

## **GEOLOGIA, ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN DEL PÓRFIDO DE COBRE - MOLIBDENO JUNÍN, PROVINCIA DE IMBABURA, ECUADOR.**

*Patricio Salazar Jácome (1) & Bernardo Beate (2)*

(1) ZAMIN RESOURCES, Uruguay

(2) Departamento de Geología, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. [bbeate@uio.satnet.net](mailto:bbeate@uio.satnet.net)

### **RESUMEN**

El yacimiento porfídico de cobre—molibdeno JUNÍN, con recursos inferidos de 1359 Mt @ 0.73% de Cu y 0.03% de Mo (Ascendant Copper S.A, 2008), se ubica en la Cordillera Occidental, aproximadamente 50km al NNW de Quito, Ecuador. Este yacimiento tiene como caja el batolito granodiorítico-biotítico de Apuela (intrusivo tipo I), de edad Mioceno Temprano a Medio ( $16.5 \pm 1.1$  Ma, Boland et al. 2000;  $14.5 \pm 0.2$  Ma, Jica 1992). Este batolito (60 km de largo y 10-20 km de ancho) ocupa un área de 750 km<sup>2</sup>, y se caracteriza por tener una forma alargada en dirección N-S. Intruye las unidades cretácicas Mulaute (secuencias marinas, brechas, arenisca, limolitas y lutitas), y Pilatón (conglomerados volcanoclásticos, brechas, areniscas, limolitas y cherts) al Este y la unidad cretácica Naranjal (secuencia de basaltos en almohadillas, lavas basálticas a andesíticas y brechas) al Oeste. El Cuaternario cubre parcialmente el batolito hacia el Este, Sur y Sureste, principalmente en los valles de los ríos Intag y Guayllabamba y consiste de coluviales locales, tefras distales de los volcanes Pichincha, y Pululahua y terrazas aluviales, lahares y avalanchas de escombros retrabajadas de los volcanes Mojanda y Cotacachi. Pórfidos de composición dacítica (5.81 y 7.88 Ma, PRODEMINCA, 2000;  $6.13 \pm 0.03$  Ma y  $6.63 \pm 0.04$  Ma, Schütte, 2010) intruyen al batolito de Apuela. Estos pórfidos son los responsables de la alteración y mineralización en el yacimiento de Junín. Su emplazamiento tiene un control estructural e intruyen la caja de batolito Apuela desde el Sureste con ángulos de 35° a 60°. La mineralización económica está asociada a sulfuros hipógenos de cobre (bornita, calcopirita) y sulfuros de molibdeno (molibdenita). Dichos sulfuros se encuentran mayormente en zonas de “stockwork” de vetillas. Las vetillas son: a) de Tipo T4: cuarzo, bornita, calcopirita, molibdenita,  $\pm$ especularita  $\pm$ pirita; b) Tipo A: cuarzo,  $\pm$ bornita,  $\pm$ calcopirita,  $\pm$ molibdenita; c) Tipo B: cuarzo, molibdenita, calcopirita  $\pm$ pirita; y d) Tipo D: cuarzo, pirita,  $\pm$ calcopirita,  $\pm$ molibdenita,  $\pm$ bornita  $\pm$ especularita,  $\pm$ turmalina  $\pm$ limonitas. Asociadas a zonas de oxidación parcial, la calcosina y la covelina generan un débil enriquecimiento secundario.

Se han identificado cuatro ensambles o asociaciones de alteración: argílica, filica, potásica y propilítica. Las alteraciones potásica, potásica con “overprinting” filica y la filica están relacionadas con la mineralización de cobre y molibdeno. Estas alteraciones están bordeadas por un halo de alteración propilítica que no aporta mineralización económica al sistema. Cuatro eventos magmático-hidrotermales se han descrito en la evolución del yacimiento: a) evento temprano

(alteración potásica, propilítica, vetillas tipo EB-biotita temprana, vetillas de ortoclasa, tipo T4, tipo A y sulfuros hipógenos); b) evento transicional (vetillas tipo B y alteración potásica con sobreimposición de alteración filica); c) evento tardío (alteración filica y vetillas tipo D); y d) evento post-mineral, que son pórfidos dacíticos de grano medio a grueso que están afectados por minerales de asociación propilítica y cortados por vetillas de epidota y calcita). El pórfido de cobre-molibdeno Junín es un prospecto de clase mundial, que está parcialmente explorado, y por lo tanto necesita más trabajos exploración, principalmente se debe continuar con las perforaciones a diamantina para evaluar la factibilidad económica del mismo.

**Palabras claves:** Junín – Imbabura, Cordillera Occidental, batolito de Apuela, pórfido cuprífero, mineralización hipogénica, alteración hidrotermal, evolución magmático – hidrotermal, secuencia de vetilleo EB, T4, A, B, y D.

### ABSTRACT

The JUNIN porphyry copper-molybdenum deposit, with 1.359 Mt inferred resources of 0.73% of Cu and 0.03% of Mo (Ascendant Copper S.A., 2008), is located in the thickly forested upper hillsides of the Cordillera Occidental, approximately 50km to the NNW of Quito, the capital city of Ecuador.

This deposit is hosted in the I-type biotite-granodiorite Apuela batholith, of calc-alkaline affinity, which has an Early-Mid Miocene age ( $16.5 \pm 1.1$  Ma; Boland et al. 2000). The Apuela batholith reaches 60 Km in NS direction and is 10-20 Km wide (EW), occupying an area of 750 Km<sup>2</sup>. It intrudes the Cretaceous Mulaute Unit (marine sequences, breccias, sandstones, mudstones and siltstones) and Pilaton Unit (volcaniclastic conglomerates, breccias, sandstones, mudstones and cherts) to the East and the Cretaceous Naranjal Unit (sequence of pillow basalts, basaltic to andesitic lavas and breccias) to the West. Plio-Quaternary deposits as colluvial fans, distal tephra of Pichincha and Pululahua volcanoes, as well as thick volcanic avalanche deposits from Mojanda and Cotacachi volcanoes and recent alluvial terraces along the main valleys partially cover the Apuela batholith. Late Miocene dacitic porphyries (5.81 y 7.88Ma, PRODEMİNCA. 2000) intrude the Apuela batholith. They are responsible for the alteration and mineralization observed in the Junín Cu-Mo deposit. Its location has a structural control and they intrude the batholith from the southeast with 35° to 60° angles. The economic mineralization is associated with hypogene sulphides of copper (bornite, chalcopyrite) and molybdenum (molybdenite). These sulfides are mainly associated with stockwork rich zones. Observed veinlets are of several types: a) T4 Type quartz, bornite, chalcopyrite, molybdenite,  $\pm$  specularite,  $\pm$ pyrite. b) Type A: quartz,  $\pm$  bornite  $\pm$  chalcopyrite,  $\pm$  molybdenite. c) Type B: quartz, molybdenite, chalcopyrite,  $\pm$  pyrite. d) Type D: quartz, pyrite,  $\pm$ chalcopyrite,  $\pm$  molybdenite,  $\pm$  especularite,  $\pm$  tourmaline,  $\pm$  bornite,  $\pm$  limonite. Associated to

zones of partial oxidation, chalcocite and covellite generate a weak secondary enrichment. Four alteration assemblages have been identified: argillic, potassic, phyllic and propylitic. The potassic, potassic with phyllic overprinting and the phyllic alteration are related to the copper and molybdenum mineralization. These alteration zones are surrounded by a halo of propylitic alteration, which does not contribute any economic mineralization to the JUNIN system. Four magmatic-hydrothermal events have been described in the evolution of the JUNIN deposit: a) an early event with potassic and propylitic alteration, and (biotite) EB- orthoclase-type, T4 and type A veinlets and hypogene sulphides, b) a transitional event as B type veinlets and potassic alteration with overprinting of phyllic alteration, c) a later event as phyllic alteration and D type veinlets; d) the post-mineral event as dacitic, mid- to coarse grained porphyries, affected by pervasive propylitic alteration and cut by epidote and calcite veinlets. The Junín Cu-Mo porphyry type deposit is a partially explored, world class mineral prospect, which needs more exploration efforts, mainly systematic appraisal drilling to be fully assessed.

