

GEOLOGÍA Y GEOCRONOLOGÍA DEL PÓRFIDO DE Cu-Au ZAFRANAL, EN EL SUR DEL PERÚ

Fernando Rivera

Minera AQM Copper Perú SAC, Calle Amador Merino Reyna 339 Of. 401-A, San Isidro, Lima 27

RESUMEN

Zafranal es un depósito tipo pórfido de cobre ubicado a 90 km al noroeste de la ciudad de Arequipa. Su descubrimiento fue hecho por Teck Cominco Perú en el año 2003. Actualmente, Minera AQM Copper SAC opera el Proyecto Zafranal habiendo completado un programa agresivo de exploración (67,682 m de perforación DDH y 22,953 RCD) 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 tipo pórfido se encuentran controlados por la intersección de dos grandes sistemas de fallas regionales, la extensión norte del sistema de fallas Incaquiuo (SFI) y el sistema de fallas Iquipi Clavelinas (SFIC). Al igual que en los demás pórfidos de la franja Cretácea 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, el cual 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.

La alteración en el depósito Zafranal se presenta como cuatro tipos: propilítica, fílica, potásica, y argílica supérgena hasta los 50 m de profundidad. La mineralización primaria está asociada a una zona de alteración potásica con rangos de 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 metros de espesor con leyes promedio de hasta 0.4% Cu.

Estudios $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Figura 2) muestran que la alteración y mineralización tipo pórfido de Zafranal tuvieron lugar en el Cretáceo Superior. En el depósito Zafranal se realizaron cuatro dataciones, una en roca total de la unidad volcánica andesítica y tres dataciones en biotita secundaria de los intrusivos principales que controlan la mineralización de cobre (82.41 ± 0.43 , 83.37 ± 0.54 y 81.16 ± 0.43 Ma). Hasta la fecha, el depósito Zafranal representa el pórfido de edad Cretácea más importante y de mayor potencial económico encontrado en el Perú.

CONTEXTO DISTRITAL

Zafranal está localizado 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 tipo pórfido de cobre, de los cuales Zafranal es el más importante y de mayor potencial conocido hasta la fecha.

Zafranal forma parte del Distrito Zafranal, que está conformado por los pórfidos Campanero, Sicera Norte, Sicera Sur, Zafranal, Rosario y Zafranalito. Estos sistemas tipo pórfido se encuentran controlados por la intersección de dos grandes sistemas de fallas regionales, la extensión norte del sistema de fallas Incaquiuo (SFI) y el sistema de fallas Iquipi Clavelinas (SFIC). El SFI esta conformado por un conjunto de fallas transpresivas de dirección preferente NO-SE que parecen controlar el emplazamiento de los depósitos 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 Cu-Au (pórfidos, epitermales y vetas mesotermales) 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 Jurásica Inferior, posiblemente de la Formación Chocolate y sedimentos clásticos-calcareos del Grupo Yura del Jurásico Superior-Cretáceo Inferior, además de secuencias volcánico-sedimentarias de Cretáceo Superior; intruidos por intrusivos deformados caracterizados por presentar textura gneisosa e intensa foliación y composición máfica (gabros-gabrodiorita). La foliación tiene una orientación preferente de 310°-320° (SFI) y 250°-270° (SFIC) asociado al sistema estructural dentro del distrito. Las primeras intrusiones del Batolito de la Costa del Cretáceo Superior fueron de diorita y granodiorita, seguido 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-aluvionales y aluviales, del Moquegua Superior y del Cuaternario respectivamente.

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 el 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 Iquipi-Clavelinas. Esta morfología estructural indica que Zafranal se ha emplazado en el centro de un jog transpresivo limitado sea al norte que 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 cobre-oro 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 son 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 (cizallamiento) dentro de la zona de alteración del pórfido Zafranal. En la zona norte del depósito encontramos a dos unidades de gran importancia de acuerdo a su gran extensión dentro del distrito. La unidad denominada milonitas esta conformada por intrusivos de composición intermedia a máfica, siendo su característica principal su textura gneisosa de bandas de biotita-cuarzo-feldespato potásico y localmente fuerte foliación. El bandeamiento y foliación están orientados según la dirección predominante del fallamiento ya sea 310°-320° (SFI) y 250°-270° (SFIC). Este intrusivo intruye al basamento volcánico y fue originado contemporáneamente con los esfuerzos de cizalla a la que estuvo sometida la zona. Una unidad diorita-granodiorita se encuentra localizada inmediatamente al norte de las milonitas. Este gran stock es más joven que las milonitas y correspondería al intrusivo precursor del sistema tipo pórfido, exhibiendo clorita y epidota correspondiente al borde propilítico (hasta 400 m de extensión) de la zona.

