



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

**TESIS DOCTORAL**

El Prospecto de Cu-(Au-Mo) ALTAR  
(31° 29'LS, 70°28'LO), San Juan:

- I. Fertilidad de los Intrusivos Miocenos en el área
- II. Secuencia y Abundancia de las Paragénesis  
Hidrotermales, Pasajes de Flujos de Fluidos
- III. Evolución Geoquímica  
del Sistema Hidrotermal

**Laura Maydagán**

Dirección: Marta B. Franchini

Graciela R. Mas

**TOMO II**

**BAHÍA BLANCA**

**ARGENTINA**

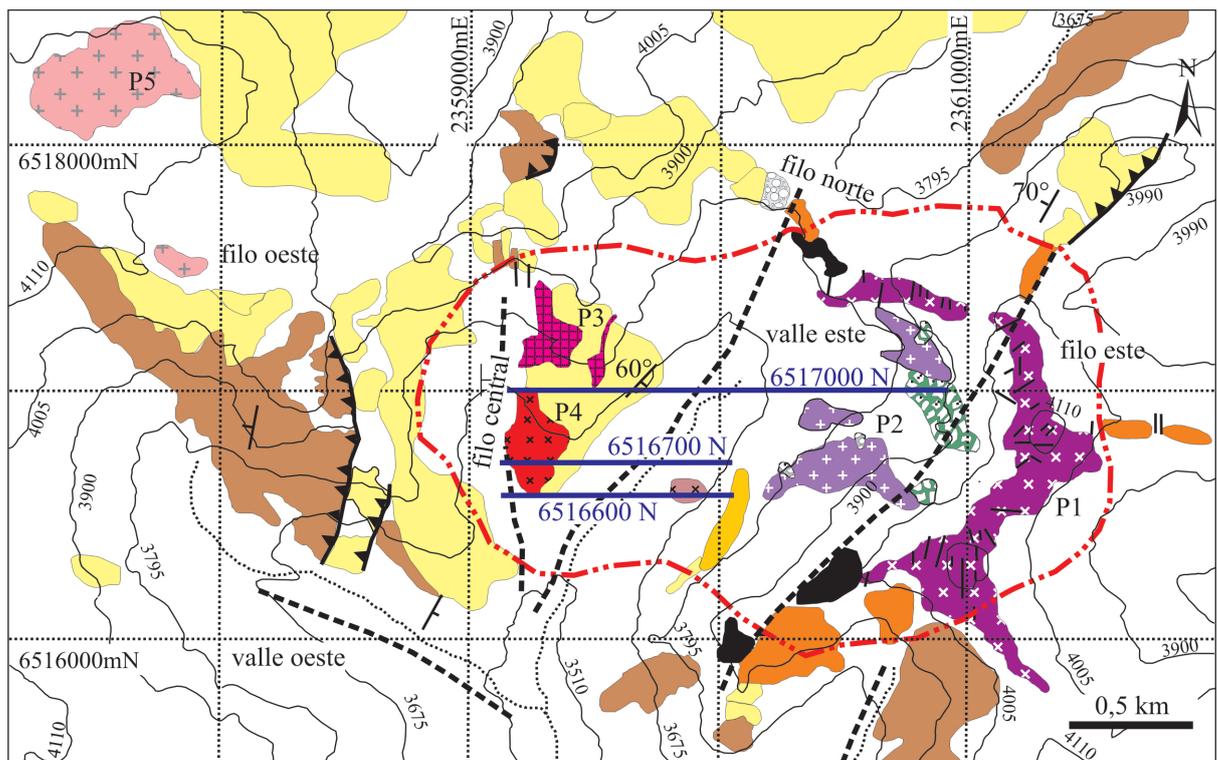
**2012**

## **CAPÍTULO V**

# **ALTERACIONES, MINERALIZACIONES Y GEOQUÍMICA DEL PÓRFIDO DE Cu (Au-Mo) Y DE LAS VETAS EPITERMALES DE Au (Ag-Cu) EN EL DISTRITO ALTAR**

## 1. INTRODUCCIÓN

Los resultados de los trabajos de exploración obtenidos por la empresa minera Peregrine Metals Ltd. que fueron sintetizados en el capítulo 1, han permitido definir a Altar como un importante depósito de Cu-(Au-Mo) de estilo andino localizado en el Departamento de Calingasta de la provincia de San Juan. Los recursos minerales medidos e indicados por esta empresa minera totalizan 802 millones de toneladas con leyes de cobre de 0,42% y de oro de 0,059 g/t, considerando un cut-off de 0,30% Cu equivalente (Peregrine Metals, 2010). El molibdeno no se considera parte del recurso mineral; los análisis de los sondeos realizados tienen un promedio 0,002% de Mo (Peregrine Metals, 2010).



### REFERENCIAS

	Buzamiento		Pórfido 5		Mioceno Temprano (CVI) Rocas piroclásticas
	Ríos		Andesita intrusiva		Andesitas
	Área alterada		Brecha magmática tardía		
	Falla inversa		Brecha magmática 2		
	Falla		Pórfido 4		
	Perfil O-E		Pórfido 3		
	Moderno		Pórfido intra-mineral indiferenciado		
	Lahar		Brecha hidrotermal 1		
			Brecha magmática 1		
			Pórfido 2		
			Pórfido 1		

Figura 1. Mapa geológico de detalle del distrito Altar con las litologías, estructuras, ríos, área alterada y ubicación de las tres secciones analizadas en este capítulo.

La cartografía de los afloramientos, los estudios geofísicos por polarización inducida (“IP”) y las perforaciones (149 sondeos) efectuados en el proyecto Altar han identificado alteraciones y mineralizaciones en un área de  $\sim 4 \times 3$  km. El estilo principal de alteración-mineralización localizado en el filo central y en el valle este del proyecto corresponde a un sistema de tipo pórfido de Cu, mientras que los fillos situados al este del proyecto presentan alteración argílica avanzada y mineralización de Au propias de un sistema epitermal de alta sulfuración (Fig. 1).

En este capítulo se brindan los resultados del estudio detallado de las alteraciones y mineralizaciones que afectan a los pórfidos andesítico-dacítico y a las rocas de caja en contacto con ellos (descritos en los capítulos 3 y 4) en tres secciones transversales del prospecto minero y en los afloramientos (vetas epitermales). Se establecen las relaciones tiempo-espacio de la evolución del sistema hidrotermal mediante la documentación de la secuencia y la distribución de las asociaciones minerales hidrotermales en equilibrio típicas de cada evento hidrotermal y la mineralización asociada. Además, se presenta una cronología detallada de las venillas, sus relaciones de corte y fenómenos de reapertura.

Finalmente, los datos geoquímicos de cobre, molibdeno, oro, arsénico, plomo y zinc obtenidos de las muestras de los sondeos se correlacionan con las litologías, con los distintos estadios de mineralización hipogénica que formaron los sulfuros y las sulfosales de Cu-Mo-Fe-As y el Au nativo diseminados en las rocas alteradas y en venillas y con los procesos supergénicos posteriores.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Trabajos de campo y de laboratorio preliminares**

Durante los trabajos de campo en el proyecto minero Altar (veranos de 2007, 2008 y 2010) se mapearon las alteraciones hidrotermales y las vetas que afloran en los fillos, y se recolectaron 200 muestras de rocas alteradas, mineralizadas y de las vetas. Se seleccionaron tres secciones transversales O-E del proyecto minero, en las que se digitalizó la información de los sondeos realizados por las empresas Río Tinto y Peregrine Metals Ltd. Estas secciones transversales resultaron excelentes para volcar las litologías y las estructuras, la distribución y la abundancia de las asociaciones minerales hidrotermales, los tenores de los metales (cobre, molibdeno, oro, arsénico, plomo y zinc) y la distribución de la mineralización diseminada y de las venillas. La confección de las secciones transversales se realizó utilizando el programa Corel Draw 13.

Se procedió al muestreo y a las descripciones de los testigos corona de 25 sondeos ubicados en las 3 secciones seleccionadas. Con este fin se realizaron dos viajes en octubre de

2007 y de 2008, de 10 días de duración cada uno, a las oficinas y archivos de coronas de las empresas mineras Río Tinto Mining & Exploration y de Peregrine Metals Ltd., localizadas en la ciudad de Mendoza. Las 350 muestras obtenidas de los sondeos representativos de las distintas litologías, alteraciones, venillas y mineralizaciones, fueron cortadas y pulidas con distintos abrasivos para obtener una mejor visualización. Luego fueron analizadas y descriptas por medio de una lupa binocular. La digitalización de las fetas de roca, utilizando un escáner de escritorio (600 dpi y formato JPG) permitió obtener un registro preciso de las alteraciones y relaciones de corte entre intrusivos y venillas, como también de los sectores seleccionados para realizar otros análisis.