**Palabras claves:** Junín – Imbabura, Cordillera Occidental, Apuela batholith, porphyry copper deposit, hypogene mineralization, hidrothermal alteration, magmatic – hidrothermal evolution, secuencia de veinlets EB, T4, A, B and D.

## INTRODUCCIÓN

Siendo los yacimientos porfídicos de gran importancia económica para el desarrollo de nuestro país, el estudio y análisis de estos depósitos debería ser considerado seriamente.

Con el objetivo de mejorar el conocimiento geológico acerca de la evolución de estos yacimientos, el presente trabajo enfoca la investigación sobre uno de los yacimientos de cobre- molibdeno conocidos más importantes del Ecuador.

El área de estudio corresponde al yacimiento porfídico de cobre-molibdeno JUNÍN que está ubicado en la Cordillera Occidental, aproximadamente 50km al NNW de Quito. Muy cerca de Junín se encuentran depósitos

mesotermes y epitermales (El Corazón, Pacto), al igual que depósitos no metálicos (Selva Alegre, mármol), actualmente en explotación para elaboración de cemento (Cia. Lafarge). Se considera a esta zona del país de alto interés mineralógico (Distrito Imbaoste Prodeminca, 2000).

Junín ha sido investigado por la DGGM (1981-1982), la Misión Belga (1984-1985), la Misión Japonesa-JICA/MMAJ (1991-1997), Boland et al. (2000), por PRODEMINCA (2000) y por Schütte (2010), existiendo así una base de datos amplia. Además, en años anteriores, la compañía canadiense Ascendant Copper S.A. aplicó para concesionar Junín; su estimado del recurso fue 1359 Mt @ 0.73%Cu y 0.03%Mo.

El primer estudio sistemático de la zona noroeste del yacimiento de Junín fue una investigación geoquímica regional de la DGGM que se realizó en los años 1981 y 1982. En 1984 y 1985 se realizaron investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas en un proyecto de cooperación con Bélgica. Entre 1991 hasta 1997 el área de Junín fue estudiada mediante un proyecto de cooperación de exploración minera acordada entre los gobiernos de Ecuador y Japón. Se realizaron trabajos de exploración geológica que incluyeron geoquímica de sedimentos y rocas, mapeo geológico de superficie, geofísica y perforaciones a diamantina. Boland et al. (2000) caracterizan al prospecto Junín como un sistema porfídico de cobre-molibdeno hospedado en del batolito de Apuela. Este batolito tiene 60km de largo y 10-20km de ancho, ocupando un área de 750 km<sup>2</sup>. Al batolito de Apuela se lo ha datado como Mioceno Temprano a Medio ( $16.5 \pm 1.1$  Ma) y está caracterizado por una cuarzodiorita/tonalita con hornblenda y biotita de grano medio a grueso como su principal litología; es un intrusivo tipo I. El trabajo de PRODEMİNCA (2000) se basa en la recopilación de datos existentes en los informes de la JICA/MMAJ, en la descripción de los sondajes MJJ30, MJJ22 y MJJ4 y en resultados obtenidos a partir de medidas por PIMA en los sondajes MJJ30 y MJJ22. Con los resultados obtenidos a partir de PIMA se establecieron la correlación de minerales de arcilla con los varios tipos de alteración hidrotermal existente. Se describe al pórfido Co-Mo de Junín como un depósito de origen convectivo: 95% meteórico, fluidos de baja

salinidad y 250 a 454°C; está enmarcado en la clasificación de sistemas de pórfido tipo plutónico ubicado en el distrito Imbaoeste, productor de cobre-molibdeno y encajado en el terreno alóctono Pallatanga. La edad de algunos pórfidos fue definida entre 5.81 y 7.88Ma (Mioceno Tardío, PRODEMİNCA 2000). Schütte (2010) ha obtenido edades de  $6.13 \pm 0.03$ Ma y  $6.63 \pm 0.04$ Ma para la mineralización en las facies fílica-potásica de los pórfidos mineralizantes utilizando el método radiométrico Re-Os en molibdenita; estos datos concuerdan con los obtenidos por Prodemınca (2000).

La importancia del presente trabajo radica en el estudio detallado de las facies magmáticas que ocurren en Junín, y el entendimiento de la alteración y la mineralización presentes en ellas, principalmente desde el punto de vista petrográfico. La integración de la información acerca de las facies magmáticas, asociaciones de alteración, tipos de mineralización y vetillas en el pórfido, contribuirán con la elaboración de un modelo geológico para el yacimiento, que describirá su evolución magmática-hidrotermal.

## **GEOLOGÍA REGIONAL**

El prospecto porfídico de Cu-Mo Junín se encuentra en la Cordillera Occidental (ver Figura 1) y forma parte del distrito minero Imbaoeste. Este distrito está situado en el terreno Pallatanga, al Norte de 1°00'S y entre las fallas regionales Toachi-Huayrapungu (Oeste) y Pujili (Este) (Litherland y Aspden, 1992).

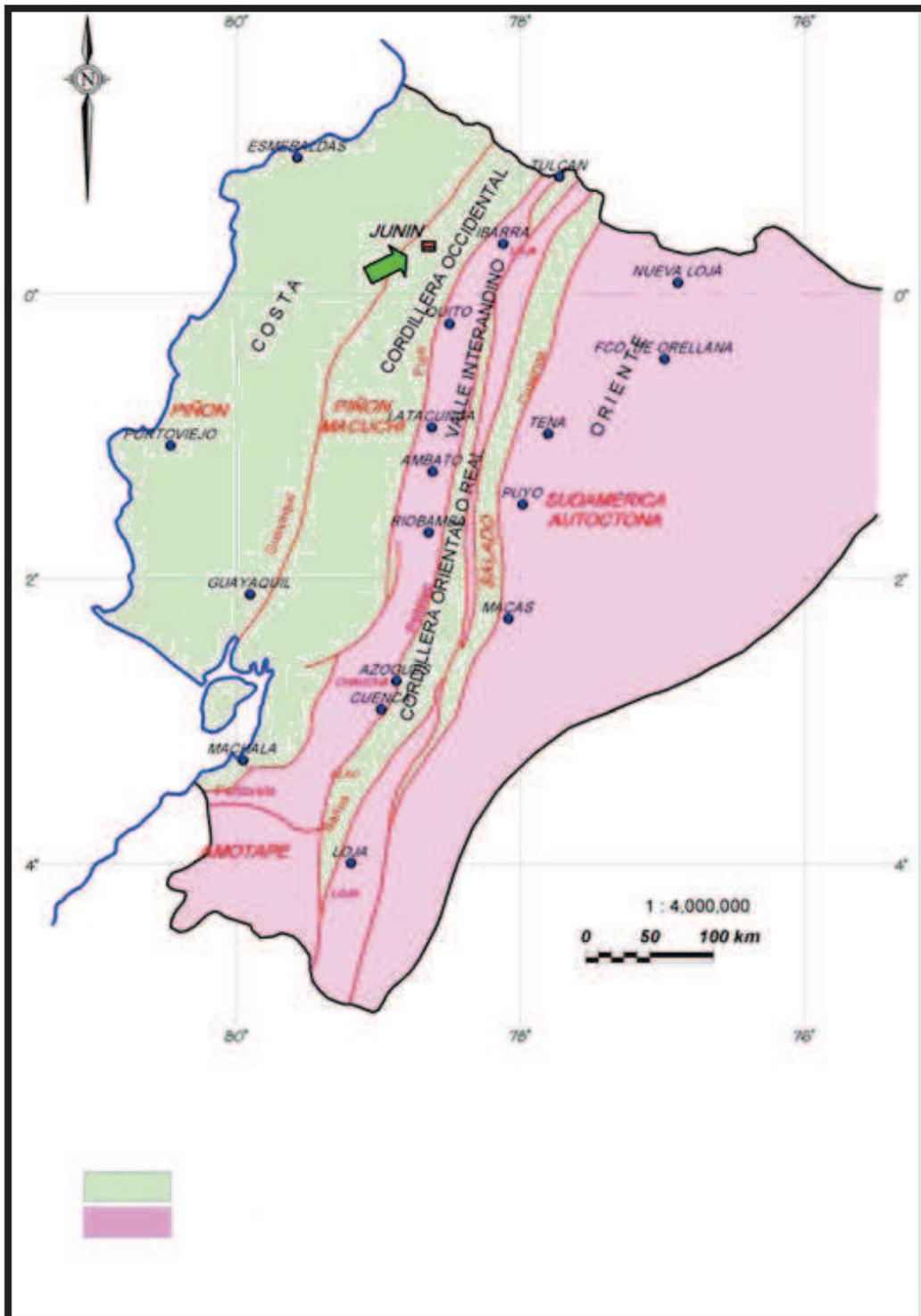


Figura 1. Ubicación del Proyecto Junín en la Cordillera Occidental en el Mapa de los terrenos provisionales del Ecuador, tomado de Litherland, et al., 1994).

