

LOS EARLY HALOS Y SU IMPLICANCIA EN LA EXPLORACION DE PORFIDOS EN LAS AMERICAS

Raymond Rivera Cornejo¹, & Federico Cernuschi²

¹ Geólogo Principal en First Quantum Minerals, Av. Benavides 1579, Miraflores, Lima, Perú.
raymond.rivera@fqml.com

² Consultor externo. Eclectic Rock, Punta Ballena, Uruguay.
fede@eclectic-rock.com

RESUMEN

Este documento trata de actualizar el conocimiento de un tipo de venillas no tan conocidas que llevan el nombre early halos. El reconocimiento de este tipo de venillas puede servir mucho para la vectorización lateral y vertical de un sistema porfirítico, pero debido a la escasa información que existe sobre ellas muchas veces son subestimadas, desapercibidas o hasta incluso confundidas con otros tipos de venillas.

Este tipo de venillas son más comunes en los pórfidos Cu – Mo, mientras que en los pórfidos con afinidad hacia el Au (Cu – Au / Au – Cu) suelen ser más escasas o no estar presentes, pero aun así su débil presencia puede servir como una herramienta de vectorización.

Meyer, 1965 ya había reportado este tipo de venillas en Butte (Montana), pero en muchos otros depósitos los early halos fueron reconocidos como tales hasta el trabajo compilatorio de Proffett 2009. No obstante, fueron descritos tempranamente en Los Pelambres por Atkinson et al., 1996. Más recientemente han sido reportadas en una diversidad de depósitos como Haquira Este (Cernuschi et al., 2013) y Copper Cliff (Montana, Uribe-Mogollon & Maher, 2018).

Esta investigación presenta una compilación de una serie de observaciones de campo realizadas sobre varios sistemas porfiríticos (económicos y no económicos) y trata de resumir las principales características, llegando hasta una clasificación que incluye todos los tipos de early halos reportados en otras investigaciones y propone como sería su ocurrencia y cuál sería su implicancia geológica - económica dentro de un sistema porfirítico. Finalmente, la investigación llega a resumir tres tipos principales de early halos, los cuales son conocidos como: EDM (early dark micaceous), PGS (pale green sericite) y GRS (Green sericite).

1. Introducción

Los geólogos de campo que trabajan en la exploración minera tratan de entender que características geológicas asociadas a los diferentes tipos de venillas podrían dar indicios acerca del potencial geológico y económico de un depósito tipo pórfido y así tomar decisiones rápidas para diseñar, continuar o parar una campaña de perforación. Tomando esta inquietud la presente investigación trata de difundir algunos tipos de las características de los early halos que servirían para explorar o evaluar un proyecto de tipo pórfido. Esto nos llevó a buscar y sintetizar una serie de características comunes de campo (mapeo o logeo) que nos permitan hacer comparaciones entre la amplia gama de depósitos porfiríticos que existen.

En este sentido, esta investigación se considera importante porque compila una colección de observaciones geológicas realizadas durante aproximadamente 10 años en sistemas porfiríticos tipo Cu – Mo, los cuales se encontraban distribuidos a lo largo de los belts cupríferos de las Américas. (Haquira, Pecoy, Chapi, Nativo, Elida y Atravesado en Perú, Taca Taca en Argentina, América en Chile, Orquídeas en Ecuador, Copper Creek en EEUU y Botija en Panamá). Algunos pórfidos Cu – Au también han sido incluidos (Espíritu en México, Alpala en Ecuador y Quicay II en Perú).

Durante la exploración y evaluación de depósitos tipo pórfido muchos geólogos ponen énfasis en las clásicas venas de cuarzo tipo A y B o en las venillas tipo D, pero las características y distribución espacial de los early halos y su implicancia económica son poco entendidas.

Lo nuevo de esta investigación es que se enfoca en una descripción mineralógica y fotográfica de las características de los early halos, además de proponer un modelo de distribución espacial dentro de los sistemas porfiríticos y una posible teoría que explique el origen de la variedad de los early halos.

2. Fundamento Conceptual

Los depósitos tipo pórfido se forman a diferentes profundidades por sobre las cámaras magmáticas y sus respectivas cúpulas por donde se desprenden fluidos magmáticos hidrotermal (Seedorff et al., 2005). Proffett (2009) propuso que la profundidad de liberación de los fluidos magmático-hidrotermales controla el tipo de venillas dominante en la mineralización del pórfido. En los pórfidos relativamente someros (3 – 4 Km de profundidad), las zonas de alta ley de Cu están relacionadas a un stockwork de venillas tempranas de cuarzo sacaroide (tipo A) dentro de una alteración potásica (feldespato potásico y biotita). Estos son llamados A-Vein Type y ejemplificados por el pórfido de Yerington (ver Fig. 01). Por otro lado, existen pórfidos que tuvieron su origen a más de 4 Km de profundidad donde las leyes más altas de Cu están relacionadas a una alta densidad de early halos (EH) que contienen muy poco cuarzo y están constituidos por reemplazos de muscovita, feldespato potásico y biotita hidrotermal. Esos pórfidos son llamados Early Halo Type y son ejemplificados por el pórfido de Ann-Mason (Ver Fig. 01).

En esta investigación nos focalizamos en los depósitos profundos del tipo early halos. Generalmente, estos depósitos consisten de grandes volúmenes de rocas con relativas bajas leyes de Cu (0.2 – 0.5% Cu), y su emplazamiento puede ocurrir dentro de los batolitos, stock de varios cientos de metros, así como en rocas sedimentarias. La principal alteración hidrotermal es la alteración potásica, evidenciada por el reemplazamiento de los minerales máficos por biotita secundaria. Esta zona potásica, contiene early halos constituidos por feldespato potásico, biotita y muscovita fengítica (alteración tipo early halo).

Dentro de estos grandes volúmenes de roca mineralizada y asociado a zonas más restringidas de alta ley (>0.8%) podemos encontrar una más alta densidad de early halos. Estas zonas de alta ley pueden variar significativamente de un pórfido a otro en tamaño, leyes y tipos de early halos.

Es muy importante mencionar que las venillas de cuarzo sacaroide tipo A con o sin halos de feldespato potásico, también ocurren en este segundo grupo de pórfidos y pueden estar mineralizadas, pero con menos intensidad y abundancia, y las zonas de alta ley de Cu no están directamente relacionadas a ellas.