En las muestras de mano de superficie y de los sondeos se describieron las litologías, las alteraciones, las relaciones de corte entre intrusivos y venillas y entre varios tipos de venillas. Se registró la abundancia de cada mineral de alteración y mineralización en porcentaje en volumen en base a la estimación visual. Se seleccionaron 200 muestras para realizar estudios petro-calcográficos con luz transmitida y reflejada.

En este trabajo el término asociación mineral en equilibrio ("*mineral assemblage*") se emplea para designar a un grupo de minerales que incluye también a los portadores de metales, que parecen ser estables a escala macroscópica y microscópica y que son contemporáneos. Una asociación mineral en equilibrio refleja condiciones restringidas de formación (temperatura, pH, estado de sulfuración y oxidación del fluido; [Seedorff et al., 2005](#)), asumiendo que los minerales que la forman alcanzaron un equilibrio termodinámico local. Los minerales en una asociación en equilibrio son enumerados y separados por el símbolo (+) si se encuentran en igual cantidad y por el símbolo más y menos ( $\pm$ ) si el mineral está en menor proporción o no está siempre presente en la asociación mineralógica. Un mineral relíctico- es decir que no es estable en la asociación determinada- se indica entre paréntesis después del mineral que lo reemplaza. Cuando un grupo de minerales característicos de cierta alteración no son necesariamente contemporáneos, se separan por comas.

## **2.2. Análisis de las muestras por difracción de rayos X**

Las muestras seleccionadas de los sondeos (n= 200) y de superficie (n= 44) fueron también analizadas por difracción de rayos X (DRX). En cada muestra se analizó la fracción total y los agregados orientados  $< 2\mu\text{m}$ , empleando radiación de Cu-K $\alpha$  y las trazas de DRX a 40 kV y 20 mA. Las reflexiones de XRD fueron evaluadas con el software Rigaku.

Para todas las muestras, la identificación de los minerales arcillosos se realizó a partir de difracción de rayos X de agregados orientados de la fracción inferior a 2  $\mu\text{m}$ . Las muestras de

roca total fueron molidas con el mortero. Se seleccionaron 30 gr de roca molida para luego disolverlos y dispersarlos con ultrasonido en un litro de agua destilada.

Para la preparación de los agregados orientados, las muestras se homoionizaron con  $\text{SrCl}_2$  y se extrajo la fracción  $<2 \mu\text{m}$ , se secó a temperatura ambiente (secada al aire), se sometió a vapores de etilenglicol y se calcinó a  $375^\circ\text{C}$  y  $550^\circ\text{C}$ . Para determinar las variedades de cloritas y los politipos de illita, a las muestras desagregadas se les extrajo la fracción  $<1\mu\text{m}$  por ultracentrifugación y se analizaron por el modo de escaneado en escalones ( $0,02^\circ$  por escalón) desde los  $16^\circ$  a los  $44^\circ 2\theta$ .

Los análisis cuantitativos de las arcillas se realizaron siguiendo el método MIF (Mineral Intensity Factor) descrito por [Moore y Reynolds \(1997\)](#). Para la estimación cuantitativa del filosilicato se utilizó el programa NEWMOD ([Moore y Reynolds, 1997](#)).

### 2.3 Geoquímica de los sondeos

Las empresas mineras realizaron el muestreo de los sondeos de manera sistemática a intervalos de 2 metros. La corona de perforación fue mecánicamente dividida por la mitad con un disco de diamante. Una mitad se guardó como referencia y la otra mitad fue almacenada para su preparación y molienda. Luego, en cada muestra de 150 g de pulpa se analizaron los análisis químicos.

Los testigos corona de los primeros 7 sondeos (A-1 a A-7) realizados por la empresa minera Río Tinto fueron preparados y analizados por Au, Ag, Pb, Zn, Mo, As, Sb, Fe and Cu en el laboratorio Alex Stewart en la ciudad de Mendoza.

En los sondeos de las campañas de 2006 y 2007 realizados por Peregrine Metals, fueron analizados Au, Cu, Mo, Ag y As en los laboratorios de ACME Analytical Laboratories en la ciudad de Santiago de Chile. El cobre y el molibdeno se analizaron con un límite de detección del 0,001%, mientras que la Ag y el As con límites de detección de 0,5 ppm y 10 ppm, respectivamente ([Peregrine Metals, 2010](#)). A partir del año 2008, además de los recién mencionados, se analizaron los siguientes elementos: B, Ba, Bi, Ca, Cd, Cr, Fe, Hg, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W y Zn ([Peregrine Metals, 2010](#)).

### 2.4. Estudio de las venillas mediante imágenes de cátodoluminiscencia

Se tomaron un total de 8 imágenes con el método de cátodo luminescencia (CL) en áreas específicas de las venillas, cada una de ellas acompañada por una imagen de electrones retro-dispersados (BSE) y de electrones secundarios (SE).

Las imágenes fueron adquiridas utilizando un micrográfico digital Gatan y un sistema de imágenes para cátodo luminescencia CHROMA-CL, en una microsonda de electrones JEOL-

6400 de la Universidad de New Brunswick, en Canadá. La aceleración de voltaje utilizada fue de 15 kV y la corriente fue de 5 nA para imágenes BSE y 35 nA para imágenes SE y CL. Las imágenes fueron tomadas con una magnificación de 140x que cubre un área de 580 x 580  $\mu\text{m}$ . El sistema Chroma-CL divide el espectro CL en 16 canales y los combina en imágenes de rojo, verde y azul. Los 16 canales son promediados para generar un color de imagen que coincide con el color verdadero de la emisión CL.

Las diferentes tonalidades de gris que presentan los cristales de cuarzo en las imágenes de SEM-CL reflejan diferentes colores de luminiscencia. La variabilidad del color y del brillo del cuarzo en las imágenes CL se puede atribuir a la presencia de defectos de la celda cristalina (debidos a vacancias de átomos de oxígeno y silicio o enlaces rotos) y/o a la presencia de elementos traza en la estructura cristalina (e.j. [Götze et al., 2001](#)). Algunas bandas de emisión del espectro CL se pueden relacionar a elementos traza específicos (e.j.  $\text{Al}^{3+}$ : 3,64-3,76 eV, 3,18 eV, ultravioleta a azul;  $\text{Ti}^{4+}$ : 2,94-2,98 eV, azul;  $\text{Fe}^{3+}$ : 1,71–1,75 eV, rojo; e  $\text{H}^+$ : 1,94-1,98 eV, rojo; [Perny et al., 1992](#); [Stevens-Kalceff y Phillips 1995](#); [Demars et al., 1996](#); [Müller et al., 2002](#)).

Dado que la luminiscencia observada en las imágenes SEM-CL depende de numerosas condiciones de operación, la intensidad de CL absoluta no puede ser fácilmente cuantificada, por lo tanto en esta investigación se la denomina como CL brillante, CL gris claro (moderada luminiscencia) y CL gris oscuro (baja luminiscencia).

Las texturas reconocidas en el cuarzo de las venillas mediante cátodoluminiscencia se identifican con las siguientes letras: A) cuarzo con zonación de crecimiento euhedral, B) pequeñas zonas de baja luminiscencia de cuarzo unidas por redes irregulares (textura en “tela de araña” ([Rusk et al., 2008](#)), C) banda de baja luminiscencia que atraviesa cuarzo previo por una fractura, D) cuarzo de baja luminiscencia entre fragmentos de cuarzo más brillante, E) cuarzo de baja luminiscencia en los bordes de granos de cuarzo de mayor brillo y, finalmente, F) cuarzo CL oscuro alrededor de núcleos de cuarzo CL brillante.

## 2.5. Geocronología de la alteración epitermal

Para determinar la edad de la alteración epitermal de alta sulfuración se seleccionó una muestra con abundante alunita procedente de una veta de cuarzo localizada en los filos este del proyecto minero Altar.