En el distrito Imbaoeste el terreno Pallatanga muestra un cambio de facies, con dos unidades predominantemente sedimentarias adicionales de edad cretácica. La Unidad Pilatón está constituida por una secuencia turbidítica de abanico submarino, con material indicativo de una fuente volcánica efusiva de composición básica a intermedia. La Unidad Mulaute comprende una secuencia volcanosedimentaria ubicada entre la Unidad Pilatón y la Falla Toachi-Toacazo (Hughes y Bermúdez, 1997).

El batolito Apuela-Nanegal está emplazado dentro de la Unidad Mulaute. El conjunto intrusivo varía de composición entre diorita y cuarzomonzonita, pero está compuesto principalmente de granodiorita-cuarzodiorita y tiene una edad Mioceno Medio-Superior (PRODEMİNCA, 2000; JICA, 1992). La mineralización de Cu-Mo se aloja en este batolito.

### **PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS FACIES MAGMÁTICAS.**

El estudio petrográfico y geoquímico de las facies magmáticas en el yacimiento de Junín se efectuó en este trabajo a partir del relevo de 3110.36m a escala 1:100 y del estudio petrográfico de 49 láminas delgadas, de las cuales 22 son muestras de la roca de caja y 19 son muestras de las intrusiones porfídicas. Los resultados se plotearon en el diagrama QAP según Streckeisen (1976); ver figuras 2a, 2b y 3. Se ha determinado dos grupos magmáticos: el primero caracteriza al batolito de Apuela ( $16.5 \pm 1.1$  Ma, Boland et al. 20010) y el segundo hace referencia a los

porfidos (5.81 y 7.88Ma PRODEMİNCA. 2000).

El batolito de Apuela (roca de caja) está constituido principalmente por una granodiorita de biotita. Varias facies litológicas como tonalitas, cuarzomonzonitas, rocas melanocráticas, cuarzodioritas y monzogranitos, están asociados al batolito y se presentan como pequeñas intrusiones.

Los porfidos que intruyen al batolito de Apuela son de composición dacítica, aunque varias muestras porfídicas caen en el campo andesítico y riódacítico. Los porfidos presentan dos facies litológicas: porfidos de grano medio a grueso, dominados por cuarzo-feldespatos y feldespatos-cuarzo y una facies de grano fino con escaso cuarzo que intruye a los porfidos de grano medio a grueso. Los porfidos están controlados estructuralmente e inclinados de  $35^\circ$  a  $60^\circ$  con respecto a la horizontal y están intruyendo al batolito de Apuela desde el Sureste.

El estudio geoquímico se lo hizo por los métodos de XRF para elementos mayores y ICP-MS para elementos traza. Este estudio tuvo como objetivo verificar la composición de los porfidos presentes en el yacimiento. Se recolectaron 11 muestras, 5 de la roca de caja y 6 (ver Tabla 1) de los porfidos dacíticos. Los resultados geoquímicos de las 11 muestras de Junín fueron ploteados en los diagramas de Peccerillo y Taylor (1976) (ver figura 4) y Winchester y Floyd (1977) (ver figura 5) con el propósito de obtener la composición para cada una de las muestras.

Tabla 1. Análisis Químicos de Elementos Mayores y Trazas de las Muestras de Junín.

MUESTRA	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	Total	Be	S	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Cu	Zn	Ga
MJJ30-502.55	71,42	0,23	16,76	1,36	0,00	0,53	0,17	3,49	5,94	0,09	100,00	1,55	1025	2,4	129	31	1,2	1,1	3536	2410	32	17
MJJ30-572.5	67,25	0,67	16,28	3,35	0,02	2,50	0,21	1,81	7,79	0,13	100,00		1290		112	24			3864		89	17
MJJ30-587.4	65,62	0,60	17,07	5,58	0,05	2,94	1,25	2,74	3,94	0,21	100,00		459		128	12			346		126	21
MJJ27-205.1	71,47	0,24	16,17	1,77	0,02	0,77	0,73	5,77	2,95	0,10	100,00	1,89	22	4,1	125	128	2,8	4,1	357	549	93	20
MJJ27-199.8	70,67	0,41	15,11	3,89	0,02	1,61	1,70	3,10	3,39	0,10	100,00		<3<		84	18			176		28	14
MJJ29-71	71,38	0,23	17,24	2,43	0,01	0,85	0,21	4,13	3,50	0,02	100,00		5		37	7			370		28	18
MJJ29-137	71,69	0,24	16,20	2,12	0,02	0,73	0,46	5,68	2,78	0,09	100,00	1,53	938	3,8	43	6	5,4	4,7	291	244	29	18
MJJ29-447	71,57	0,20	17,35	1,96	0,00	0,66	0,10	2,85	5,24	0,06	100,00		568		50	3			775		12	20
MJJ6-90	68,56	0,41	15,64	4,39	0,04	1,70	3,08	3,54	2,54	0,10	100,00		12		87	22			12		29	15
MJJ29-526	69,64	0,33	16,56	2,97	0,02	1,17	0,40	4,74	4,05	0,12	100,00	1,90	458	4,0	56	5	5,3	5,7	617	484	86	18
MJJ29-587	55,47	1,12	18,70	8,69	0,06	7,79	0,31	0,42	7,26	0,11	99,94		295		241	335			1515		64	21

MUESTRA	As	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb	Mo	Ag	Sb	Ta	W	La	Ce	Pr	Sr	Nd	Sm	Zr	Hf	Eu	Gd
MJJ30-502.55	3	0,33	4,4	110	0,33	0,44	3,0	61	0,41	0,29	0,06	8,70	1,8	3,7	0,47	279	2,2	0,4	62	1,30	0,13	0,37
MJJ30-572.5	3		11,4	463			3,6									308			71			
MJJ30-587.4	3		25,9	715			2,6									578			118			
MJJ27-205.1	3	1,23	30,7	684	0,79	0,60	2,9	4,8	0,51	0,33	0,11	3,69	5,1	11	1,37	586	6,0	1,3	119	1,56	0,32	1,00
MJJ27-199.8	3		61,8	524			3,9									246			122			
MJJ29-71	19		63,2	715			2,0									210			64			
MJJ29-137	18	0,61	43,0	557	0,74	0,48	1,9	0,95	0,12	0,46	0,10	5,54	5,7	12	1,47	298	6,2	0,92	72	1,61	0,43	1,00
MJJ29-447	5		70,6	450			1,2									87			57			
MJJ6-90	4		61,8	491			3,5									289			110			
MJJ29-526	6	1,66	56,4	645	0,86	0,78	2,0	1,7	0,29	1,35	0,08	5,11	6,9	13	1,67	218	6,9	1,4	73	1,56	0,53	0,99
MJJ29-587	3		139,0	172			4,8									25			44			

MUESTRA	Dy	Ho	Er	Tb	Y	Tm	Yb	Lu	Pb
MJJ30-502.55	0,40	0,07	0,16	0,04	4,5	0,03	0,17	0,03	3
MJJ30-572.5									4
MJJ30-587.4									9
MJJ27-205.1	0,63	0,11	0,35	0,12	4,1	0,05	0,34	0,05	9
MJJ27-199.8									2
MJJ29-71									2
MJJ29-137	0,64	0,11	0,30	0,10	3,5	0,04	0,41	0,04	3
MJJ29-447									2
MJJ6-90									4
MJJ29-526	0,63	0,12	0,33	0,14	4,9	0,04	0,24	0,06	2
MJJ29-587									2