El tipo de early halo más conocido inicialmente fue EDM (early dark micaceous) debido al color oscuro que le proporcionaba la biotita secundaria cuando era predominante. La asociación con la coloración oscura trajo consigo confusiones, especialmente cuando el halo de alteración era más claro debido a la

predominancia de la muscovita fengítica. Proffett (2012) determinó que, aunque todos estos halos parecen ser tempranos no todos son oscuros, así mismo preciso que la nomenclatura EDM (early dark micaceous) no es un término preciso para todos estos halos y podría llevar a confusiones. Usar el término EDM podría llevar a que los halos que no son oscuros y micáceos sean ignorados, Entonces podría ser mejor utilizar un término más general que englobe todas las diferencias como: early halos.

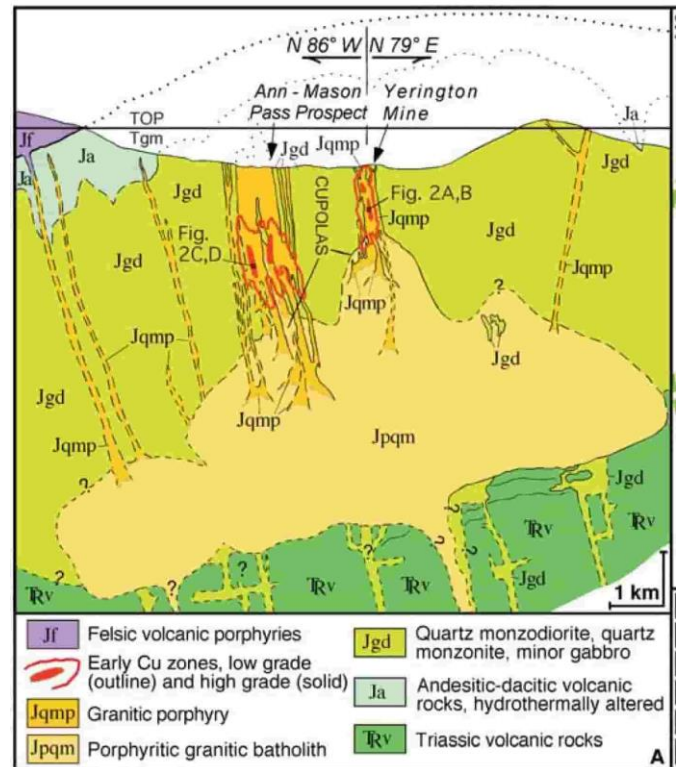


Figura 01.- Imagen tomada de Proffett (2009), donde se muestra como dentro de un mismo batolito se tienen dos pórfidos separados aproximadamente 3.5 Km pero cada uno con diferente profundidad de cúpula (fuente de los fluidos). En el caso del pórfido de Yerington la cúpula es más superficial y las altas leyes de Cu están dominadas por venillas de cuarzo tipo A. Por otro lado la cúpula del pórfido de Ann - Mason es más profunda y las altas leyes de Cu están dominadas por halos tempranos (EH). Nótese también que la zona mineralizada o volumen de roca mineralizada es mucho mayor para el pórfido dominado por early halos (mayor tonelaje).

Rusk et al., 2008 y Mark Reed et al., (2013) de sus estudios realizados únicamente en el pórfido de Butte proponen que los diferentes tipos de alteración que se observan en un pórfido son producto de un único fluido de composición inicial magmática que fue cambiando en el tiempo debido a su enfriamiento, despresurización e interacción con la roca caja. En ese sentido él describe que el origen de los diferentes tipos de early halos podría ser debido a una evolución de este fluido cuando estos ascienden hacia la superficie. Ambos autores son los primeros que tratan de hacer

una clasificación más detallada de los early halos introduciendo muchas nomenclaturas usadas en esta investigación (ej. pale green sericite).

Uribe-Mogollon & Maher (2018) en su estudio de la sericita del pórfido Copper Cliff pudieron diferenciar dos tipos de alteración muscovítica, uno primero caracterizado por una muscovita fengítica temprana, verdosa y en estabilidad local con biotita y otro posterior asociado a una muscovita blanca o gris asociada a venas de pirita tipo D. La primera de ellas conocida como Green Sericite (GRS) es la que se encuentra asociada a las altas leyes de Cu (> 0.5%). Si bien Uribe-Mogollon & Maher (2018) considera que la sericita verde (GRS) presente en los halos de alteración son producto de una alteración fílica temprana que se superpone a la alteración potásica, en este trabajo consideramos estos como parte de los early halos dado la estabilidad con biotita y relaciones de corte con otras venas. Este tipo de green sericite halos son responsables de la mineralización en el pórfido de Taca Taca (Benavides, 2017).

3. Características de los Early Halos

A continuación, pasaremos a describir las principales características de los tres principales tipos de early halos (EH), desde diferentes puntos de vista, comenzando desde una visión micro con su mineralogía, morfología, relaciones de corte, hasta llegar a una visión macro explicando su modo de presentarse (ocurrencia) y como se vectoriza su distribución espacial dentro de un sistema porfirítico.

3.1 Mineralogía

El estudio con el QUESCAM en Haquira Este (Cernuschi, 2015) nos ha permitido tener una mejor idea de los minerales que conforman estas venillas tempranas (Ver Fig. 02). Por ejemplo, los clásicos early halos de color oscuro inicialmente conocidos como EDM (early dark micaceous) contienen biotita secundaria, muscovita del tipo fengita, feldespato potásico, pequeñas cantidades de cuarzo y corindón. La magnetita está ausente. En halos EDM de Butte se ha reportado Andalusita (Mercer et al., 2013). Es importante mencionar que también es posible encontrar biotita magmática dentro del halo que normalmente es pervasivo, pero no destruye totalmente la textura original de la roca como lo hace los halos netamente sericíticos asociados a venas más jóvenes tipo D. También es posible encontrar clorita reemplazando los minerales máficos. Halos EDM podemos encontrar en los pórfidos de Butte, Bingahm, Pelambres, Haquira, Quicay y Alpala.

El cambio en la predominancia de algunos minerales es lo que influye en el color de los halos, además del

tamaño de los cristales de la muscovita (fengita). Los early halos adquieren un color relativamente más claro debido a la predominancia relativa de la muscovita sobre la biotita secundaria y magmática. De igual manera la textura de estos halos de color más claro es pervasiva parcialmente destructiva de la textura original de la roca.