Esta muestra fue irradiada en el reactor USGS TRIGA Reactor, de Denver, Colorado, USA, junto a monitores de flujo de sanidina Fish Canyon ( $28,201 \pm 0,046$  Ma, [Kuiper et al., 2008](#)) para calcular los factores J y sales de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y  $\text{CaF}_2$  y calcular los factores de corrección de las reacciones de interferencia de neutrones. Los concentrados de alunita pura

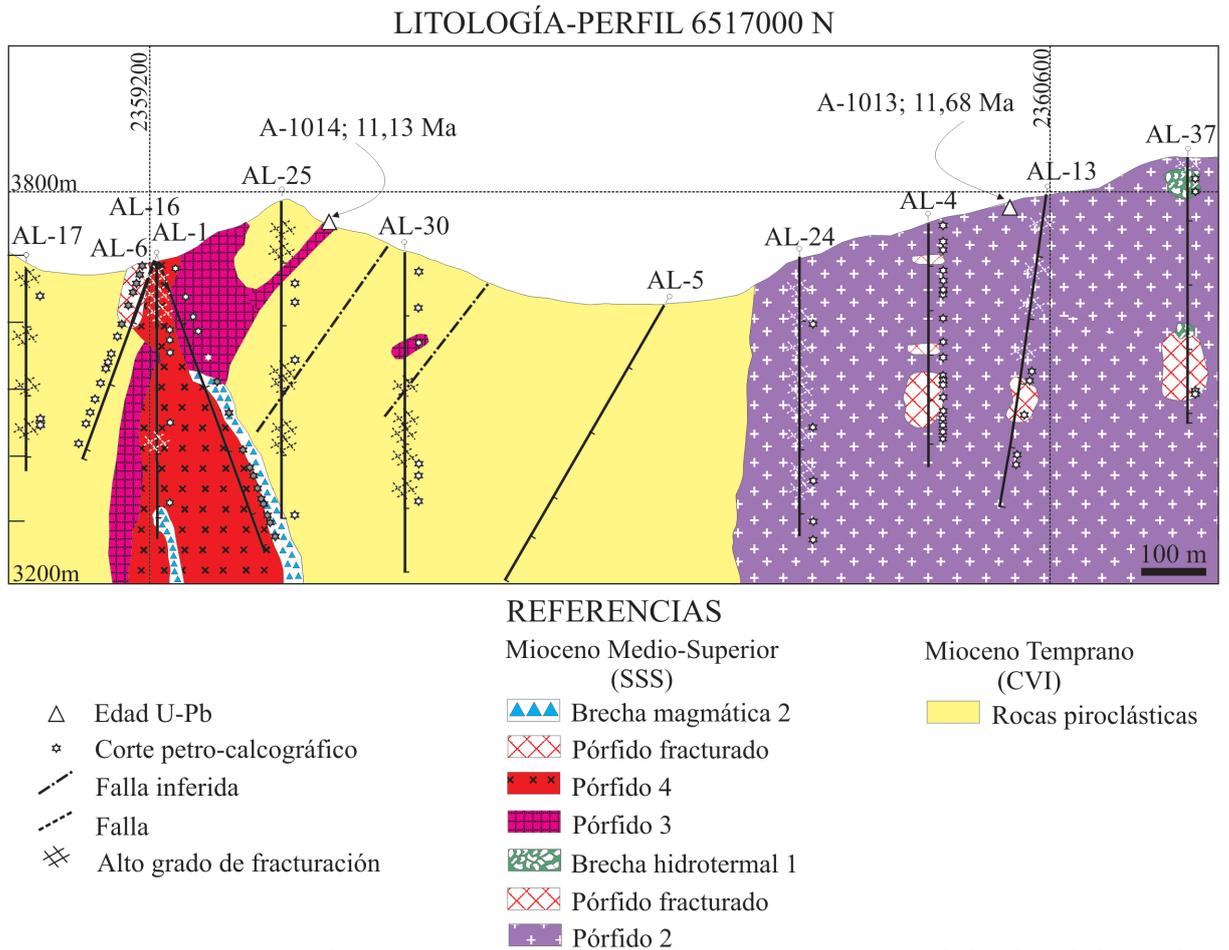
para los análisis de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  fueron irradiados durante un período de enfriamiento de 2 a 3 semanas para permitir el decaimiento de los isótopos de corta vida. Las muestras fueron almacenadas en un horno al vacío y se calentaron a 120° C, al mismo tiempo que toda la línea de extracción fue calentada al horno a 220° C durante 48 horas. Los receptores y la caldera se degasificaron en forma independiente. El argón fue extraído de la muestra utilizando una rutina de pasos de calentamiento (“*step heating*”). La temperatura del horno se estima en  $\pm 20^\circ$  C. Cada paso de calentamiento tuvo una duración de 12 minutos y fue seguido por un enfriamiento hasta 500° C antes de someter al gas a la etapa sucesiva de purificación del argón. Luego el argón se llevó a un espectrómetro de masas VG 5400, donde fue ionizado y detectado por un multiplicador de electrones VG y luego digitalizado mediante un espectrómetro Keithley 617. La toma y el procesamiento de los datos se realizó utilizando el programa Mass Spec (Deino, 2001). Las constantes de decaimiento utilizadas fueron las recomendadas por Steiger y Jäger (1977). Los valores de “*background*” fueron sustraídos y las medidas isotópicas se llevaron a tiempo cero utilizando técnicas de regresión lineal. Las correcciones adicionales se realizaron considerando la contribución atmosférica y los isótopos de interferencia producidos en el reactor por Ca, K y Cl presente en las muestras.

### 3. GEOLOGÍA DE LAS SECCIONES ANALIZADAS

La geología de las 3 secciones oeste-este seleccionadas consiste en las rocas volcánicas y piroclásticas del Complejo Volcánico Inferior (CVI) intruidas por los pórfidos subvolcánicos y las brechas magmáticas descritos en los capítulos III y IV e hidrotermales de la Suite Subvolcánica Superior (SSS) (Fig. 1).

El perfil ubicado al norte (6517000 N) atraviesa a la toba maciza del CVI (Fig. 2). Los perfiles localizados más al sur (6516700 y 6516600 N) cortan una intercalación de lavas de andesita basáltica y andesita-dacita, cubierta por un nivel espeso de toba maciza del CVI (Figs. 3 y 4).

La sección 6517000N intercepta al pórfido 2 y a la brecha hidrotermal 1 al este y a los pórfidos 3 y 4 y a la brecha magmática 2 en el filo central (Fig. 2). Los sondeos AL-6, AL-1 y AL-4, si bien se ubican a la latitud 6516900 N 100 metros al sur del resto de los sondeos de la sección, fueron incorporados en este perfil dado que brindan información sobre las relaciones de corte entre los distintos plutones de la SSS. El sondeo 1 se realizó siguiendo una orientación de N 120° y un ángulo de -60°, el sondeo 4 sigue una orientación N 200° y tiene un ángulo de -62° y el sondeo 6 sigue una orientación N 270° y un ángulo de -60°. Los otros sondeos estudiados son verticales.



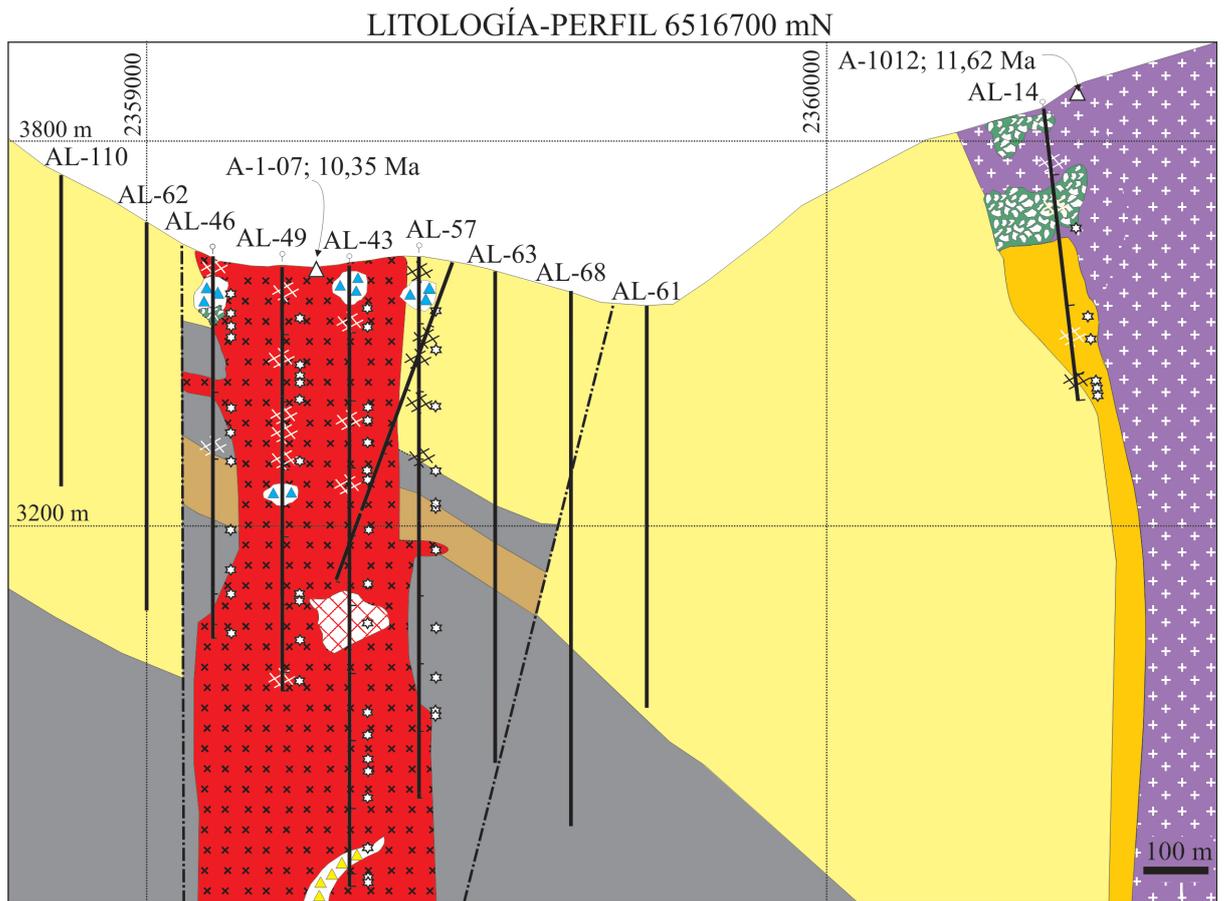
**Figura 2.** Geología de la sección 6517000 N con la localización de los sondeos estudiados, las edades U-Pb de los cuerpos intrusivos, los cortes petrocalcográficos analizados, las zonas con alto grado de fracturación y las fallas inferidas.