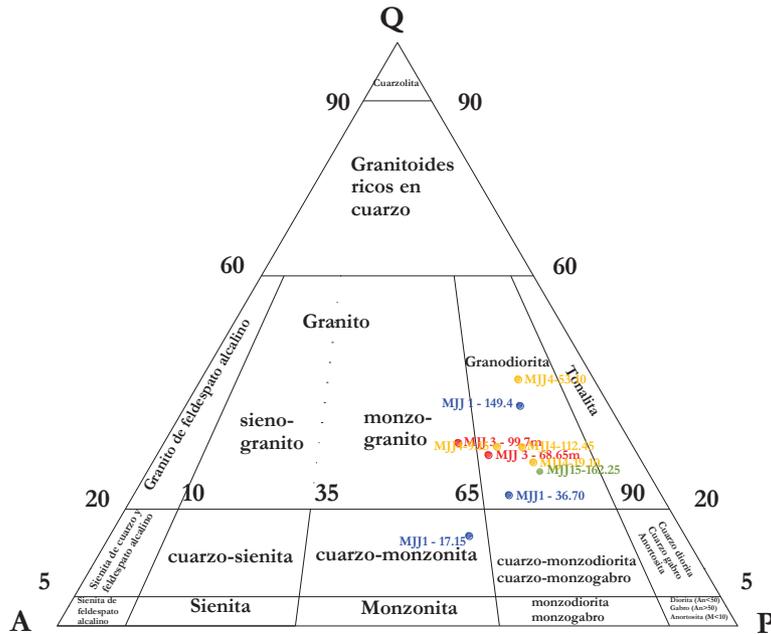


Figura 2a. Ploteo de las muestras pertenecientes al batolito de Apuela en el diagrama QAP (Streckeisen, 1976). MJJ1- 17.15 representa el número de sondaje y profundidad en metros de la muestra; los colores son utilizados para diferenciar los sondajes escogidos para el muestreo.

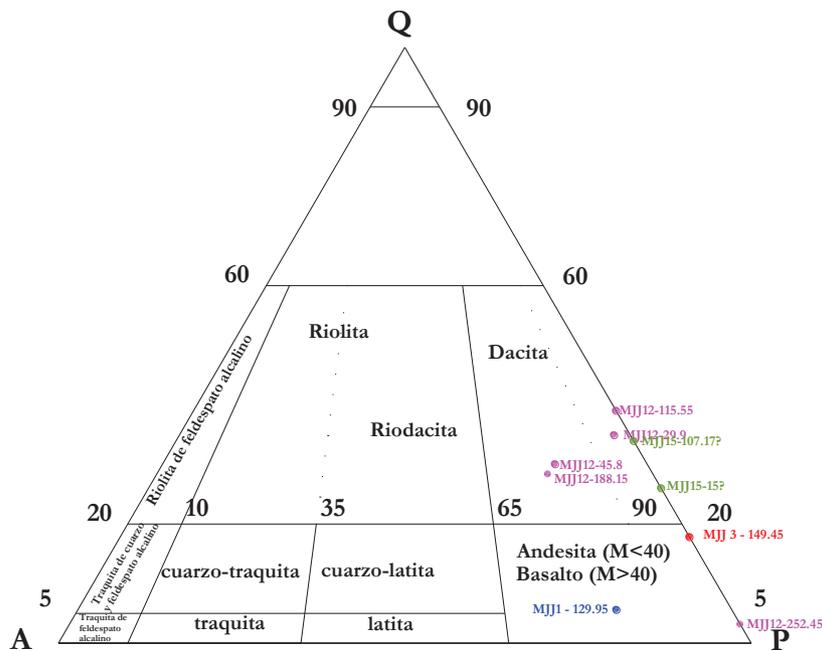


Figura 2b. Ploteo de las muestras pertenecientes al batolito de Apuela en el diagrama QAP (Streckeisen, 1976) para MJJ7- 22.5.

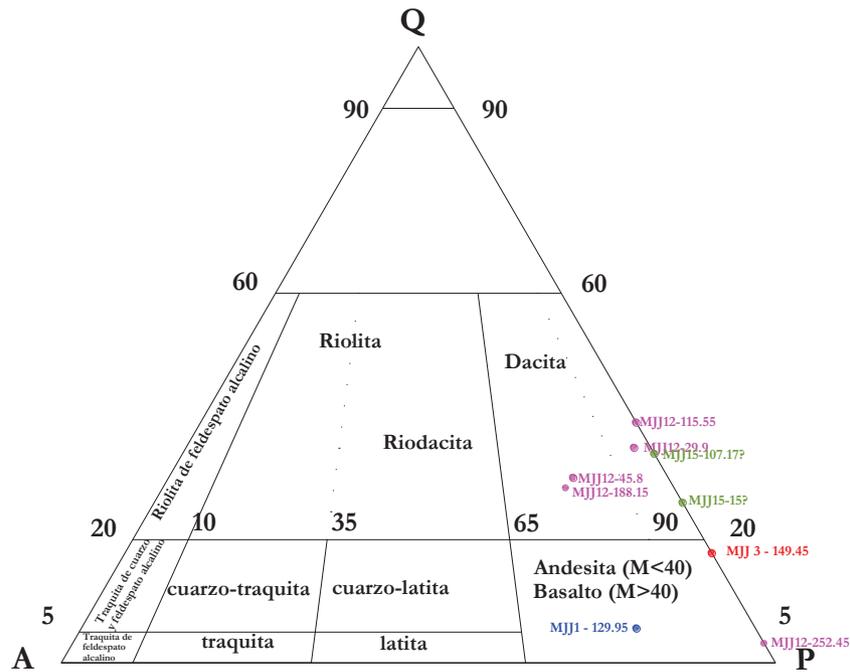


Figura 3. Ploteo de las muestras pertenecientes a los pórfidos de Junín en el diagrama QAP (Streckeisen, 1976) para MJJ1-129.95.

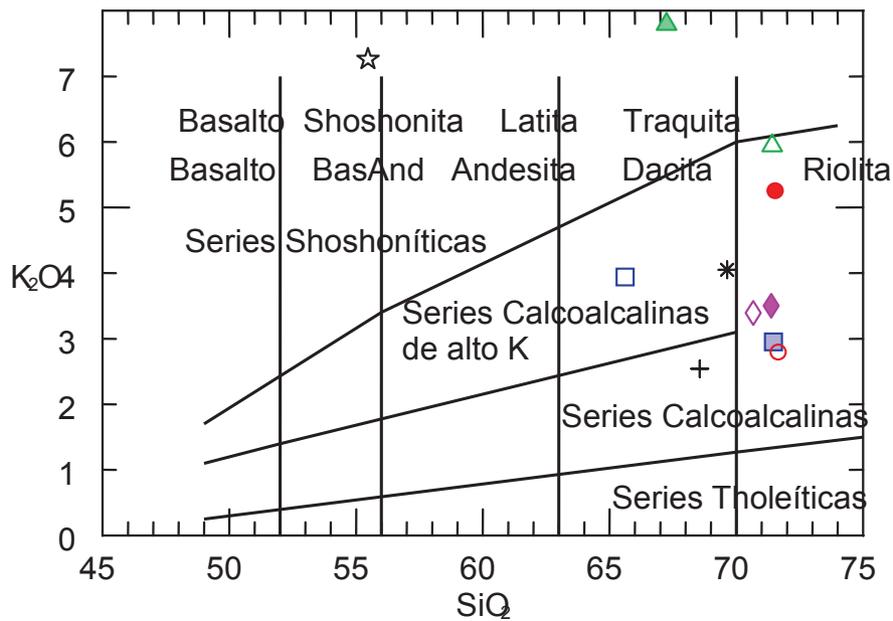


Figura 4. Ploteo de las muestras de Junín utilizando el diagrama de Peccerillo y Taylor (1976) para clasificación de rocas.



