarzo (silicificación) + biotita secundaria + clorita ± feldespato potásico acompañado por vetillas de tipos B, A, y EB. Esta microdiorita, que corta a la Diorita Zafranal, parece ser el principal responsable de la mineralización hipógena de cobre en Zafranal, con leyes de hasta 1 % en la zona de sulfuros primarios.

2.3. Diques tardiminerales

Generalmente de textura fanerítica y de composición diorítica, estos diques son conformados por plagioclasa, hornblenda, y ojos de cuarzo. Normalmente exhiben una alteración con clorita-biotita, y comúnmente presentan pirita (1 %) y calcopirita (Tr).

2.4. Diques postminerales

Estos diques y pequeñas apófisis representan los últimos eventos intrusivos en el depósito. Pueden exhibir una alteración propilítica o estar inalterados. Son generalmente de composición diorita-monzodiorita.

En la zona oeste se encuentran rocas volcánicas de composición andesítica y edad reciente, posiblemente Plioceno-Pleistoceno, correlacionadas con los flujos volcánicos del valle de Andagua (Lluta) (Mamani et al., 2009), y cubriendo parte de la alteración en Zafranal. La ubicación de estas coladas volcánicas sugiere una posible asociación con el SFIC, ya que se ha podido determinar regionalmente su distribución en toda la franja controlada por este conjunto de fallas.

3. Alteración-mineralización del pórfido Zafranal

La alteración del pórfido Zafranal se caracteriza por cuatro tipos de alteraciones:

(i) Una alteración propilítica, conformada por clorita + epidota ± pirita se encuentra bordeando la zona de alteración filica-potásica así como en los intrusivos postminerales a manera de diques.

(ii) Una alteración filica, dominada por cuarzo + sericita + arcillas, presenta una gran extensión en la zona, afectando a las rocas volcánicas, diorita Zafranal y microdiorita, siendo sobreimpuesta a la alteración potásica.

(iii) Una alteración potásica, conformada por biotita secundaria + clorita + cuarzo ± feldespato potásico, está asociada a los intrusivos principales (diorita Zafranal y microdiorita), mientras que a profundidades mayores a 350 m presenta anhidrita en vetillas.

(iv) En superficie, y normalmente hasta los 50 m de profundidad, una alteración argílica supérgena está conformada por una gran variedad de arcillas y menor sericita.

3.1. Mineralización hipógena

Esta mineralización primaria está asociada a una zona de alteración potásica conformada por una asociación de cuarzo (silicificación) + biotita secundaria + clorita ± feldespato potásico. En esta zona se puede encontrar calcopirita diseminada y en vetillas, además de vetillas de

tipos EB, A, y B (cuarzo-calcopirita-pirita, cuarzo-calcopirita-molibdenita).

La ley promedio de este tipo de mineralización está alrededor de 0.35 % Cu, teniendo localmente hasta 1% Cu. Esta mineralización se encuentra hospedada en la diorita Zafranal así como en la microdiorita, presentando esta última la mejor ley de cobre primario. Se ha observado mineralización primaria con leyes de entre 0.35 y 0.45 % Cu en Zafranal hasta 450 m de profundidad.

3.2. Mineralización supérgena

La mineralización supérgena en Zafranal está representada por calcosina remplazando calcopirita y pirita. La zona de enriquecimiento secundario muestra mayores leyes en las rocas volcánicas y la Diorita Zafranal. La cantidad de calcosina es menor cuando se encuentra dentro la microdiorita, probablemente por la mayor cantidad de calcopirita con relación a la pirita, lo cual disminuiría la cantidad de ácido sulfúrico que la microdiorita podría generar para el proceso de enriquecimiento.

La zona de enriquecimiento supérgeno está asociada a una alteración filica conformada por un ensamble sericita + cuarzo + clorita/biotita + arcillas + pirita. El espesor del enriquecimiento supérgeno llega hasta los 150 m, pero promedio 75 m en todo el depósito, retornando valores promedio de hasta 1 % Cu.