La sección 6516700N, ubicada 300 m hacia el sur, también atraviesa el filo central y el valle este y corta al pórfido 2 intruido por la brecha magmática 1 y la brecha hidrotermal 1 y al pórfido 4 cortado por la brecha magmática 2 (Fig. 3). La sección 6516600N, ubicada 100 metros al sur de la anterior, intercepta a un pórfido intra-mineral indiferenciado (sondeo 97), a los pórfidos 3 y 4 y a la brecha magmática 2 en el filo central (Fig. 4).

Las numerosas fracturas que cortan tanto a los intrusivos como a las rocas de caja, así como los abruptos cambios litológicos reconocidos entre sondeos próximos, indican que la secuencia volcánica se encuentra fallada en profundidad, y se ha inferido la localización de estas fallas en los perfiles (Figs. 2, 3 y 4). Fallas inversas se han reconocido en el valle oeste del distrito (ver Capítulo IV) donde afectan a las tobas y a las andesitas del CVI; en el valle este del proyecto estarían asociadas al lineamiento con orientación noreste que sigue la traza del arroyo Altar.

A continuación se describen las unidades observadas en subsuelo que no han sido descritas en los capítulos previos sobre la geología del proyecto.

La brecha hidrotermal 1 afecta los niveles someros del pórfido 2 en el valle este (Figs. 2 y 3). Esta unidad consiste de fragmentos sub-angulares a sub-redondeados (70-80 % en vol.; 1 a 4 cm de diámetro) de rocas porfíricas en una matriz de harina de roca (20-10% en vol.) reemplazada por un cemento hidrotermal que también rellena huecos (<10 % en vol.). La brecha varía de clasto-soportada a matriz-soportada y de monolitológica con fragmentos del pórfido con alteración fílica a heterolitológica con fragmentos de pórfido y de rocas volcánicas alteradas. Afloramientos de brechas hidrotermales similares a la brecha hidrotermal 1 pero de menor tamaño se reconocieron en los niveles superficiales del filo central y se los ha agrupado en la unidad brecha hidrotermal 2 (Fig. 3).



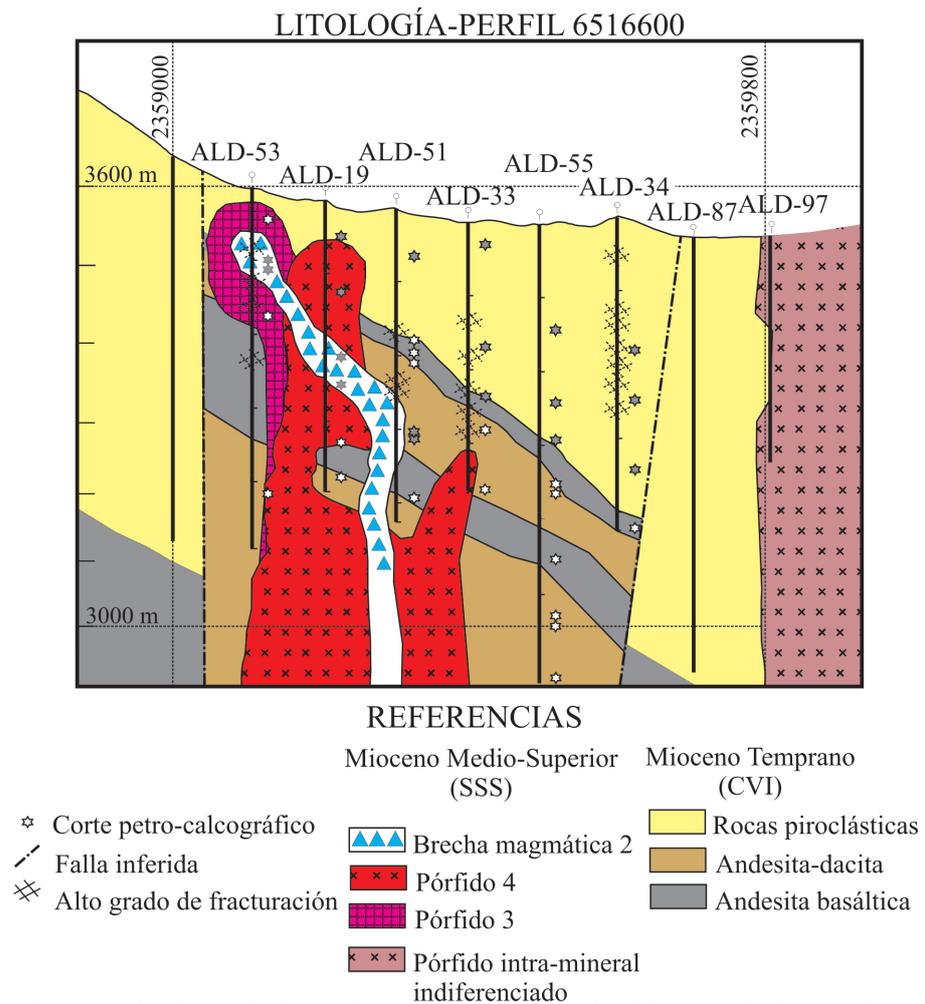
### REFERENCIAS

△ Edad U-Pb	Mioceno Medio-Superior (SSS)	Mioceno Temprano (CVI)
☆ Corte petro-calcográfico	Brecha hidrotermal 2	Rocas piroclásticas
— Falla inferida	Brecha magmática 2	Andesita-dacita
⊗ Alto grado de fracturación	Brecha pipe	Andesita basáltica
	Pórfido fracturado	
	Pórfido 4	
	Brecha hidrotermal 1	
	Brecha magmática 1	
	Pórfido 2	

**Figura 3.** Geología de la sección 6516700 N con la ubicación de los sondeos estudiados, las edades U-Pb de los cuerpos intrusivos, los cortes petrocalcográficos analizados, las zonas con alto grado de fracturación y las fallas inferidas.

La facies de “pórfido fracturado” representa sectores de los plutones subvolcánicos que contienen abundantes venas y venillas de cuarzo dislocadas y fragmentos de estas venillas (2mm a 1cm) subredondeados a sub-angulosos. Esta unidad está localizada en los márgenes o en el interior de los pórfidos 2 y 4 (Figs. 2 y 3).

Un dique de brecha heterolitológica tipo “*breccia pipe*” ha sido interceptado por el sondeo AL-43 a los 892 m de profundidad, a lo largo de 1 m cortando al pórfido 4. Consiste de fragmentos sub-angulares a sub-redondeados del pórfido 4 y de rocas volcánicas en una matriz clástica (harina de roca).