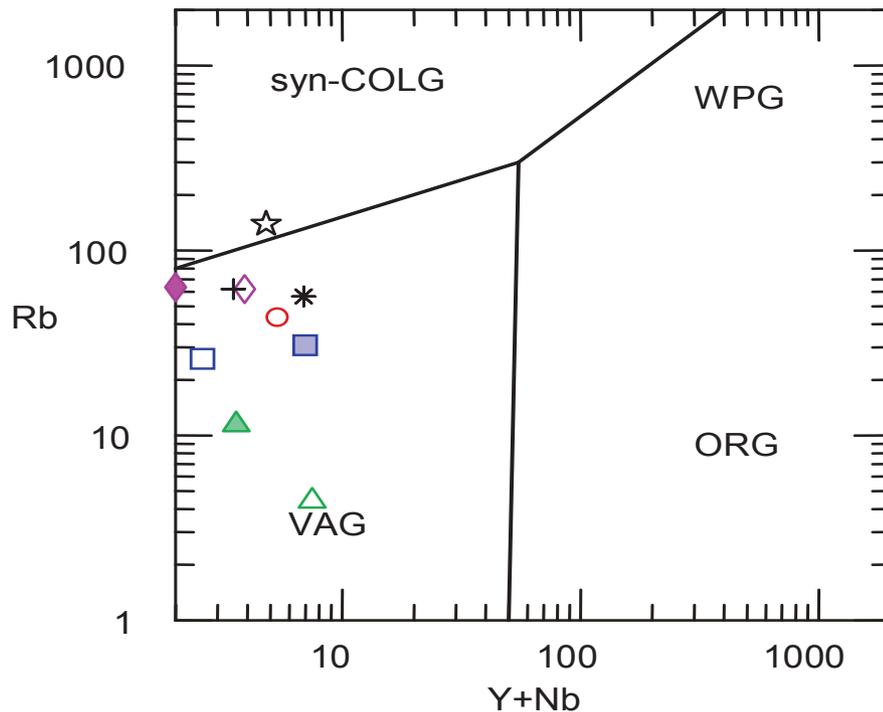


Figura 7. Discriminación de ambientes tectónicos relacionados con la generación de granitos tipo I en las muestras de Junín, utilizando el diagrama de Pearce et al. 1984.

Riodacitas a dacitas son las composiciones dominantes en el yacimiento. La muestra MJJ29-587 es la única de composición andesítica y presenta valores anómicos en  $\text{SiO}_3$ ,  $\text{TiO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Nb}$  y  $\text{Sr}$  (ver Tabla 1) con respecto a las demás muestras, definiéndose como una roca shoshonítica presente en un ambiente calco-alcalino de arco continental. Las litologías del yacimiento de Junín están asociadas a magmatismo tipo I; las altas concentraciones de rubidio, estroncio, zirconio, bario y bajas concentraciones en cromo,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{P}_2\text{O}_3$  ratifican lo dicho.

El diagrama de Maniar-Piccoli (1989, ver figura 6), se utilizó para la discriminación de Granitos Tipo I y Tipo S; las 11 muestras de Junín caen en el campo peraluminico. Esta contradicción de litologías relacionadas con magmas tipo I que caen en el campo de magmas tipo S, se debe a la fuerte alteración hidrotermal (potásica y escasa concentración de  $\text{CaO}$ ) presente tanto en las rocas de caja como en los pórfidos.

Para la discriminación de ambientes tectónicos relacionados con la generación de granitos tipo I, se utilizó el diagrama de

Pearce et al. (1984, ver figura 7) en cuyo diagrama las litologías de Junín caen en el campo de granitos generados en arco volcánico (VAG, volcanic arc granites), excepto la muestra MJJ29-587 que cae en el campo de los granitos syn-colisionales.

El análisis petrográfico y geoquímico de las facies magmáticas ratifica la composición dacítica de las rocas que forman el yacimiento de Junín; los pórfidos dacíticos están intruyendo al batolito de Apuela, el mismo que presenta una variada composición litológica, aunque dominada por una granodiorita de biotita.

## **MINERALIZACIÓN Y ALTERACIONES HIDROTERMALES**

Los tipos de mineralización y alteración hidrotermal presentes en el yacimiento son descritos a través de tres subtemas: Mineralización, Vetillas en el pórfido de cobre y Alteraciones Hidrotermales.

Varios autores han aportado al entendimiento y comprensión de los tipos de alteración hidrotermal y mineralización existentes en un pórfido de cobre-molibdeno. Graton y Bowditch (1936) y Sales y Meyer (1948, 1949) fueron quienes realizaron los primeros estudios de alteración en los yacimientos de Cerro de Pasco (Perú) y Butte (Montana, USA), respectivamente. Sales (1913), Park (1995) y Meyer y Hemley (1967) notaron una clara zonación, tanto lateral como vertical, de los sulfuros y de las alteraciones hidrotermales en Butte.

Gilluly (1946) estudió ensambles de alteración y su relación con menas hipógenas de alta ley en Ajo, Arizona, USA. Schwartz (1947) delineó en forma general las asociaciones de alteración en pórfidos. Creasey (1966) propuso los términos generales de alteración propilítica, argílica y potásica. Meyer y Hemley (1967) agregaron a la lista la alteración argílica avanzada. Rose (1970) fue el primero en destacar la importancia de la etapa temprana de alteración potásica.

Lowell y Gilbert (1970) compilaron datos de 27 pórfidos cupríferos de distintas partes del mundo para establecer un modelo de zonación de alteración. Anderon (1982) en conjunto con observaciones de Ransome (1919 y Locke (1926) estableció la relación entre cuerpos lixiviados de pórfidos con la mineralización original de sulfuros.

Noble (1970) planteó que la intrusión constituía simplemente un control estructural, más que la fuente de fluidos mineralizadores. Sillitoe (1975, 1993, 1994, 1995) reconoció la presencia de un “lithocap” y explicó las razones de la sobreimposición de alteraciones. Gustafson y Hunt (1975) estudian a detalle el yacimiento de El Salvador (Chile), y consecuentemente los estudios de pórfidos comenzaron a dar luces sobre los procesos magmáticos y su ligazón con características de los sistemas hidrotermales.

Se ha definido dos tipos de mineralización económica en el yacimiento: mineralización supérgena y mineralización hipógena.

Además, se ha registrado una zona de oxidación parcial (zona con sulfuros preservados no lixiviados) débilmente desarrollada, la misma que presenta esporádica mineralización de pirita, calcopirita y calcosina. El enriquecimiento secundario (o mineralización supérgena) en Junín está constituido por la débil presencia de calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y menor de covelina ( $\text{CuS}$ ). La mineralización hipógena (o sulfuros primarios) que se presenta inmediatamente bajo la zona de oxidación está caracterizada por bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ). Estos sulfuros primarios están asociados a las rocas de caja, pórfidos dacíticos, alteraciones fílica, potásica y potásica con superposición de alteración fílica, vetas de cuarzo y stockworks.

En Junín no se ha observado la secuencia o zonación de mineralización vertical caracterizada por la zona de oxidación, la zona de enriquecimiento secundario y por último la zona de sulfuros primarios.

Junín no ha generado una zona de enriquecimiento secundario importante, los sulfuros secundarios (calcosina y covelina) están asociados a una zona de oxidación parcial en la que sulfuros como pirita y calcopirita aun están preservados.

Además, se ha observado que bajo la zona de oxidación se tiene ya la presencia de sulfuros primarios.

La importancia económica en el yacimiento de Junín está dada por los sulfuros hipógenos, los mismos que se encuentran en forma diseminada o en densos stockworks. La zona de oxidación y la zona de enriquecimiento secundario se presentan débilmente desarrolladas, no poseen importante mineralización económica y su desarrollo se ve restringido a la escasa pirita existente en el protolito.