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, el cual 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 tipo pórfido. Este complejo de intrusivos comprende varias unidades destacando las principales:

Diorita Zafranal, es una roca de color gris verdosa con textura porfirítica conformada por plagioclasas, 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 tipo D, tipo B y en profundidad tipo A. Se postula que este intrusivo representa una fase temprana de mineralización hipógena de cobre en el depósito.

Microdiorita, es de color gris verdosa con textura de grano fino conformada por plagioclasas, hornblendas y cantidades pequeñas de 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 tipo B, tipo A y tipo 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.

Diques Tardiminerales, generalmente de textura fanerítica y de composición diorítica conformada por plagioclasa, hornblenda y ojos de cuarzo. Normalmente exhibe alteración clorita-biotita y comúnmente presenta piritita (1%) y calcopiritita (Tr).

Diques postminerales, a manera de diques y pequeños apófisis, son los últimos eventos intrusivos en el depósito. Estos pueden exhibir alteración propilítica o estar inalterados. Generalmente de composición diorita-monzodiorita

Volcánicos de composición andesítica de edad reciente posiblemente plioceno-pleistoceno correlacionados con los volcánicos del valle de Andagua (Lluta) (Mamani et al., 2009) se encuentran en la zona oeste, cubriendo parte de la alteración en Zafranal. La ubicación de estos volcánicos estarían asociados al SFIC, ya que se ha podido determinar regionalmente su distribución en toda la franja controlada por este conjunto de fallas.

ALTERACIÓN-MINERALIZACIÓN DEL PÓRFIDO ZAFRANAL

La alteración del pórfido Zafranal está determinada por cuatro tipos de alteraciones: (i) Alteración propilítica, conformada por clorita + epidota +/- piritita la que se encuentra bordeando la zona de alteración fílica-potásica así como en los intrusivos postminerales a manera de diques; (ii) Alteración fílica, dominada por cuarzo + sericita + arcillas, presentando una gran extensión en la zona afectando a los volcánicos, en la diorita Zafranal y microdiorita sobreimpuesta a la alteración potásica; (iii) Alteración potásica conformada por biotita secundaria + clorita + cuarzo +/- feldespato potásico asociada a los intrusivos principales diorita Zafranal y microdiorita, mientras que a profundidades mayores a 350 m presenta anhidrita en vetillas; y (iv) Alteración argílica supérgena en superficie y normalmente hasta los 50 m de profundidad, conformada por gran variedad de arcillas y menor sericita.

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 podemos encontrar calcopiritita diseminada y en vetillas; además de vetillas tipo EB, A y B (cuarzo-calcopiritita-piritita, cuarzo-calcopiritita-molibdenita). Los rangos de ley promedio de este tipo de mineralización están entre los 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 unidad 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 metros de profundidad.

Mineralización Supérgena:

La mineralización supérgena en Zafranal está representada por calcosina remplazando calcopirita y pirita. La zona de enriquecimiento secundario muestra mayores leyes cuando se ubica en los volcánicos 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 fílica conformada por un ensamble: sericita + cuarzo + clorita/biotita + arcillas + pirita. El espesor del enriquecimiento supérgeno llega hasta los 150 m, pero promedia en todo el depósito 75 m, retornando valores promedio de hasta 1% Cu.