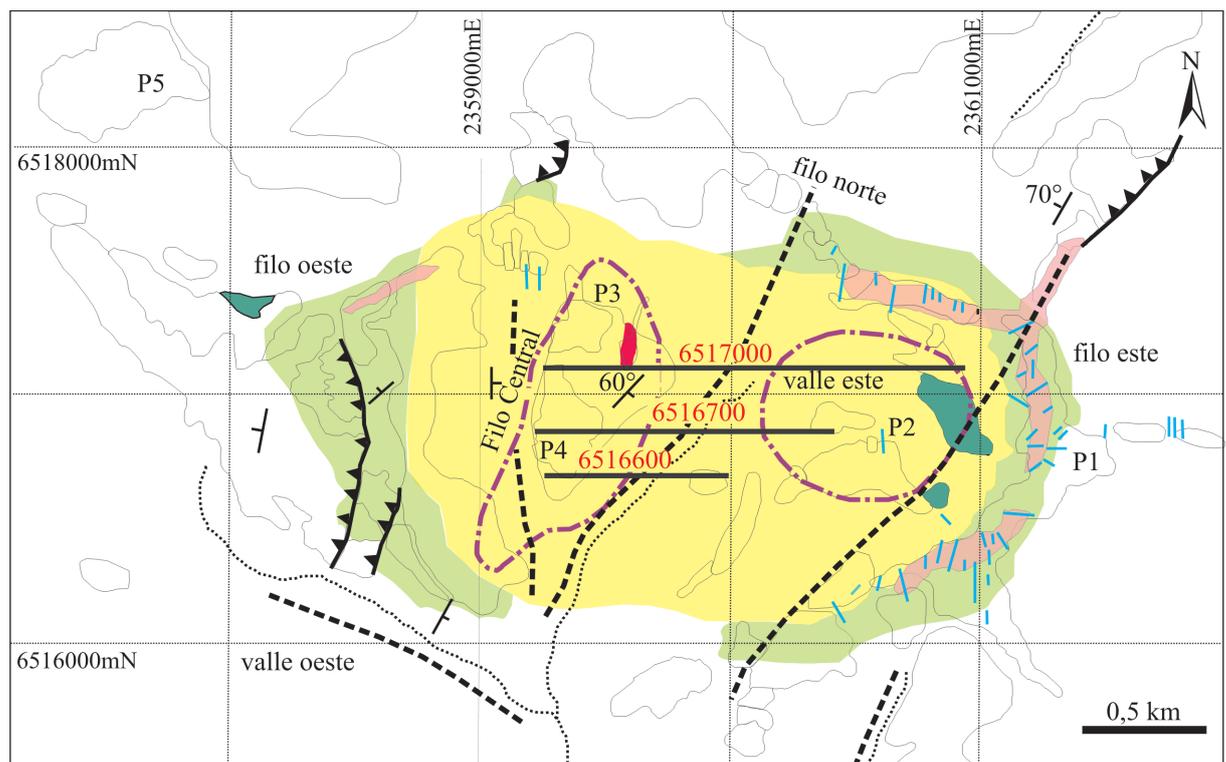
**Figura 4.** Geología de la sección 6516600 N con la ubicación de los sondeos estudiados, las edades U-Pb de los cuerpos intrusivos, los cortes petrocalcográficos analizados, las zonas con alto grado de fracturación y las fallas inferidas.

Un pórfido ha sido interceptado por el sondeo 97, localizado al este del perfil 6516600 N. Este sondeo corresponde a una de las últimas campañas de exploración de la empresa (año 2010) y no fue analizado ni muestreado en este trabajo. Si bien la textura, el contenido de mineralización, las venillas y la geoquímica del cuerpo intrusivo parecen similares al pórfido

2, se prefiere analizar a este intrusivo por separado y se lo denomina “pórfido intra-mineral indiferenciado” (Figs. 1 y 4).

#### 4. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL, MINERALIZACIÓN Y TIPOS DE VENILLAS

En superficie, el proyecto Altar exhibe una zona de alteración hidrotermal sobre un área de ~ 4 x 3 km. Un sector reducido con alteración potásica afecta al pórfido 3 en el filo central (Fig. 5). Un halo externo de alteración propilítica (calcita + clorita + epidoto ± cuarzo ± filosilicatos) se ha cartografiado en los fillos que circundan el distrito. Esta alteración se encuentra bien desarrollada en las andesitas del Complejo Volcánico Inferior, en el pórfido 1 y en la brecha magmática 1.



#### REFERENCIAS

- |  |                                 |  |                                     |
|--|---------------------------------|--|-------------------------------------|
|  | Falla inversa                   |  | Alteración argílica avanzada        |
|  | Falla                           |  | Brechas hidrotermales con turmalina |
|  | Perfil O-E                      |  | Alteración filica                   |
|  | Vetas de cuarzo                 |  | Alteración propilítica              |
|  | Stockwork de venillas de cuarzo |  | Alteración potásica                 |

Figura 5. Mapa de las alteraciones hidrotermales en superficie. Se señala la ubicación de las estructuras, las dos zonas de “stockwork” en el valle este y en el filo central, las vetas de cuarzo, los tres perfiles estudiados y los contornos de los afloramientos del CVI y de la SSS.

La alteración filica (cuarzo + filosilicatos dioctaédricos potásicos ± turmalina ± rutilo) está superpuesta a las alteraciones previas y es la de mayor desarrollo en la zona central del distrito minero (Fig. 5), donde afecta a los intrusivos y a las rocas de caja. En el valle este se

asocia a la presencia de brecha hidrotermal de  $\sim 0,5 \text{ km}^2$  con cemento de turmalina + cuarzo de grano fino (brecha hidrotermal 1; Fig. 2). En el filo oeste (Fig. 5), otro sector de alteración fílica afecta a las rocas volcánicas del CVI y a una brecha hidrotermal con cemento de turmalina. Dos zonas con alta densidad de venillas de cuarzo (tipo “*stockwork*”) afloran en el valle este y en filo central. En este último la zona tiene una orientación norte-sur a noreste (Fig. 5).

Tabla 1. Características de las venillas en el Pórfido de Cu (Au-Mo) Altar (en secuencia relativa de edades, más antigua arriba)

Tipo	Relleno de Venilla				Espesor	Estructura	Alteración del halo	
	Mayor		Menor				Ganga	Opacos
	Ganga	Opacos	Ganga	Opacos				
1	bio + cz		mt ± rt		0.1-1 mm	venillas capilares	ksp	ninguno
2a	cz		anh ± ksp		1mm-4 cm	paredes irregulares a rectas	ksp±bio±rt	ninguno
2b	ninguna	cpy	ksp ± cz ± bio± anh	py	1-3 mm	venillas capilares	ksp± anh	ninguno
3	cz	ninguno		mo ± cpy ± py	2mm-2 cm	paredes rectas a irregulares	ksp±bio	ninguno
4	chl + hm	ninguno	rt		0.2-1 mm	venillas capilares	ninguno	ninguno
5a	cz	py+cpy	fdp ± tour		2 mm	paredes irregulares	cz + fdp ± rt ± tour	py ± cpy
5b	cz	py	fdp ± anh	cpy	1 mm- 6 cm	paredes irregulares a rectas	cz + fdp ± rt ± tour	py
5c	anh		cz	cpy ± py	1 cm	paredes rectas	cz + fdp ± rt	py±cpy
5d	tour+cz	ninguno	ninguno	ninguno	0.5 mm- 1 cm	paredes irregulares	cz + fdp ± rt	
6a	ninguna	tn ± py	cz	td, oro (cpy, bn)	0.5 mm- 3 cm	paredes irregulares a rectas	dick y/o caol ± cz ± rt	tn (cpy, bn) +py ±(oro)
6b	ninguna	py	cz			paredes irregulares a rectas	dick y/o caol ± cz ± rt	py, tenn (bn)
6c		py + en	cz	(cpy, bn, tn)	2.5 cm	paredes irregulares a rectas	ninguno; cz; dick/caol ± cz ± rt	py-en
7	cz	py+gn+sl	ninguno	ninguno	2-12 cm	paredes rectas	ninguno	ninguno
8	ca+anh	ninguno	ninguno	ninguno	0.5mm-4 cm	paredes irregulares a rectas	ninguno	ninguno
EP <sub>1</sub>	cz	ninguno	ninguno		1 a 3 metros	paredes rectas	cz+alun, cz+caol	
EP <sub>2</sub>	cz+alun	en			mm a 1 m	paredes rectas		en
9	hm+cz+jar		ill	(py, cpy) oro	0.5 mm-6 cm	paredes irregulares a rectas	ninguno	ninguno
10	yeso	ninguno			0.5-1 mm	paredes irregulares	ninguno	ninguno

Abreviaturas: ab: albita; alun: alunita; anh: anhidrita; bio: biotita; bn: bornita; caol: caolinita; chl: clorita; cpy: calcopirita; cz: cuarzo; dick: dickita; en: enargita; hm: hematita; jar: jarosita; ill: illita; kps: feldespato potásico; fdp: filosilicato dioctaédrico potásico; ga: galena; mo: molibdenita; mt: magnetita; py: pirita; rt: rutilo; sl: esfalerita; td: tetraedrita; tn: tennantita; tour: turmalina; t: traza; EP: Vetas del depósito epitermal de Au.