3.3. Mineralización de óxidos de cobre

Esta mineralización está localizada en el interior del encape lixiviado y asociada a una alteración filica intensa (sericita + cuarzo + arcillas). La mineralización en óxidos puede llegar a tener hasta 60 m de espesor con leyes promedio de hasta 0.4 % Cu, mientras que el encape lixiviado tiene una potencia de entre 30 y 200 m. La zona de óxidos de cobre determina antiguas zonas de enriquecimiento supérgeno (*paleoblanket*) colgadas dentro de la zona de lixiviación de óxidos de hierro. Los óxidos de cobre están remplazando a calcosina, siendo las principales especies: brocantita, crisocola, calcantita, neotocita, tenorita, y psilomelanos.

4. Datos geocronológicos

Se realizaron cuatro dataciones por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en el depósito Zafranal, una en roca total de la unidad volcánica andesítica y tres sobre biotita secundaria de los intrusivos principales que controlan la mineralización de cobre. Los resultados fueron 79.98 ± 0.36 Ma en la unidad andesítica; 82.41 ± 0.43 Ma en la Diorita Zafranal; y 83.37 ± 0.54 y 81.16 ± 0.43 Ma en la Microdiorita Zafranal (Fig. 1). Estas edades muestran que la alteración y mineralización de tipo pórfido de Zafranal ocurrieron en el Cretáceo superior.

Sin embargo, se observa que la edad aparente obtenida, en roca total, sobre la unidad andesítica (~80.0 Ma) es más joven que las edades obtenidas, en biotitas, sobre la alteración afectando a intrusivos que cortan a la primera. Esta inconsistencia queda por ahora sin interpretar.