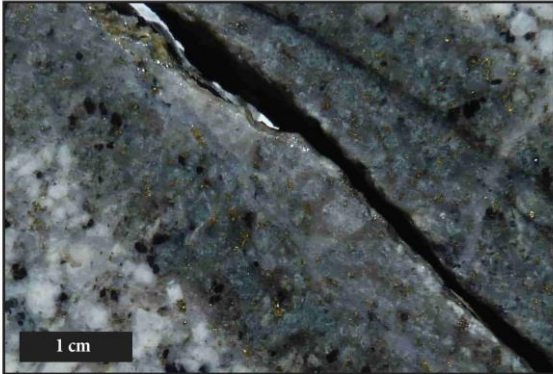
Los cambios de color y de la predominancia mineralógica fueron notados por algunos investigadores (Rusk et al., 2008 y Mark Reed et al., 2013) quienes llamaron a algunos early halos de color más claro como Pale Green Sericite (PGS). Ejemplos de este tipo de halos podemos encontrar en los pórfidos de Haquira, Pecoy, Atravesado, Nativo, Elida, Copper Creek, Botija, todos estos de Cu - Mo and Espíritu siendo del tipo Cu - Au.

Early halos aún más claros, donde la cantidad de biotita es aún menor son llamados Green Sericite (GRS). En estos se observa textura tipo shreddy que podría estar relacionado al reemplazamiento de la biotita secundaria. Alguna vez esta sericita verde parece estar dispersa como pequeños parches dentro del early halo. Una mineralogía clave es que en este último halo hay una mayor presencia de sílice (cuarzo). Pórfidos característicos con este tipo de venillas son Taca Taca, América y Copper Cliff.

Es importante mencionar que la mineralogía, o el dominio de un tipo de halo sobre otro tipo de halo a veces se complica por la superposición que existe entre ellos. Por ejemplo, en Haquira se han encontrado algunas zonas donde halos tipo PGS están reabriendo a los halos EDM.

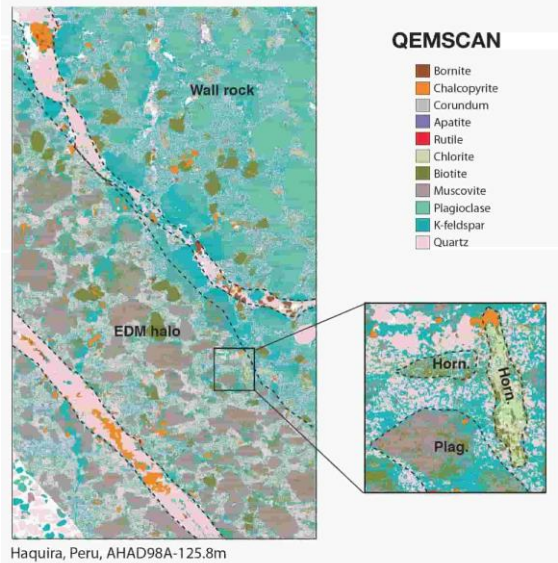
En base a estas y otras observaciones Cernuschi et al., 2019 proponen subdividir los early halos en base a su abundancia relativa de biotita/muscovita en EDM, PGS y GRS.

Early Dark Micaceous (EDM)



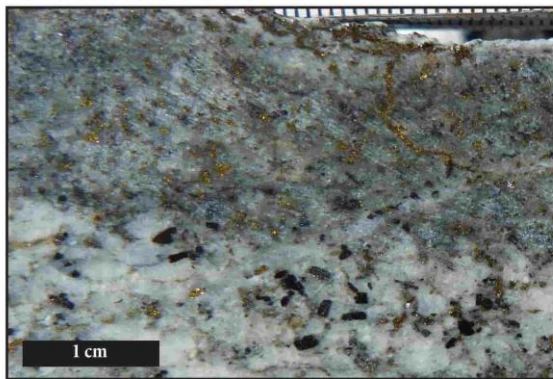
Dark colored early halos, commonly referred to as EDM (Early Dark Micaceous) halos (Meyer, 1965).
Haqira, Peru, AHAD98A-125.8m

Early Dark Micaceous (EDM)



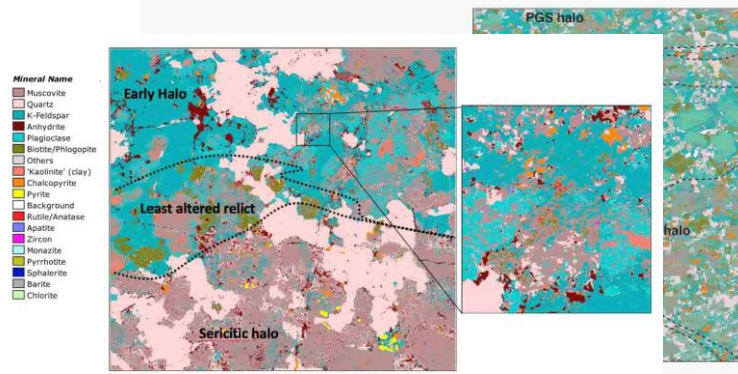
Haqira, Peru, AHAD98A-125.8m

Pale Green Sericite (PGS)

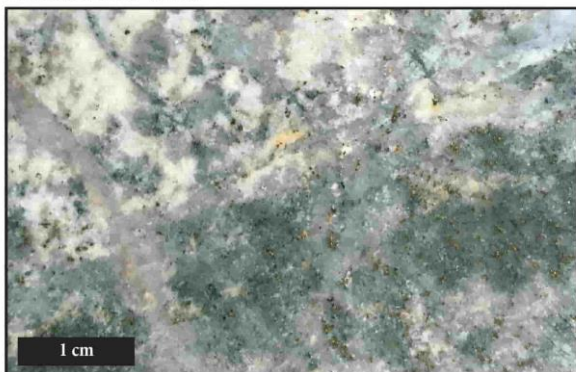


Coarser-grained and lighter colored halos than EDM have been named Pale Green Sericite (PGS, Rusk et al., 2008).
Haqira, AHAD185-229m

Pale Green Sericite (PGS)



Green Sericite (GRS)



Even lighter-colored and more fine-grained halos than EDM and PGS have been named Green Sericite (GRS, Benavides, 2017).
Taca Taca, Argentina, TTBJ-1292-400m