La alteración argílica avanzada está restringida a los niveles topográficos altos, en el filo este y se encuentra en menor magnitud al noroeste del distrito (Fig. 5). Está caracterizada por abundantes estructuras mineralizadas que constituyen el remanente de un “*lithocap*” (Sillitoe, 1999).

Los sondeos del distrito minero Altar, con longitudes comprendidas entre 300 y más de 900 m, permitieron analizar un amplio registro de venillas en los testigos, sus variaciones con la profundidad y su relación con la mineralización diseminada. La descripción macroscópica y microscópica detallada de las muestras procedentes de los sondeos permitió definir 10 tipos de venillas, y considerando los subtipos, un total de 17 variedades. Las mismas han sido clasificadas teniendo en cuenta su mineralogía, estructura, textura, presencia de halos de alteración y sus relaciones de corte. Como resultado de estos estudios se pudo estimar el tiempo relativo de los eventos magmáticos e hidrotermales y los pulsos de mineralización de Cu (Au, Mo, Zn y Pb).

Tabla 2. Relaciones de corte entre las venillas del pórfido de Cu-(Au-Mo) Altar.

Venilla cortada (+ antigua)	Venilla que corta (+ joven)															
	1	2a	2b	3	4	5a	5b	5c	5d	6a	6b	6c	7	8	9	10
1		3														
2a			1	1	1	4	12	1	6	2	3	4		3	1	2
2b												1				
3							1									
4		2					1			2						
5a								1	1	3		1		1		
5b								1	6	9	2					7
5c																1
5d										1						
6														1		1
7																
8																
9																
10																

relación de corte normal  
 relación de corte inversa

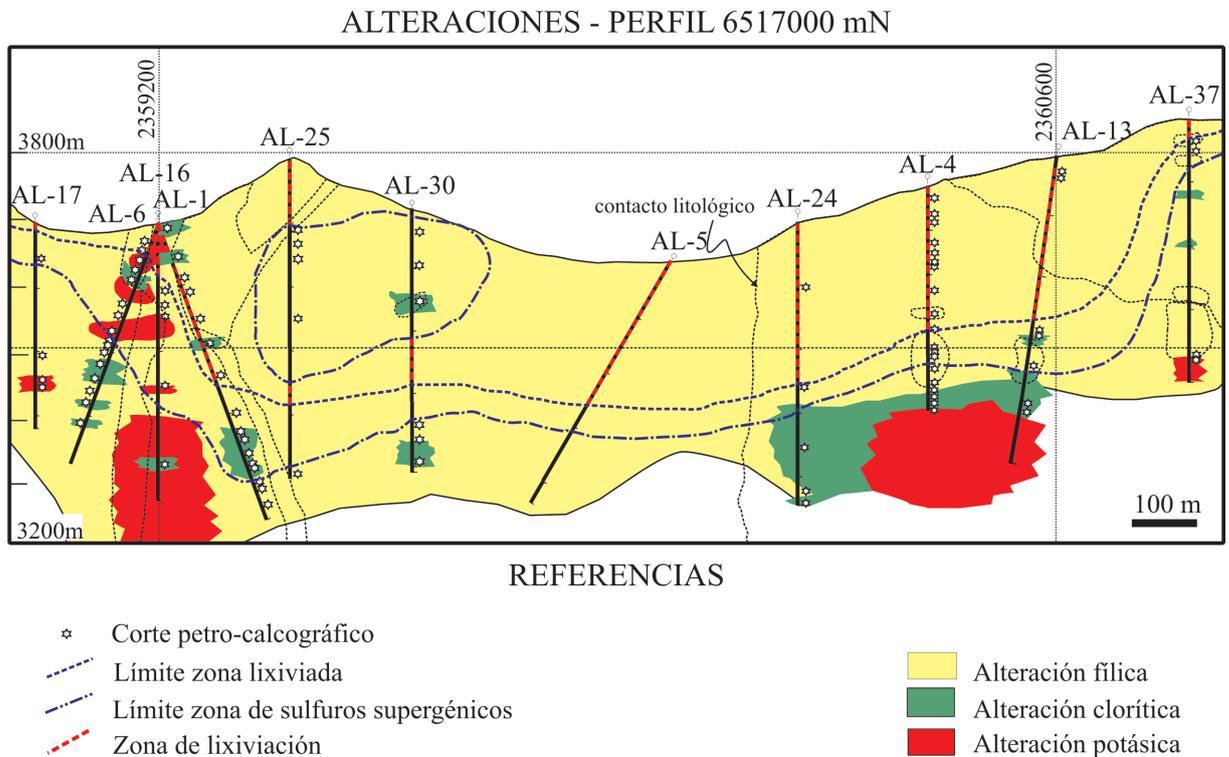
Nº: cantidad de relaciones de corte observadas en los cortes petro-calcográficos estudiados.

Las características principales de las venillas se resumen en la Tabla 1 y las relaciones de corte reconocidas en las muestras de mano y en las secciones delgadas se detallan en la Tabla 2. Las figuras 6, 7 y 8 presentan la distribución de las alteraciones hidrotermales reconocidas en profundidad en los tres perfiles estudiados.

#### 4.1. Alteración potásica

La alteración potásica está en equilibrio con las venillas tipo 1 y 2. Está constituida por la asociación hidrotermal de minerales en equilibrio cuarzo + biotita ± anhidrita ± albita ± feldespato potásico ± filosilicatos dioctaédricos potásicos ± rutilo en las tres secciones

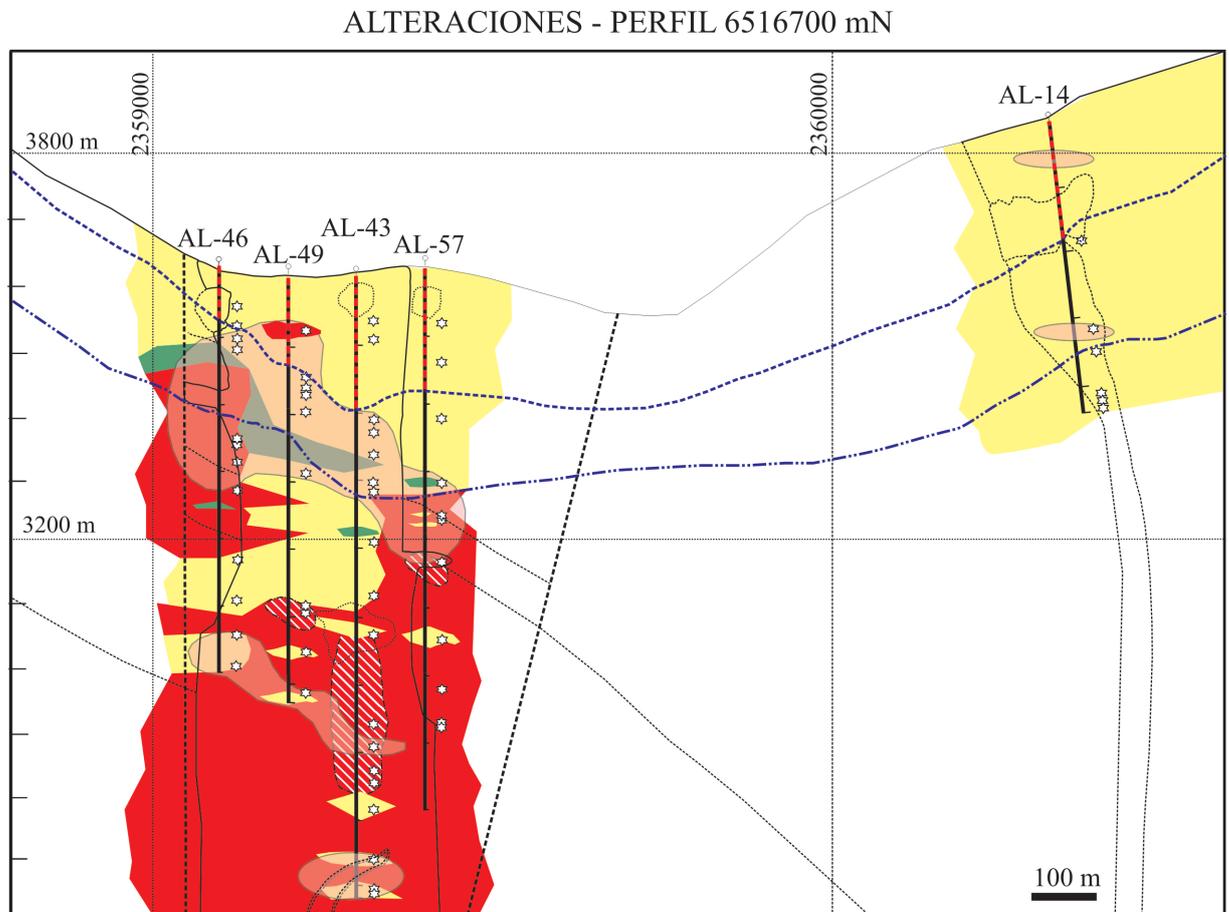
analizadas (Figs. 6, 7 y 8). Agregados de láminas finas de biotita hidrotermal (biotita II) ± rutilo reemplazan a los fenocristales de anfíbol y de biotita magmáticos (biotita I) (Figs. 9A y 9B). La albita hidrotermal reemplaza algunos fenocristales de plagioclasa según sus bordes (Fig. 9C), mientras que sus núcleos están alterados a filosilicatos dioctaédricos potásicos ± anhidrita. La pasta está reemplazada por un agregado microgranular (0,1-0,2 mm) de cristales anhedral de cuarzo + biotita ± anhidrita ± rutilo ± albita ± filosilicatos dioctaédricos potásicos, clorita (Fig. 9D). El feldespato potásico se halla en cantidades subordinadas en esta alteración (se identificó sólo en 7 muestras de DRX de roca total sobre un total de 70 muestras analizadas, en cantidades traza a <10% en vol., Tablas 3 y 4). De acuerdo a las reflexiones analizadas con el método de los tres picos (Wright y Stewart, 1968) el feldespato potásico se puede clasificar como microclino intermedio y su bajo valor de triclinicidad ( $\Delta = 0,125\text{\AA}$ ) señala desorden cristalino y rápido enfriamiento durante su formación. La alteración potásica suele preservar la textura original de la roca, así como también a algunos fenocristales magmáticos de plagioclasa (0,2-3 mm), biotita (< 3 mm, biotita I) (Fig. 9E) y de circón.