Mineralización de Óxidos de Cobre:

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

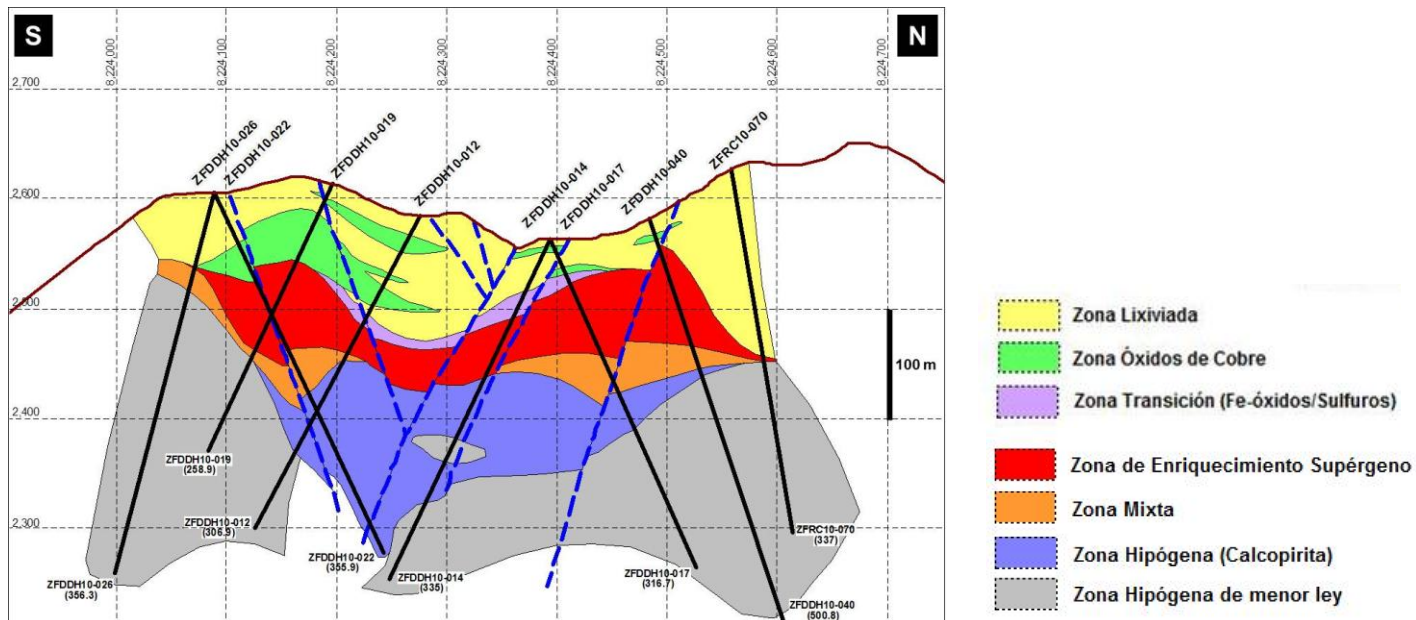


Figura. 1. Sección 793400 mirando al oeste, en este gráfico se puede observar los diferentes tipos de mineralización que se encuentran en el depósito Zafranal.

DATOS GEOCRONOLÓGICOS

Estudios $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Figura 2) muestran que el estilo de alteración y mineralización tipo pórfido de Zafranal tuvieron lugar en el Cretáceo Superior. En el depósito Zafranal se realizaron cuatro dataciones, una en roca total de la unidad volcánica andesítica y tres dataciones en biotita secundaria de los intrusivos principales que controlan la mineralización de cobre; 79.98 ± 0.36 Ma en el volcánico andesítico, 82.41 ± 0.43 Ma en la Diorita Zafranal, 83.37 ± 0.54 y 81.16 ± 0.43 Ma en la Microdiorita Zafranal.

CONCLUSIONES

Con los resultados radiométricos se ha podido establecer la edad Cretácea Superior del depósito, el conocimiento de su edad metalogénica nos muestra la posibilidad de tener más depósitos de Cu de

importancia similar a Zafranal dentro de la franja cretácea de pórfidos de cobre del sur del Perú que se extiende entre los paralelos 13° y 16° S. Cabe resaltar que hasta la fecha Dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Rivera et. al., 2008) muestran que la alteración y mineralización del tipo pórfido de cobre de los sistemas más representativos a lo largo de la franja tuvo lugar en el Cretáceo Superior. Estos estudios radiométricos se realizaron en los pórfidos Puquio, Pucacorrall Sur, Angostura y Zafranal. Sin embargo, actualmente 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). Con estos nuevos resultados de mineralización en el depósito Zafranal se ha podido establecer que existiría un potencial adicional en esta franja metalogénica ya que anteriormente no se tenía ninguna referencia de depósitos de mediano tamaño de esta edad.