3.2 Morfología

La morfología de los diferentes tipos de early halos es muy similar y en general se trata de halos centimétricos y sinuosos que pueden llegar hasta los 5 cm, normalmente son relativamente simétricos hacia ambos lados de una fractura central por donde normalmente se puede fracturarse o ser reabierto por otro tipo de venillas. Los bordes

Figura 02.- Imágenes de QUESCAM en early halos tomadas del pórfido de Haqira y Taca Taca. Cernuschi (2015)

externos de los halos no son abruptos ni rectos, pero si son marcados y muestran una transición rápida de alteración y mineralización (Ver Foto 01 A). Algunas veces suelen amalgamarse y formar zonas con alta densidad de halos donde parecen existir early halos de metros de ancho. En algunos casos cuando se trata de halos muy claros (GRS) suelen ser confundido con venillas más jóvenes tipo D. La diferenciación clave en este caso son las relaciones de corte (Ver Foto. 01 B)

Es importante notar que early halos son comúnmente formados en la roca caja del pórfido mineralizador, sea este otro intrusivo, roca sedimentaria o roca metamórfica. La morfología de los early halos en rocas sedimentarias (areniscas feldespáticas) cambia y se observa que el ancho del halo se reduce considerablemente entre 1 a 2 centímetros y no avanzan varios metros más allá del contacto con el intrusivo (Ver Foto 01 B).. En areniscas cuarzosas el halo se reduce considerablemente y esto quizás se debe al hecho que este tipo de roca es muy inerte para las alteraciones hidrotermales y no tiende a producir halos. En este caso los halos son milimétricos o casi desaparecen a pocas decenas de centímetros del contacto con el intrusivo, ejemplo el pórfido de Haquira. Las areniscas feldespáticas suelen ser más reactivas y los early halos se reducen a varios centímetros donde se observan los sulfuros finamente diseminados conformados por pirita y trazas de calcopirita que a menudo son confundidos con venillas tipo D, cuando estos halos se oxidan crean zonas o pequeños mantos de óxidos de cobre con trazas de calcosina en las diferentes facies feldespáticas de las areniscas, ejemplo el pórfido de Atravesado (Ver Foto 01 B). Para una buena interpretación se necesitan observaciones de las relaciones de corte.

En el pórfido de Pecoy se observaron early halos formados en rocas del basamento (gneis) que actúan como host rock de un pórfido del cretácico tardío. En este caso los early halos suelen ser más oscuros, muy biotíticos y podrían ser confundidos como bandas de biotita productos del metamorfismo del gneis (Ver Foto 01 C).



3.3 Relaciones de Corte

Entender las relaciones de corte entre los diferentes tipos de venillas de un sistema porfirítico es muy importante para poder reconocer los early halos. Los halos motivo de este estudio llevan el adjetivo “early” debido a que son una de las primeras venillas en

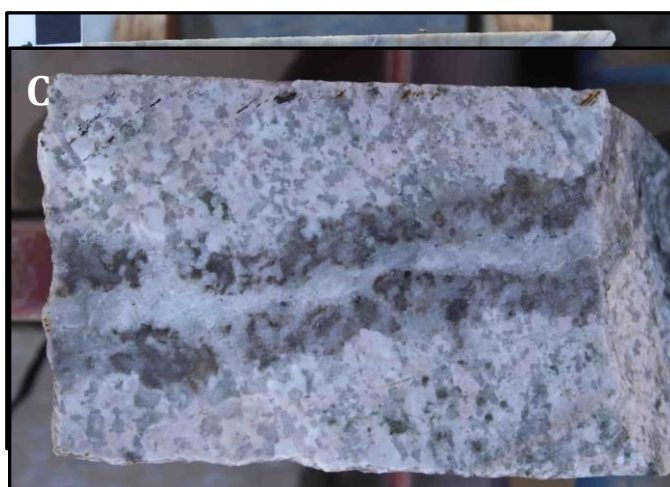


Foto 01.- A) Muestra el halo sinuoso y su borde externo con un cambio mineralógico fuerte, debido a la cantidad de biotita – muscovita – sulfuros que existe en el halo. B) Muestra un early halo cortando una arenisca feldespática. Nótese la sutura central del early halo y las venillas de cuarzo como lo están cortando. Normalmente, en este tipo de ocurrencias son confundidas como venillas tipo D. C) Se muestra el desarrollo de un early halo en un gneis, igualmente a través de su sutura central es reabierto por una venillas de cuarzo. Se observa que cargan mineralización pero se desconoce su real potencial.

formarse dentro de un sistema porfirítico y por lo tanto podrían estar cortados o reabiertos por las demás venillas que le son posteriores, ej. venillas de cuarzo tipo A y B, venillas de sulfuros tipo C, como también las venillas tipo D.

Es en este punto donde muchas veces la presencia de los early halos es subestimado debido al no entendimiento de las relaciones de corte con otras venillas. Uno de los errores más comunes es considerar a los early halos como producto de alteración de venillas de cuarzo, cuando en realidad son eventos diferentes en tiempo. En muchos casos la secuencia original es que los early halos fueron reabiertos a través de su fractura central por las venillas de cuarzo más jóvenes. Muchas veces los early halos con importantes leyes de Cu son reabierto por venillas de

cuarzo con baja ley o barren, pero debido a que lo consideran como un solo evento se subestima la presencia de los early halos y las leyes de cobre terminan siendo atribuidas a las venillas de cuarzo, creando una máscara o falsa representatividad que afecta directamente a la distribución de las leyes de cobre.

A veces en superficie debido al intemperismo no es fácil distinguir un early halo de una venilla tipo D. En este punto, se debe considerar que es muy poco probable que una venilla tipo D se encuentre cortada o reabierta por una venilla de cuarzo, ya que un sistema porfirítico de evolución normal las venillas tipo D ocurren después de las venillas de cuarzo. Una observación de campo para poder hacer una diferencia entre ambas venillas es que a menudo en los halos tempranos se puede encontrar minerales máficos conservando sus formas euhedrales (ej. Orquídeas) (Ver Foto 02 B y C) mientras que en los halos sericíticos de las venillas tipo D por lo general se destruyen los máficos.