**Figura 6.** Distribución de las alteraciones hidrotermales, de la zonas lixiviada y de sulfuros supergénicos en la sección 6517000 N.

Al oeste de la sección 6517000N, la alteración potásica está en parches preservados en el pórfido 4 (sondeo AL-16) y en la toba en contacto con este cuerpo ígneo (AL-17; AL-6); es masiva en el pórfido 4 a partir de los 310 m de profundidad (sondeo AL-16). Al este de la sección, se interceptó en el pórfido 2 a partir de los 400 m de profundidad (sondeos AL-4 y

AL-13) (Fig. 6). En la sección 6516700N, la alteración potásica está como parches en niveles superficiales e intermedios afectando al pórfido 4 y a la toba (AL-46, AL-49) y es masiva a partir de los ~500 m de profundidad en el filo central (AL-46, AL-49, AL-43) y a partir de los 333 m en el sondeo AL-57 (Fig. 7). En la sección 6516600N sólo se preservan parches relictos de alteración potásica a distintas profundidades en los pórfidos 3 y 4 y en las rocas de caja volcánicas (Fig. 8).



#### REFERENCIAS

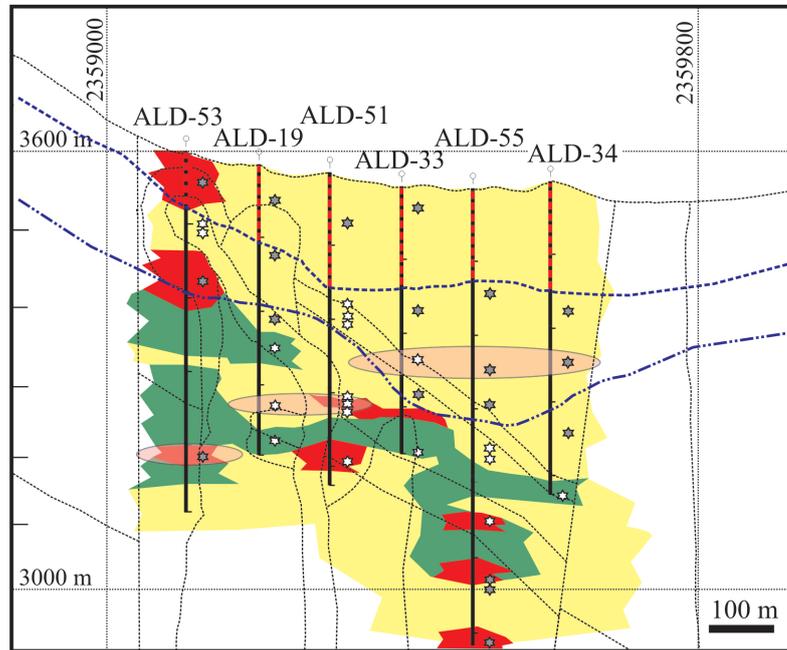
- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>☆ Corte petro-caligráfico</li> <li>--- Límite zona lixiviada</li> <li>--- Límite zona de sulfuros supergénicos</li> <li>--- Zona de lixiviación</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alteración argílica avanzada</li> <li>Alteración filica</li> <li>Alteración clorítica</li> <li>Alteración potásica</li> <li>Alteración potásica con albita</li> </ul> |
|---|--|

**Figura 7.** Distribución de las alteraciones hidrotermales, de las zonas lixiviada y de sulfuros supergénicos en la sección 6516700 N.

En el perfil 6516700 N, se identificó una variedad de alteración potásica en la cual la albita hidrotermal (>30% en vol.) oblitera la textura porfírica original de la roca y le confiere un aspecto granular (Fig. 9F). La albita, con o sin maclas, reemplaza tanto los bordes como los núcleos de los fenocristales de plagioclasa, forma halos irregulares y aumenta el tamaño de los fenocristales. Los minerales hidrotermales de la pasta son de grano más grueso y la

anhidrita es poco frecuente. Esta variedad de la alteración potásica está en sectores profundos del pórfido 4 (Fig. 7). En las andesitas del CVI, la alteración potásica consiste de biotita hidrotermal que reemplaza a los máficos (2 mm) y, junto con anhidrita  $\pm$  cuarzo  $\pm$  albita (<0,2 mm), a la pasta (Fig. 9G). La “brecha pipe” reconocida en sectores profundos del filo central tiene sus fragmentos de pórfido 4 afectados por alteración potásica.

#### ALTERACIONES - PERFIL 6516600 mN



#### REFERENCIAS

- |     |                          |                              |
|-----|--------------------------|------------------------------|
| ☆   | Corte petro-calcográfico | Alteración argílica avanzada |
| --- | Límite zona lixiviada    | Alteración filica            |
| --- | Límite zona supergénica  | Alteración clorítica         |
| --- | Zona de lixiviación      | Alteración potásica          |

Figura 8. Distribución de las alteraciones hidrotermales, de las zonas lixiviada y de sulfuros supergénicos en la sección 6516600 N.