Los yacimientos de cobre porfídico en el mundo están caracterizados por la presencia de vetillas mineralizadas y no mineralizadas que forman parte en su evolución. Uno de los aportes significativos en esta investigación es la discriminación de los varios tipos de vetillas existentes en el yacimiento de Junín. Mediante relaciones de corte, composición mineralógica y tomando como referencia el estudio de vetillas realizado en el yacimiento El Salvador (Chile), se ha reconocido los siguientes tipos de vetillas en Junín:

1. Vetillas Tipo EB: biotita secundaria, clorita  $\pm$ magnetita  $\pm$ calcopirita  $\pm$ bornita
2. Vetillas de ortoclasa, cuarzo  $\pm$ molibdenita.
3. Vetillas Tipo T4: cuarzo, bornita, calcopirita, molibdenita  $\pm$ especularita  $\pm$ pirita
4. Vetillas Tipo A: cuarzo  $\pm$ bornita  $\pm$ calcopirita  $\pm$ molibdenita.
5. Vetas de cuarzo.
6. Vetillas Tipo B: cuarzo, molibdenita, calcopirita  $\pm$ pirita.

7. Vetillas Tipo D: cuarzo, pirita ±calcopirita ±molibdenita ±bornita ±especularita ±turmalina ±limonita.

8. Vetillas de specularita ±calcita ±hematita ±cuarzo.

9. Vetillas de epidota, clorita ±calcita ±turmalina ±pirita ±cuarzo.

Siete de los nueve tipos de vetillas están aportando mineralización económica al yacimiento porfídico; únicamente las vetillas de specularita y de epidota no aportan con sulfuros de cobre ni de molibdeno. De este análisis se puede distinguir varias generaciones de vetillas:

La primera generación de vetillas está caracterizada por la formación de las siguientes vetillas en éste orden de formación: EB (ver fotografía 1), de ortoclasa, T4 (ver fotografía 2) y tipo A (ver fotografía 3). Estas vetillas además representarían el evento de alteración potásico en Junín.

La segunda generación está relacionada con un evento transicional (descrito antes por Gustafson y Hunt, 1975, para la mina El Salvador en Chile) y que está caracterizada en Junín por las vetillas tipo B (ver fotografía 4).

Las vetillas tipo D (ver fotografía 5) conforman una tercera generación y forman parte de un evento tardío que removilizó mineralización económica.

Por último tenemos la generación de vetillas de specularita y epidota (ver fotografía 6);

ambas representan un evento post-mineralización en el cual el aporte de cobre y molibdeno al sistema es nulo.

Cuatro tipos de alteraciones hidrotermales se han desarrollado en Junín:

- Alteración Argílica: Sericita y arcillas (caolín).
- Alteración Fílica: Cuarzo, sericita, pirita ±clorita ±turmalina ±montmorillonita
- Alteración Potásica: Biotita secundaria, clorita, epidota ±magnetita ±ortoclasa ±cuarzo ±sericita ±albita ±hematita.
- Alteración Propilítica: Epidota, clorita ±sericita ±pirita ±cuarzo ±albita ±hematita ±calcita ±allanita.

La alteración potásica y propilítica (ver fotografía 7 y 8, respectivamente) son las dos únicas alteraciones que no destruyen la textura original de la roca. Las alteraciones argílica y fílica “borran” parcial- o totalmente la textura de la roca (ver fotografía 9).

Es típica la sobreimposición de alteraciones “frías” sobre alteraciones “calientes”. La alteración fílica se sobreimpone a las alteraciones potásica y propilítica. Cuando la sobreimposición es débil a moderada se puede observar remanentes de la textura original y de los minerales de alteración previos al “ataque” de la alteración fílica. Esta sobreimposición también puede generar la redistribución de la mineralización económica. La alteración propilítica con sobreimposición de fílica puede presentar sulfuros de cobre; está claro que dichos

sulfuros son transportados por la alteración fílica que está sobreimponiéndose a la propilitica.

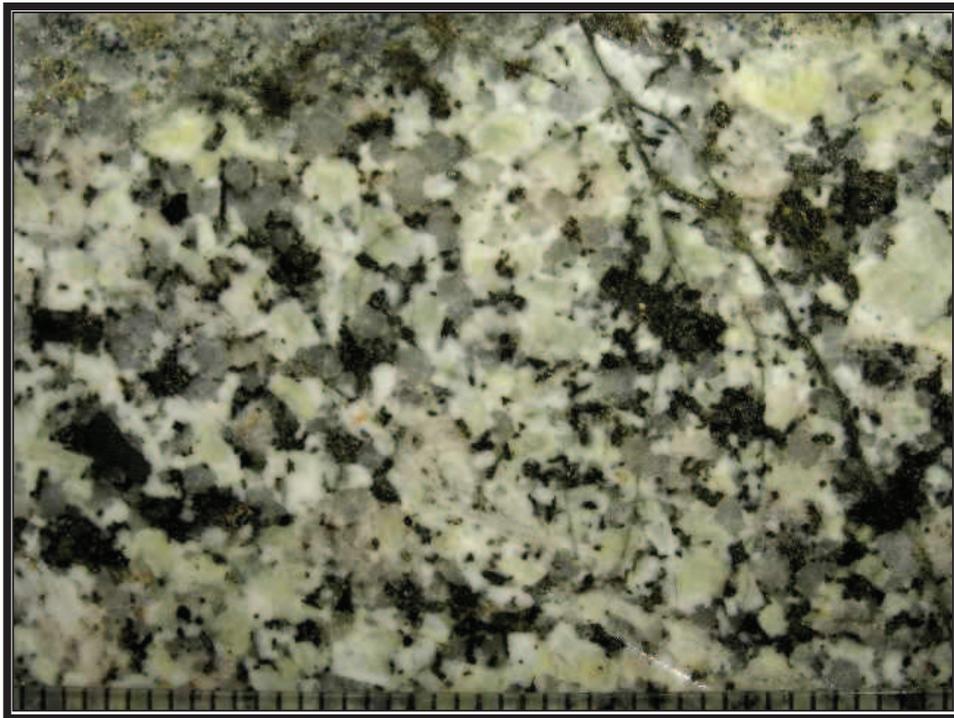
La mineralización de sulfuros hipógenos está estrechamente asociada a las alteraciones potásica, fílica y potásica con sobreimposición fílica. Alteraciones como la argílica y propilitica no se asocian a la mineralización económica

### MODELO GEOLÓGICO DE JUNÍN

Con el objetivo de aportar al conocimiento de la geología, alteración y mineralización del

pórfido de Junín, se elaboró un modelo geológico, para el cual se integró la información petrográfica y geoquímica de las facies magmáticas, mineralización y alteraciones hidrotermales y la recopilación de trabajos referentes a varios modelos de alteración/mineralización en sistemas de pórfidos de cobre estudiados alrededor del mundo. En especial se utilizó el trabajo de Gustafson y Hunt (1975), quienes describen la evolución magmática-hidrotermal del yacimiento de El Salvador (Chile).

El modelo geológico de un yacimiento particular de pórfido de cobre no es aplicable



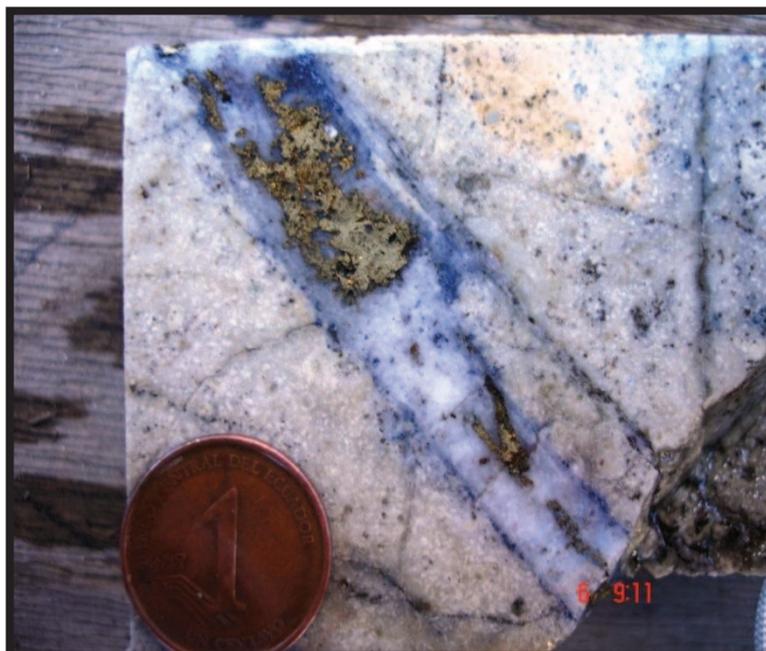
**Fotografía 1. MJJ8-34,90m. Cuarzodiorita cortada por vetillas poli-direccionales y continuas de biotita secundaria (EB), cuarzo, calcopirita y bornita. Amplitud del campo 42,5mm 31,9mm Escala gráfica graduada en mm.**