Es importante mencionar que también se han observado venillas tipo D reabriendo las venillas tempranas (EH), formando visualmente una venilla con doble halo (ej. Elida) (Ver Foto 02 A)

Las relaciones de corte han servido de mucho cuando la morfología del early halo ha cambiado debido a la reología de la roca. Un ejemplo muy claro sucedió en el pórfido de Atravesado donde los early halos han sido formados en las areniscas feldespáticas (roca caja) y muchas veces fueron confundidas con venillas tipo D con valores anómalos de Cu, pero las relaciones de corte permitieron dilucidar este punto y entender mejor el nivel de erosión del sistema porfirítico (Ver Foto 01 B). No se ha visto muchos diques aplíticos cortando a las early halos por lo que se infiere que estas se han formado inmediatamente después de ellos.



secundaria. B) Muestra como los minerales máficos aun son preservados dentro de los early halos muscovíticos, mientras que las venillas tipo D son mas pervasivas destruyendo los máficos. C) Se muestra la ocurrencia de early halos muscovíticos cerca de la superficie. Muchas veces la oxidación de los minerales máficos que se encuentran dentro del halos enmascaran sus características, también suelen ser confundidas con venillas tipo D.

3.4 Ocurrencia

Observaciones de campo realizadas en el pórfido Copper Creek (Arizona, EEUU), permitieron entender mejor la ocurrencia de las altas leyes. Se encontró que

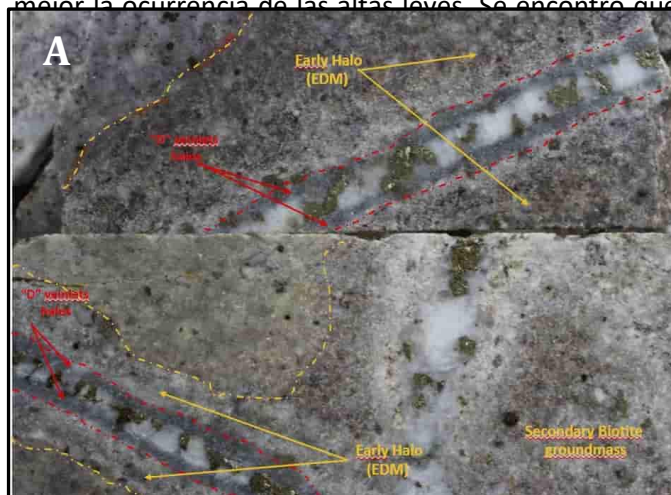


Fig. 03 B).



Estos feeders o shoots podrían haber sido zonas de fracturamiento principal por donde habrían subido los fluidos presurizados desde una cúpula batolítica. Es importante mencionar que dentro de estos feeders existen también una alta densidad de venillas de cuarzo con diferentes intensidades de sulfuros, pero la mayor cantidad de mineralización está en forma diseminada en los early halos y en la matriz de los feeders donde la calcopirita y trazas de bornita normalmente reemplazan la biotita secundaria.

En la Parte externa de estos shoots las leyes de Cu caen abruptamente a 0.8 %, lo cual confirma que los fluidos mineralizantes estuvieron confinados a estas estructuras. La presencia de una alta densidad de venillas de cuarzo sugiere que aun después de la ocurrencia de los early halos esta zona siguió siendo un sector de alta permeabilidad por donde las venillas de cuarzo en un segundo evento cortaron y reabrieron a los early halos. Igualmente, la densidad de las venillas de cuarzo cae abruptamente fuera de estos sectores.

Otra forma muy común de ocurrencia de los early halos es cuando alcanzan un arreglo tipo sheeted, donde se observa múltiples halos con espaciamientos muy similares y orientados en una sola dirección. Mientras menos sea el espaciamiento más uniforme será la ley de Cu entre ellos. Las zonas intermedias que existen entre dos early halos generalmente presentan una biotitización fuerte, con la biotita secundaria diseminada en la matriz de la roca siendo reemplazada por calcopirita y trazas de bornita. En estas zonas intermedias la presencia de muscovita – fengita decae fuertemente con respecto a los early halos.



Foto 03.- A) Muestra las estructuras verticales (feeders) del pórfido Copper Creek donde se observa una fuerte amalgamación de venillas early halos formando zonas de alta ley. Estas estructuras son relativamente más resistentes a la erosión con respecto al intrusivo que actúa como host rock. B) Muestra la amalgamación de early halos en el pórfido de Haqira. Esta foto pertenece a estructuras o zonas con alta densidad de venillas early halos con leyes que fácilmente pasan el 1% de Cu. Nótese como las venillas de cuarzo también están presentes en esta zona ya sea cortando o reabriendo los early halos.

3.5 Vectorización

Conociendo mejor la mineralogía, morfología y la forma de ocurrencia de los early halos se ha tratado de entender y proponer su modelo de disposición espacial dentro de un sistema porfirítico de Cu – Mo y como se relaciona con los shells de alta ley de Cu.

Para entender mejor la vectorización utilizamos el proyecto de Haqira Este (Perú). Cernuschi (2015) propuso una serie de shells con diferentes leyes de Cu que forman una especie de copa invertida alrededor un centro de baja ley también conocido como low grade core (LGC, Lowell and Guilbert, 1970) y similares a otros shells típicos de pórfido de cobre (ej. Bingham, Gruen. G. et al., 2010).

Las observaciones de la intensidad de venilleo (Cernuschi, 2015) muestran que inmediatamente en la parte superior y externa del low grade core es donde se



y venillas de sulfuros (cpy – bn), que al parecer enriquecen aún más las leyes que ya estaban en los early halos, alcanzando concentraciones que están por encima del 1% de Cu. Los early halos también se proyectan dentro del low grade core, pero la cantidad de halos así como también sus leyes de Cu caen drásticamente a 0.15% en promedio (Ver Fig 03). Algunas interpretaciones sugieren que el low grade core marca un límite de alta temperatura donde el ambiente fue demasiado caliente para la precipitación de Cu. Lateralmente al low grade core también es posible encontrar los shells de Cu, así como también como los early halos, pero en menor intensidad (Ver Fig 04). Lateralmente y en la parte profunda la mineralización parece estar más relacionada a una intensa biotitización pervasiva de la roca, donde la mayoría de los máficos han sido convertidos a biotita secundaria y un fracturamiento en forma una red intercomunicada de microvenillas (hairlines) de sulfuros que entran en contacto con la matriz biotitizada precipitando el cobre de forma pseudo-diseminada alcanzando leyes muy cerca del 1% de cobre.