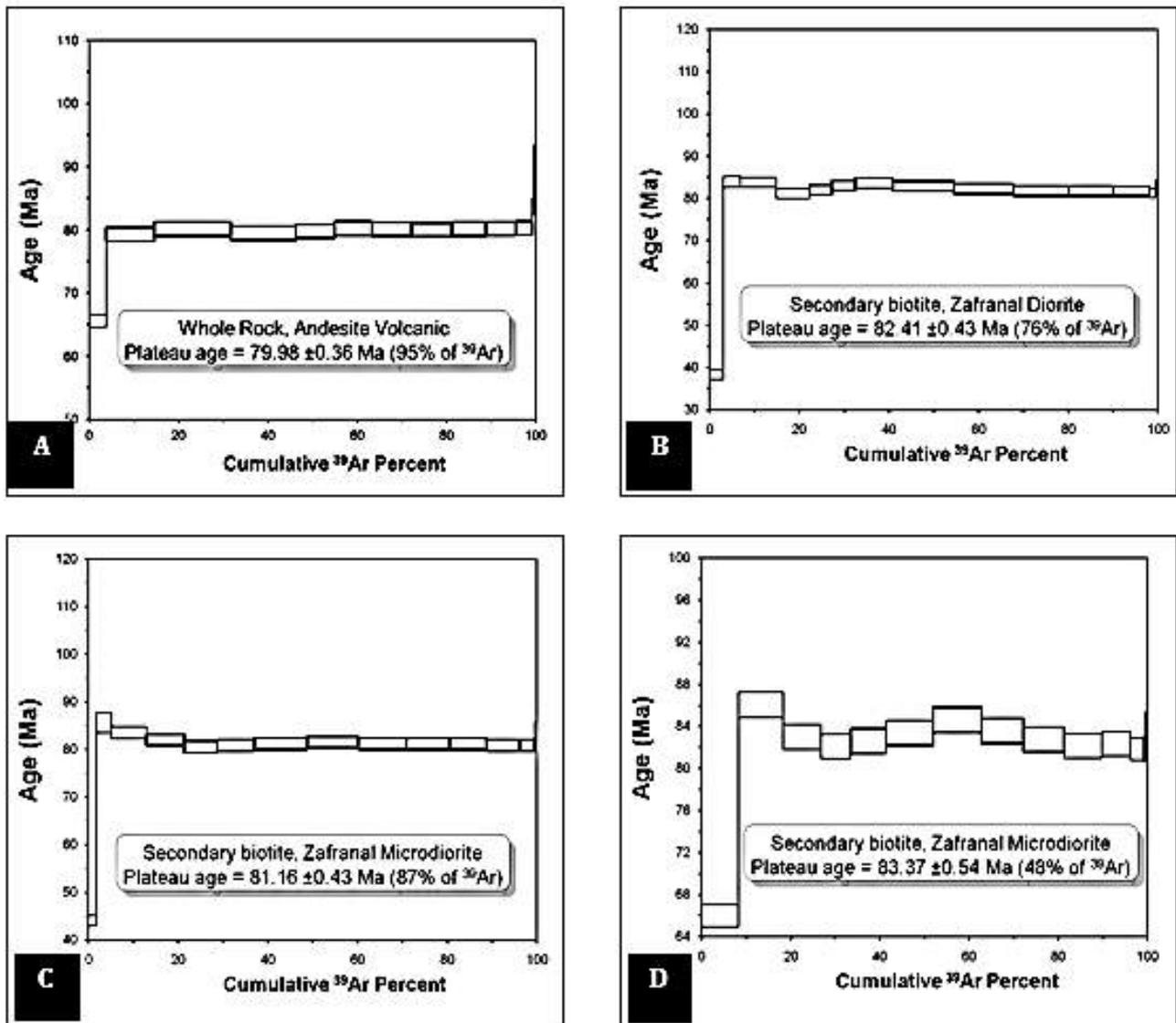


Figura 1. Muestras datadas por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en Zafranal.

A. Unidad andesítica, roca total, excelente edad plateau: 79.98 ± 0.36 Ma.

B. Diorita Zafranal, biotita secundaria, edad plateau buena: 82.41 ± 0.43 Ma.

C. Microdiorita Zafranal, biotita secundaria, excelente edad plateau: 81.16 ± 0.43 Ma.

D. Microdiorita Zafranal, biotita secundaria, edad plateau para sólo 48 % del argón total liberado: 83.37 ± 0.54 Ma.

5. Conclusiones

Los resultados geocronológicos indican una edad Cretácea superior para el depósito. Esta edad metalogénica abre la posibilidad que existan más depósitos de Cu de importancia similar a Zafranal dentro de la franja cretácea de pórfidos de cobre del sur del Perú, franja que se extiende entre los paralelos 13° y 16° S.

Hasta la fecha, el depósito Zafranal representa el pórfido de edad cretácea más importante y de mayor potencial económico, con recursos de 472.1 Mt @ 0.36 % Cu y 0.08 g/t Au (medidos e indicados), y 0.6 Mt @ 0.21 % Cu y 0.15 g/t Au (inferidos).

Referencias

- Quang, C.X., Clark, A.H., Lee, J.K.W. 2005. Response of supergene processes to episodic Cenozoic uplift, pediment erosion, and ignimbrite eruption in the porphyry copper province of southern Perú. *Economic Geology*, v. 100, p. 87-114.
- Rivera, F., Moretti, A., Baumgartner, R. 2008. La franja cretácea de pórfidos de cobre en el sur del Perú. XIV Congreso Peruano de Geología, Lima, CD-ROM, 6 p.
- Rivera, F., León, J., Cano, O., Huamán, M. 2010. Controles de mineralización en el pórfido de Cu Zafranal, en el sur del Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 104, p. 9-23.
- Mamani, M., Rivera, F. 2011. Sistema de fallas Iquipí-Clavelinas: Zona de transición cortical e implicancias para el emplazamiento de depósitos minerales: VII ProExplo, Lima, CD-ROM, 4 p.