**Fotografía 2. MJJ29-406.15m. Vetilla de cuarzo tipo A (derecha) sin halo de alteración, corta a vetilla T4 con halo gris-verdoso y minerales máficos preservados en el mismo. Diámetro de la moneda 1.8 cm.**



**Fotografía 3. MJJ29-532.95m. Roca con alteración cuarzo, sericita +/-clorita. Vetilla irregular de cuarzo con bornita (tipo A) junto a vetilla sub-paralela tipo B con línea central y molibdenita en los bordes de la misma. Diámetro de la moneda 1.7 cm.**



**Fotografía 4. MJJ29-346.5m. Vetilla de cuarzo-calcopirita-molibdenita (tipo B), la cual genera halo de alteración destructor de 2 cm de espesor compuesto por: cuarzo y sericita, calcopirita depositada en parches a lo largo de la vetilla y molibdenita depositada en los bordes de la vetilla. Diámetro de la moneda 18mm.**



**Fotografía 5. MJJ29-353.9m. Vetilla de cuarzo-calcopirita-pirita (tipo D) con halo de alteración cuarzo-sericita. Corta y desplaza a vetilla de cuarzo-molibdenita (tipo B). Diámetro de la moneda 1.8 cm.**



**Fotografía 6. MJJ1-53m. Vetillas de epidota que cortan a la granodiorita de la caja con alteración propilítica.**



**Fotografía 7. MJJ29-5502mm. Granodiorita de biotita con alteración potásica cortada por vetillas irregulares de cuarzo tipo A. Los minerales máficos (m) están preservados en los halos de alteración cuarzo-sericita-ortoclasa. Diámetro de la moneda 1.7 cm.**



**Fotografía 8. MJJ15-50.30m. Pórfido dacítico de cuarzo-feldespato con alteración propilítica (plagioclasas cloritizadas y epidotizadas-Epi) y overprinting cuarzo-sericita. Diámetro de la moneda 1.8 cm.**



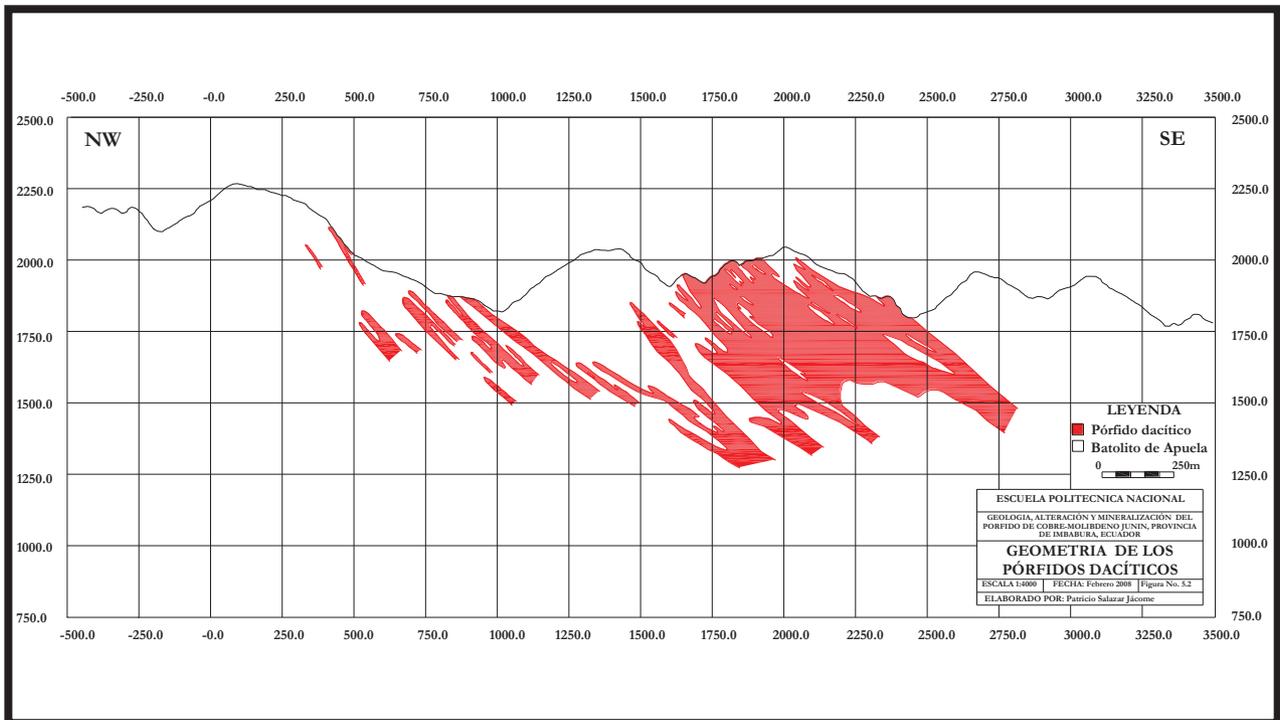
**Fotografía 9. MJJ4-54m. Roca con alteración cuarzo-sericita fuerte. La alteración destruye la textura original de la roca. Bornita (Bo) diseminada y en vetillas asociada a alteración filica. Diámetro de la moneda 1.7 cm.**

en su totalidad a otros yacimientos porfídicos. Cada depósito representa un detalle único tanto en la mineralización como en la alteración hidrotermal. En el presente trabajo se presenta cuatro eventos en la evolución del pórfido de Junín: Eventos temprano, transicional, tardío y post-mineral.

Las alteraciones potásica y propilítica están asociadas al evento temprano. El batolito de Apuela está “contaminado” por alteración potásica debido a la influencia de los pórfidos dacíticos, los cuales son los responsables de la mineralización y alteración en Junín; además

está afectado por la alteración propilítica. La alteración cuarzo-sericita (fílica) se sobrepone a las alteraciones del evento temprano y forma parte del evento tardío.

La generación de vetillas tipo EB, de ortoclasa, de tipo T4 y de tipo A ocurrió en el evento temprano y conforma el ensamble de alteración potásica. Las vetillas tipo B que aportan con la mayor cantidad de molibdeno cortan a las vetillas tempranas y representa el evento transicional. Las vetillas D cortan a todas las vetillas antes mencionadas y forman parte del evento tardío.



**Figura 8. Geometría de los pórfidos en un corte NW-SE. El pórfido dacítico intruye al batolito de Apuela desde el Sureste con ángulos entre 35 y 60 grados.**

La mineralización de sulfuros primarios (hipógena) se encuentra asociada a los eventos temprano, transicional y tardío. Cada uno de estos eventos aporta mineralización de cobre y molibdeno al sistema porfídico. El evento post-mineral no está asociado a mineralización económica. Las rocas

### CONCLUSIONES

El batolito de Apuela está caracterizado por una granodiorita de biotita de edad Mioceno Medio ( $16.5 \pm 1.1\text{Ma}$ ). Este batolito además está conformado por varias facies litológicas como tonalitas, cuarzomonzonitas, rocas melanocráticas y monzogranitos.

- Los pórfidos son de composición dacítica y edad Mioceno Tardío (5-7 Ma) son responsables de la alteración y mineralización en el yacimiento de Junín.
- Las rocas en el yacimiento son originadas por magmatismo calco-alcalino tipo I y generadas en un ambiente de arco volcánico continental.
- La zona de oxidación está asociada a las alteraciones filica y argílica y afecta débil- a moderadamente a la roca de caja y a los pórfidos dacíticos.
- No se observa una capa importante de calcosina.
- Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), calcopirita, ( $\text{CuFeS}$ ), molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ) conforman la mineralización hipógena.
- Se han identificado vetas de cuarzo y 8 tipos de vetillas relacionadas con el pórfido de Junín.
- Cuatro tipos de alteración hidrotermal están afectando las rocas que conforman el

afectadas por este evento son pórfidos dacíticos de grano medio a grueso y presentan alteración propilítica; están cortadas por vetillas de epidota y presentan diseminación débil de pirita. En la figura 8 se observa la geometría de los pórfidos que intruyen desde el sureste al batolito de Apuela.

yacimiento: argílica, filica, potásica y propilítica.