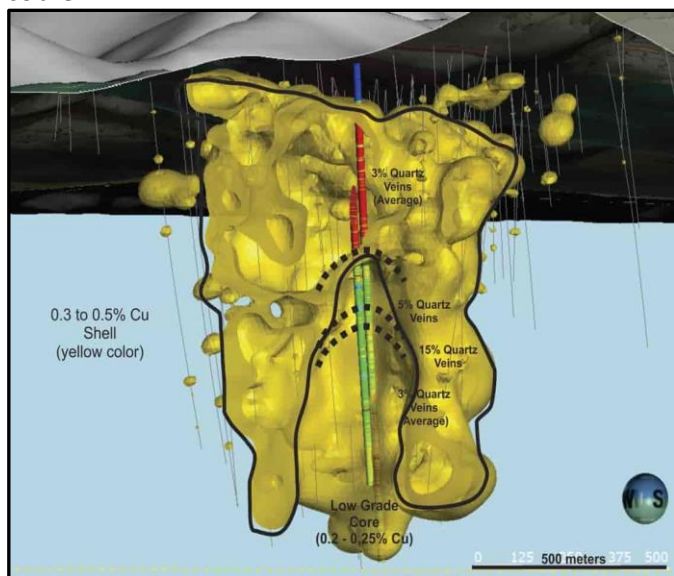
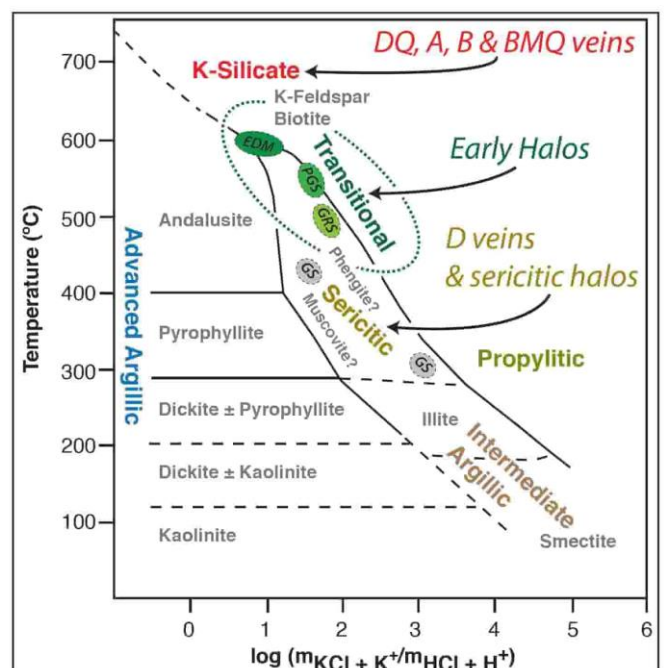


Figura 03.- Mostrando una sección del Shell de Cu de Haqira Este. Nótese la ubicación del low grade core con respecto a la zona mineralizada. El color rojo de los taladros indica zonas de alta ley relacionada a early halos, mientras que los colores verde – amarillo de los taladros nos indican leyes por debajo de 0.3% Cu dentro del low grade core.

4. Clasificación de los Early Halos

En base a todo lo explicado anteriormente y recogiendo las observaciones hechas en varios depósitos porfíricos se ha propuesto una unificación de varias terminologías usadas para los early halos que habían sido usadas en investigaciones separadas (Rusk et al., 2008, Proffett, 2009, Cernuschi, 2015, Benavides, 2017, Uribe-Mogollon and Maher, 2019). Además, de la unificación de terminologías se ha tratado de ordenar su evolución dentro de los campos de alteraciones hidrotermales que afectan a los sistemas porfíricos (Ver Fig. 05).



Proponemos que los early halos se pueden dividir en tres tipos principales (Cernuschi et al., 2019): 1) EDM (early dark micaceous), 2) PGS (pale green sericite) y 3) GRS (Green sericite), cuya mineralogía ya fue descrita líneas arriba en esta investigación. La nomenclatura obedece principalmente al color de los halos lo cual está relacionado directamente a su contenido de

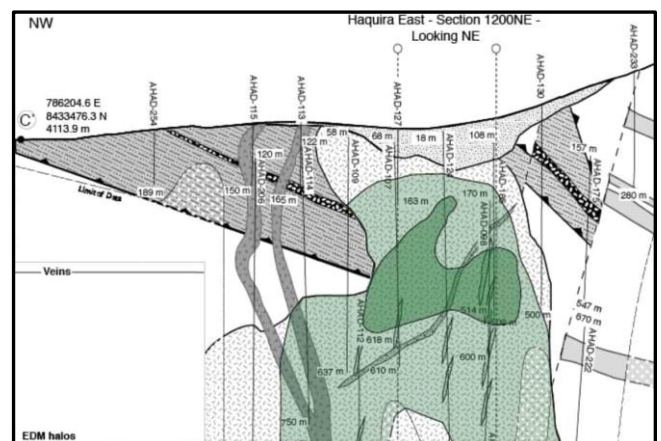


Figura 04.- Mostrando la densidad de distribución de las venillas early halos en el pórfido de Haqira Este. Nótese que la mayor densidad esta por encima del low grade core.

relativo de biotita y muscovita, aclarando que el feldespato potásico es el tercer mineral fundamental en estos halos.

En esta línea es muy importante entender que la muscovita, si bien es el mineral índice de la alteración sericitica, también se pueden encontrar en la parte profunda de los pórfidos asociadas a los early halos y coexistiendo con el cobre y la alteración potásica (Ver Fig. 05).

En todos los casos, el carácter diagnóstico de los early halos es que justamente son tempranos, y está dado por sus relaciones de corte con otras venas. En general los early halos se emplazan cercanos en el tiempo con las venas A, pero son previos a las venas de cuarzo con molibdeno y a las venas B (si estas están presentes) y siempre anteriores a las venas D y halos sericiticos.

En el pórfido de Haquira, es muy normal encontrar los halos EDM y PGS presentes en la misma área a través del depósito (Cernuschi, 2015), pero en las EDM parecen dominar las partes más profundas, mientras que a niveles menos profundos comienzan aparecer los halos PGS (Rusk et al., 2008). Es importante mencionar que la reapertura entre sí de estos mismos halos también ha sido reportada y no es raro ver un halo EDM siendo reabierto por un halo PGS.