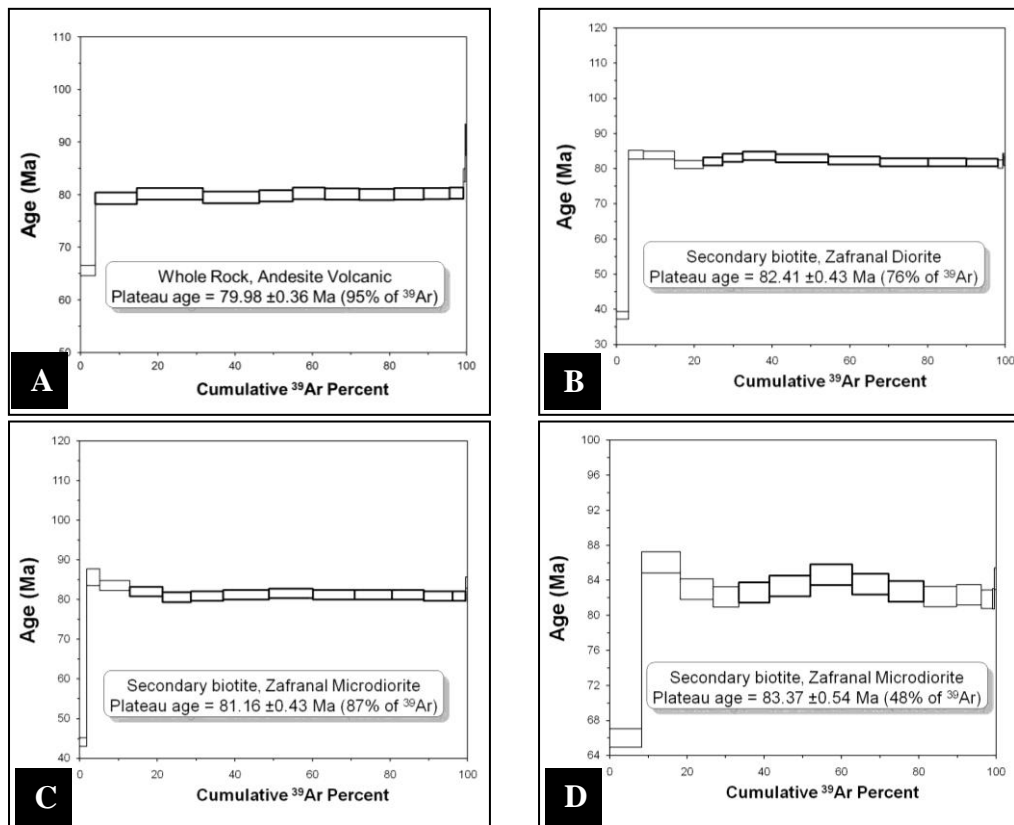


Figura. 2. Muestras datadas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Zafranal. **A.** Roca total, volcánico andesítico. **B.** Biotita secundaria, Diorita Zafranal. **C.** Biotita secundaria, Microdiorita Zafranal. **D.** Biotita secundaria, Microdiorita Zafranal.

REFERENCIAS

- Chan X. Quang, Alan H. Clark and James K. W. Lee. 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. y Baumgartner, R. 2008, La franja Cretácea de pórfidos de cobre en el sur del Perú: XII Congreso Latinoamericano de Geología y XIV Congreso Peruano de Geología, Lima, 2008, CD-ROM, 6 p.
- Rivera, F., León, J., Cano, O. y 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. y Rivera, F. 2011, Sistema de fallas Iquipi-Clavelinas: Zona de transición cortical e implicancias para el emplazamiento de depósitos minerales: VII Congreso Internacional de Exploraciones ProExplo, Lima, 2011, CD-ROM, 4 p.