- Cuatro eventos en la evolución magmática-hidrotermal conforman el modelo geológico de este yacimiento: eventos temprano, transicional, tardío y post-mineral.

### RECOMENDACIONES

- Realizar un mapeo geológico estructural detallado del proyecto.
- Dataciones radimétricas en los pórfidos dacíticos ubicados tanto en los sectores centrales como en el sector periférico del proyecto Junín.
- Dataciones de la alteración hidrotermal y mineralización.
- Una nueva fase de perforaciones profundas (mayores a 600m) a diamantina para avanzar hacia la factibilidad del proyecto.

### AGRADECIMIENTOS

A la Compañía Minera Ascendant Copper SA., por permitir el uso de sus instalaciones y de una parte de sus datos pertinentes al estudio de Junín. Al Ing. Carlos Moncayo, José Perelló y a Phillip Schütte, por su amistad, criterios técnicos y su colaboración en la elaboración de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] ANDERSON, J.A., 1982. Characteristics of leached capping and techniques of appraisal. In Tittley, S.R., ed., Advances in geology of porphyry copper deposits of southwestern North America, University of Arizona Press, Tucson, p. 275-295.
- [2] ASCENDANT COPPER S.A., 2008, en [www.ascendantcopper.com](http://www.ascendantcopper.com)
- [3] BOLAND, M., PILATASIG, L, IBADANGO, K, MCOURT, W., ASPDEN, J., HUGHES, R. & BEATE, B., 2000. Reporte No 10. Proyecto de desarrollo minero y control ambiental. Programa de Información Cartográfica y Geológica. Geology of the Western Cordillera of Ecuador between 0°00' and 1°00'N, CODIGEM-BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, Quito-Ecuador, p.64.
- [4] CREASEY, S.C., 1966. Hydrothermal alteration, in Tittley, S.R., and Hicks, CI, eds., Geology of porphyry copper deposits-southwestern North America. Tucson, University of Arizona Press, p. 51-74.
- [5] DGGM., DIRECCIÓN GENERAL DE GEOLOGIA Y MINAS, 1982. National Geologic Map of Ecuador. Scale 1 : 1.000.000, Quito.
- [6] GILLULY, J., 1946. The Ajo mining district: U.S. Geological Survey Professional Paper 209. p.112.
- [7] GRATON, L.C., & BOWDITCH, S.I., 1936. Alkaline and acid solutions in hypogene zoning at Cerro de Pasco, Peru: Economic Geology, v. 31, p. 651-698.
- [8] GUSTAFSON, L.B. & HUNT, J.P., 1975. The Porphyry Copper Deposit of El Salvador, Chile. Economic Geology, v 70, N°5, p.857-911
- [9] HUGHES, L. & BERMUDEZ, R., 1997. Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental. Programa de Información Cartográfica y Geológica. Report Number 4. Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 0°00' and 1°00S.
- [10] JICA/MMAJ., 1996. Informe final sobre la exploración mineral de cooperación técnica en las áreas de Junín y Cuellaje, República del Ecuador.
- [11] JICA/MMAJ., 1998. Informe final sobre la exploración mineral de cooperación técnica en el área de Imbaoeste, República del Ecuador.
- [12] LITHERLAND, M. & ASPDEN, J.A., 1992. Terrane-boundary reactivation: A control on the evolution of the Northern Andes. Journal of South American Earth Sciences, Vol 5, p. 71-7.
- [13] LITHERLAND, M., ASPDEN, J.A. & JEMIELITA, R.A., 1994. The metamorphic belts of Ecuador. British Geological Survey Overseas Memoir 11, p. 147.

- [14] LOCKE, A., 1926. Leached Outcrops as guides to copper ore. Baltimore, Williams, Wilkins Co. p. 175
- [15] LOWELL, J.L. & GILBERT, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry copper ore deposits. Economic Geology, v.65. pp. 373- 408.
- [16] MANULI, P. an& PICCOLI, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin,101, p.635-643
- [17] MEYER, C. & HEMLEY, J.J., 1967. Wall rock alteration, in Barnes, H.L. eds., Geochemistry of Hydrthermal ore deposits New York; Holt, Rinehart, and Winston, p.166-232.
- [18] MISION BELGA-INEMIN, 1985. Proyecto Noroccidente, Informe anual 1985. INEMIN, Quito.
- [19] NOBLE, J.A., 1970. Metal provinces of the western United States, Geological Society of America Bulletin, v. 81, p. 1607- 1624.
- [20] PARK, C.F., Jr., 1995. Zonal theory of ore deposits. Economic Geology, 50th Anniversary Volume, part 1 , p. 226-248.
- [21] PEARCE, J.A., HARRIS, N.B.W. & TINDLE, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology 5. p. 956-983.
- [22] PECCERILLO, A. & TAYLOR, S.L. 1976. Geochemistry of Eocene cal-alkaline volcanic rocks from the Kastarnonu area, northern Turkey. Contrib. Mineral. Petrol 58., p 63-81.
- [23] PRODEMINCA, 2000. Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador, Vol. 4, Depósitos porfídicos y epi-mesotermiales relacionados con intrusiones de las Cordilleras Occidental y Real. UCP Prodeminca Proyecto MEM BIRF 36-55 EC, Quito, Ecuador. p.316.
- [24] ROSE, A.W., 1970. Zonal relations of wall rock alteration and sulfide distribution of porphyry copper deposits. Economic Geology, y. 65, p. 920- 936.
- [25] SALES, R.H., 1913. Ore deposits of Butte, Montana American Institute of Mining Engineers, Transactions, y. 46, p. 1-109.
- [26] SALES, R.H. & MEYER, C, 1948. Wall rock alteration, Butte, Montana. American Institute of Mining Engineers, Transactions, v.178, p. 9-35. — 1949. Results from preliminary studies of vein formation at Butte, Montana Economic Geology, v.44, p.465-484.
- [27] SCHÜTTE P., 2010. Geochronology, Geochemistry and Isotopic Composition (Sr, Nd, Pb) of Tertiary Porphyry Systems in Ecuador. PhD Thesis Department de Minéralogie, Université de Geneve, Terre & Environment, Vol. 85. Geneva, Switzerland. p. 182.

- [28] SCHWARTZ, G.M., 1947. Hydrothermal alteration in "porphyry copper" deposits. Economic Geology, v.42, p.319-352.
- [29] SILLITOE, R.H., 1975. Lead-silver, manganese, and native sulfur mineralization within a stratovolcano, El Queva, northwest Argentina, Economic Geology, v. 70.p. 1190-1201.
- [30] SILLITOE, R.L., 1993. Gold-rich porphyry copper deposits: Geological model and exploration implications. In Kirkham, L.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.L, and Duke, J.M. eds., Mineral deposit modeling. Geological Association of Canada Special Paper 40, p. 465-478.
- [31] SILLITOE, R.L., 1994. Erosion and collapse of volcanoes: Causes of telescoping in intrusion-centered ore deposits. Geology, Vol. 22, p. 945-948.
- [32] SILLITOE, R.L., 1995. Exploration of porphyry copper lithocaps, in Mauk, J.L and St. George, J.D, eds., Proceedings Pan American Conference on Research on Fluid Inclusions Congress 1995: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series No. 9/95, 527-532.
- [33] SILLITOE, R.L., 2000. Gold-Rich Porphyry Deposits: Descriptive and Genetic Models and their Role in Exploration and Discovery. Economic Geology, Vol. 13, p. 315-345.
- [34] STRECKEISEN, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. Earth Sci. Rey. 12, p. 1-33.
- [35] WINCHESTER, J.A. & FLOYD, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology. 20.325-343.