Por otro lado, nuestras observaciones de campo han registrado que no necesariamente tienen que estar presentes todos los tipos de early halos en un sistema porfirítico, en algunas ocasiones predominan los halos EDM y apenas se tiene sectores de halos PGS, ejemplo:

Haquira, también pueden estar dominadas por halos PGS y prácticamente estar ausentes los Halos EDM. ejemplo: Pecoy, Botija, Copper Creek, Nativo. Finalmente, depósitos hospedados en rocas félsicas (bajo contenido de Fe) los early halos pueden estar dominados por GRS como es el caso de Taca Taca, Copper Cliff y Espíritu donde EDM y PGS están virtualmente ausentes.

5. Implicancia Económica

Si bien los early halos tienen un mejor desarrollo en pórfidos de origen profundo que por lo general tienen una mayor afinidad por la mineralización tipo Cu – Mo, es importante resaltar que en nuestras observaciones de campo también se han observado early halos en pórfidos Cu – Au (Quicay II), no obstante, en estos últimos la mineralización con las mejores leyes de Cu y Au están relacionadas a las venillas de cuarzo tipo A (Alpala y Espíritu). En el caso de los pórfidos Cu – Au la ocurrencia de los early halos debería ser orientada a vectorizar las zonas de más alta ley asociadas a los early porphyries (Ver Fig. 06).

Los pórfidos profundos tipo early halos adquieren mayor volumen o tonelaje cuando están relacionados a su propio batolito o un stock como su host rock (Haquira y Pecoy) creando una mineralización tipo diseminada, mientras que los pórfidos profundos emplazados en rocas sedimentarias o metamórficas podrían estar un poco más restringidos.

Figura 05.- Fases de diagramas para el sistema $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-KCl-HCl$ at $P(H_2O)=2000$ bars, con la temperatura vs $\log (mKCl + K^+/mHCl + H^+)$. Modificado de Seedorff et al., (2005). Los campos de la fengita (muscovita rica en Fe-Mg) and muscovita son hipotéticos como lo es la extensión del campo de la alteración transicional. Abreviaturas: Deep quartz(DQ), Banded Molybdenite quartz (BMQ). Early halos incluye: Early Dark Micaceous (EDM), Pale Green Sericite (PGS), Green Sericite (GRS). Sericitic halos, también llamados Gray Seicite (GS) = Venillas tipo D.



Pórfido Botija



Pórfido Nativo



Pórfido Nativo



Pórfido Chapi



Pórfido Alpala



Pórfido Espiritu



Pórfido América



Pórfido Quicav II

Figura 06.- Diferentes tipos de early halos en pórfidos Cu - Mo y Cu - Au

potenciales

No obstante, todo no acaba allí, porque la composición del batolito o del stock donde se ha emplazado el pórfido tipo early halo juega un papel muy importante en el desarrollo de las leyes. Sistemas porfiríticos asociados a rocas no tan diferenciadas con alto contenido de máficos pueden crear grandes zonas de biotitización (ricas en Fe) muy favorables para captar los fluidos ricos en Cu - S y precipitar sulfuros de Cu (calcopirita, bornita) creando zonas de alta ley (>1% Cu). En este tipo de sistemas en donde se ha visto un mejor desarrollo de las venillas tipo EDM. Al parecer cuando los sistemas porfiríticos son más diferenciados las venillas EDM podrían estar presentes en pequeñas zonas, pero ya no predominan, siendo los halos más muscovíticos tipo PGS - GRS o viceversa los que ahora dominan en el sistema. En este caso los halos no son tan receptivos formando zonas minerales con leyes muy variables que van desde 0.3% a 0.6% Cu, con algunos pequeños feeders muy anómalos (ej. Pecoy) (Ver Fig. 07).

El nivel de erosión de este tipo de pórfidos también juega un papel importante (Ver Fig. 08), debido a que algunos sistemas porfiríticos tipo early halos están erosionados al nivel del low grade core (LGC), creando un núcleo de baja ley, que podría estar enriquecido por los procesos supérgenos que afectan las zonas alrededor del LGC, dándole otro potencial al sistema porfirítico que podría haber perdido tonelaje, pero han ganado una concentración de zonas de alta ley debido a los procesos de enriquecimiento. Estas zonas de enriquecimiento no solo están sujetas al pórfido mineralizado, sino también a la roca caja cuando esta es receptiva (areniscas feldespáticas) (ej. Chapi y Nativo)

Entonces, en retrospectiva, la identificación y evaluación de los diferentes tipos de early halos (EDM - PGS - GRS), conjugado con la roca hospedante y el nivel de erosión darían una idea de los diferentes

que tendría el sistema y de esta manera pueden crear un modelo conceptual de exploración con el cual pueden diseñar sus targets y taladros.

Simplified cross-section of eroded porphyry system (IMPLICATIONS)

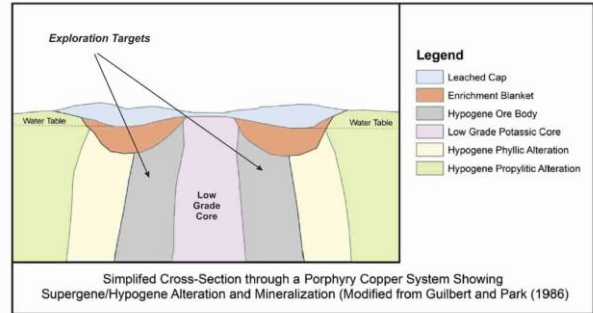


Figura 08.- Mostrando las zonas de mineralización de un sistema porfirítico erosionado al nivel del low grade core. Se muestra los targets de exploración por early halos.

6. Conclusiones

Nuestras observaciones de campo realizadas en varios depósitos porfiríticos, así como la recopilación de investigaciones previas, nos llevaron a definir tres tipos de early halos: EDM - PGS - GRS, los cuales generalmente se encuentran asociados a depósitos porfiríticos profundos con afinidad hacia el Cu - Mo.

Nuestras observaciones de campo se inclinan por la idea de que toda esta familia de early halos tienen un origen magmático profundo que fue cambiando conforme ascendía a la superficie. No hemos visto evidencias de corte entre estos tipos de venillas como para asociar algunas a una alteración fílica.

Pensamos que los diferentes tipos de early halos no solo obedecen a un proceso evolutivo, sino también a la química del host rock que recibe los fluidos magmáticos - hidrotermales que forman los early halos. Por este motivo no es necesario encontrar todos los tipos de early halos en cada depósito porfirítico.

La distribución y los tipos de early halos tienen una implicancia en el potencial económico del pórfido. Los Halos tipo EDM podrían ser más susceptibles a hospedar altas leyes de Cu (>1%Cu).

Esperamos que este documento sirva como una guía para aquellos geólogos de exploraciones que buscan más evidencias de campo y los invitamos a que con su diversa experiencia sigan desarrollando estos conceptos.

Referencias

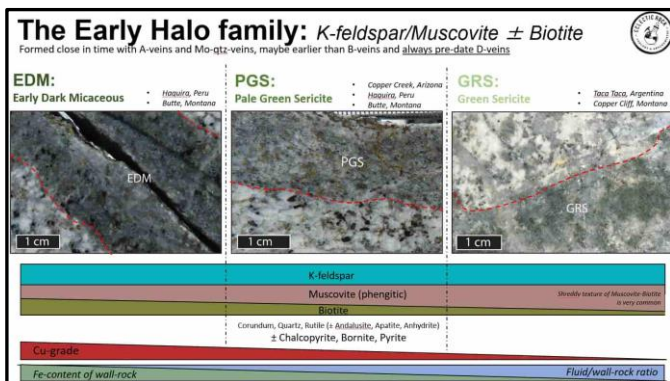


Figura 07.- Mostrando la clasificación de los early halos con algunas de sus características mineralógicas y su posible relación con las leyes de Cu. (Cernuschi, F. et al., 2021).

- Atkinson, W.W., Souviron, A., Vehrs, T.I., and Faunes G.A., 1996, Geology and mineral zoning of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile: Society of Economic Geologists Special Publication, v. 5, p. 131–156.
- Benavides, S., 2017, Characterisation of sericitic alteration at the Taca Taca Bajo porphyry Cu deposit, Argentina: Unpub. MS Thesis, CODES, University of Tasmania, 162 pp.
- Cernuschi, F., Dilles, J.H., and Creaser, R., 2013, Hydrothermal alteration, SWIR–mineral mapping, vein distribution and age of the Haquira–East Cu–Mo porphyry: 12th SGA Biennial Meeting 2013, Proceedings, v. 2, p. 782–785.
- Cernuschi, F., 2015, The Geology and Geochemistry of the Haquira East Porphyry Deposit of Southern Peru: Insights On the Timing, Temperature and Lifespan of the Magmatic- Hydrothermal Alteration and Mineralization. Unpublished Ph.D. Dissertation, Corvallis, United States, Oregon State University.
- Cernuschi, F., Rivera, R., Dilles, J. H., Benavides, S. and Kouzmanov, K., 2019, Mineralogical variations in early halo alteration selvages of porphyry deposits from North and South America: Abstract, Society of Economic Geologist Conference, October 7th to 10th, Santiago de Chile.
- Cernuschi, F. et al., 2021 Mineralogical diversity of early halos porphyry copper deposits: implications for exploration. Presentation for Ore Deposits Hub: <https://youtu.be/fqbDyxcyNuk>
- Gruen G., Christop, H., and Kim, S., 2010, The Bingham Canyon Porphyry Cu – Mo – Au deposit. II. Vein geometry and ore shell formation by pressure-driven rock extension: *Economic Geology*, 105. 69-90.
- Lowell, J.D., and Guilbert, J.M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits: *Economic Geology*, v. 65, p. 373–408
- Mercer, C. N., and Reed, M. H., 2013, Porphyry Cu-Mo stockwork formation by dynamic, transient hydrothermal pulses: Mineralogic insights from the deposit at Butte, Montana. *ECONOMIC GEOLOGY*, v. 108 (no. 6), 1347–1377.
- Meyer, C., 1965, An early potassic type of wall rock alteration at Butte, Montana: *American Mineralogist*, v. 50, p. 1717-1722.
- Reed, M., Rusk, B., and Palandri, J., 2013, The Butte Magmatic-Hydrothermal System: One Fluid Yields All Alteration and Veins: *Economic Geology* 2013; 108 (6): 1379–1396.
- Proffett, J.M., 2009, High Cu grades in porphyry Cu deposits and their relationship to emplacement depth of magmatic sources: *Geology*, v. 37, no. 8, p. 675-678.
- Proffett J.M., 2012, Notes on a visit to the Copper Creek district, Arizona. Unpublished.
- Rusk, B., Reed, M., and Dilles, J., 2008, Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana: *Economic Geology*, v. 103, p. 307–334.
- Uribe-Mogollon, C., and Maher, K., 2018, White mica geochemistry of the Copper Cliff porphyry Cu deposit: Insights from a vectoring tool applied to exploration: *Economic Geology*, v. 113, p. 1269–1295.

Perfil profesional

19 años de experiencia profesional en el rubro minero, actualmente trabaja para First Quantum Minerals como geólogo principal para Sudamérica. Grado de MSc. en Recursos Renovables con la Universidad Politécnica de Madrid y cursos de Senior Exploration Management con la SEG. Estuvo 8 años en el servicio geológico del Perú varios de los cuales fueron en el área de metalogenia con énfasis en depósitos porfiríticos. Co-autor del mapa metalogénico del Perú.

Nombre del autor: Raymond Rivera Cornejo

Cargo: Geólogo Principal

Empresa: First Quantum Minerals

Correo electrónico: rayrc77@hotmail.com /
raymond.rivera@fgml.com

Teléfono / Celular: +51 992776170

Dirección: Av. Benavides 1579, Miraflores, Lima.

Perfil profesional

Geólogo consultor, basado en Uruguay con más de 15 años de experiencia en exploración mineral. Realizó una maestría y un doctorado en la Oregon State University y se especializa en geoquímica y petrología de depósitos minerales magmáticos y magmático-hidrotermales, con especial interés en pórfidos de cobre.

Nombre del coautor: Federico Cernuschi

Cargo: Geólogo Consultor

Empresa: -----

Correo electrónico: fede@eclectic-rock.com

Teléfono / Celular: +59 91440977

Dirección: Punta Ballena, Uruguay.