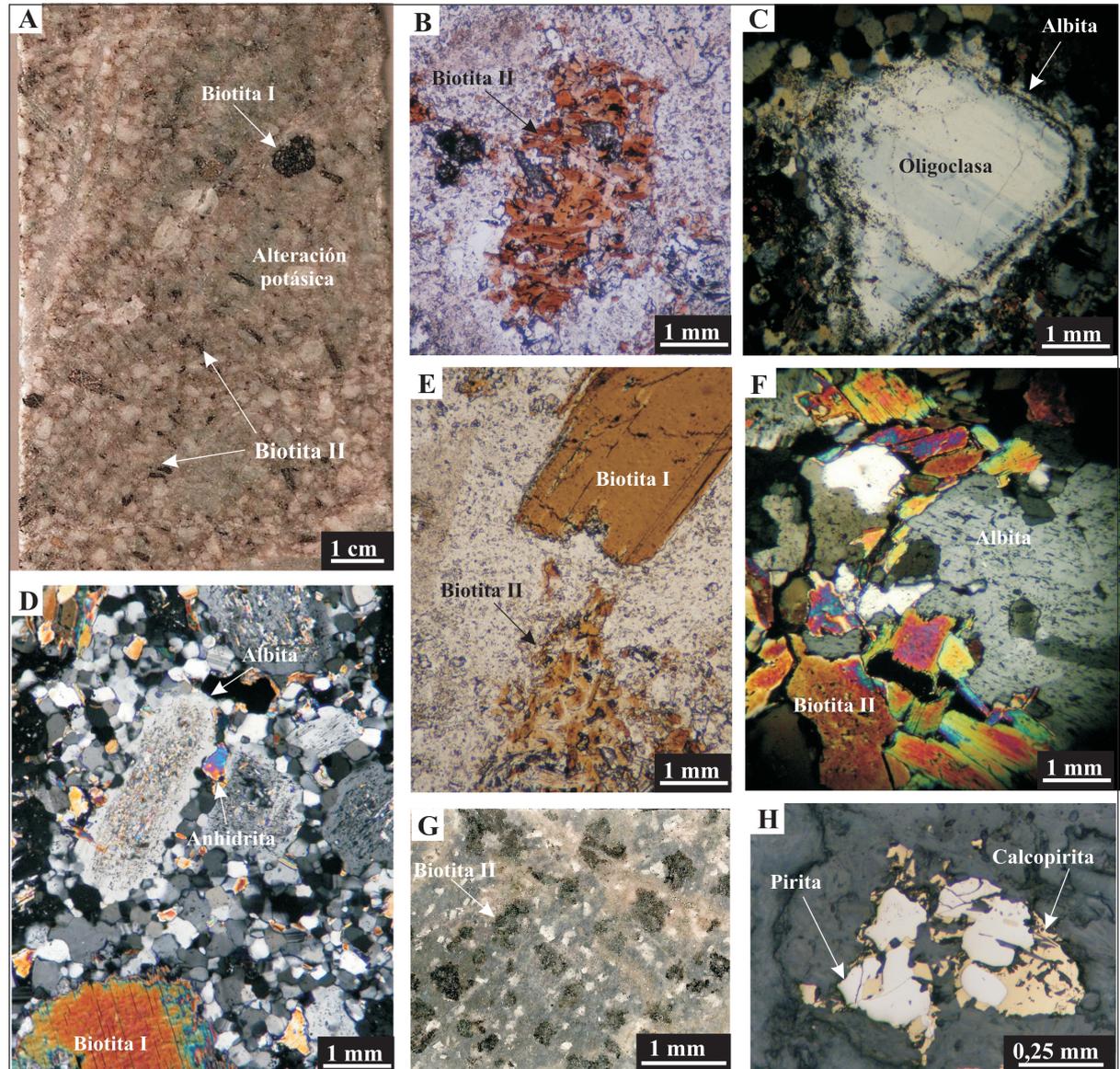
#### 4.1.1. Mineralización asociada

La mineralización en la alteración potásica consiste de cristales muy finos de calcopirita  $\pm$  pirita  $\pm$  molibdenita  $\pm$  bornita (trazas) diseminados en las rocas alteradas y en un “stockwork” de venillas de cuarzo de paredes sinuosas a rectas y en venillas capilares.

En la mineralización diseminada, la calcopirita (~1-3%, <0,4 mm) siempre es más abundante que la pirita (~0,5-1%, <0,6 mm) (cpy > py, Figs. 10, 11 y 12). La calcopirita es anhedra y la pirita subhedra, ambas de grano muy fino (Fig. 9H); suelen reemplazar a los máficos. La pirita tiene inclusiones de calcopirita y de bornita. En contacto con los pórfidos del filo central, las andesitas del CVI tienen abundante calcopirita y trazas de bornita (entre 2 y 3 % en vol., sondeos AL-46 y AL-57, AL-55, AL-33, AL-51-AL-34, Figs. 11 y 12). La molibdenita en cantidades trazas está diseminada en las rocas alteradas.

## Venillas tipo 1

Son las venillas más antiguas y se caracterizan por una mineralogía de biotita + cuarzo  $\pm$  magnetita  $\pm$  rutilo, calcopirita + pirita, con paredes irregulares y de escaso espesor ( $<1$  mm).



**Figura 9.** Fetas de roca y microfotografías representativas de la alteración potásica. A) Biotita hidrotermal (II) según fenocristal de anfíbol y biotita magmática (I). B) Detalle de biotita II según anfíbol. C) Albita hidrotermal según los bordes de fenocristal de plagioclasa magmática. D) Fenocristal de plagioclasa alterado a albita y la pasta reemplazada por un agregado microgranular de cuarzo + biotita  $\pm$  anhidrita  $\pm$  rutilo  $\pm$  albita  $\pm$  muscovita. E) Biotita magmática (I) relictica y biotita hidrotermal (II) según anfíbol. F) Textura granular de la variedad de alteración potásica con abundante albita que afecta al pórfido 4 en profundidad. G) Biotita hidrotermal en la andesita del CVI. H) Detalle de la mineralización diseminada de calcopirita + pirita en esta alteración.

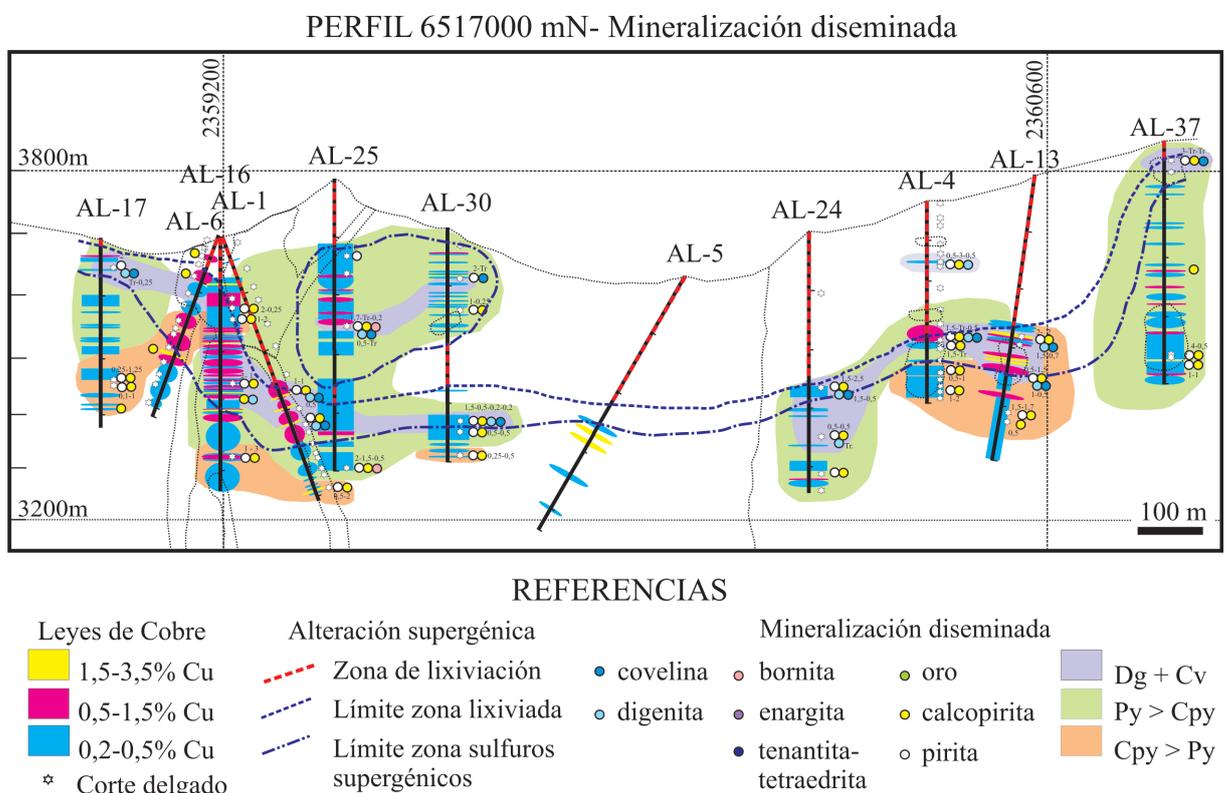
La biotita está en laminillas finas (0,1-0,3 mm) y el cuarzo está en granos subhedrales y límpidos. Cuando atraviesan a los cristales de plagioclasa, suelen presentar un halo de feldespato secundario. En general se encuentran en zonas profundas con alteración potásica y

cortan a los pórfidos y a la andesita porfírica en contacto con estos intrusivos (Figs. 13A, 14 y 15). Los sulfuros están presentes sólo cuando otras venillas mineralizadas cortan a la roca.

Escasos ejemplos de venillas tempranas irregulares (<1 mm) de feldespato potásico  $\pm$  cuarzo  $\pm$  anhidrita (Tabla. 1) se hallaron en la andesita del CVI con alteración potásica, próxima a los intrusivos. Una venilla temprana irregular formada por magnetita  $\pm$  cuarzo corta al pórfido 2 en profundidad (A-24-442 m).

### Venas y venillas tipo 2

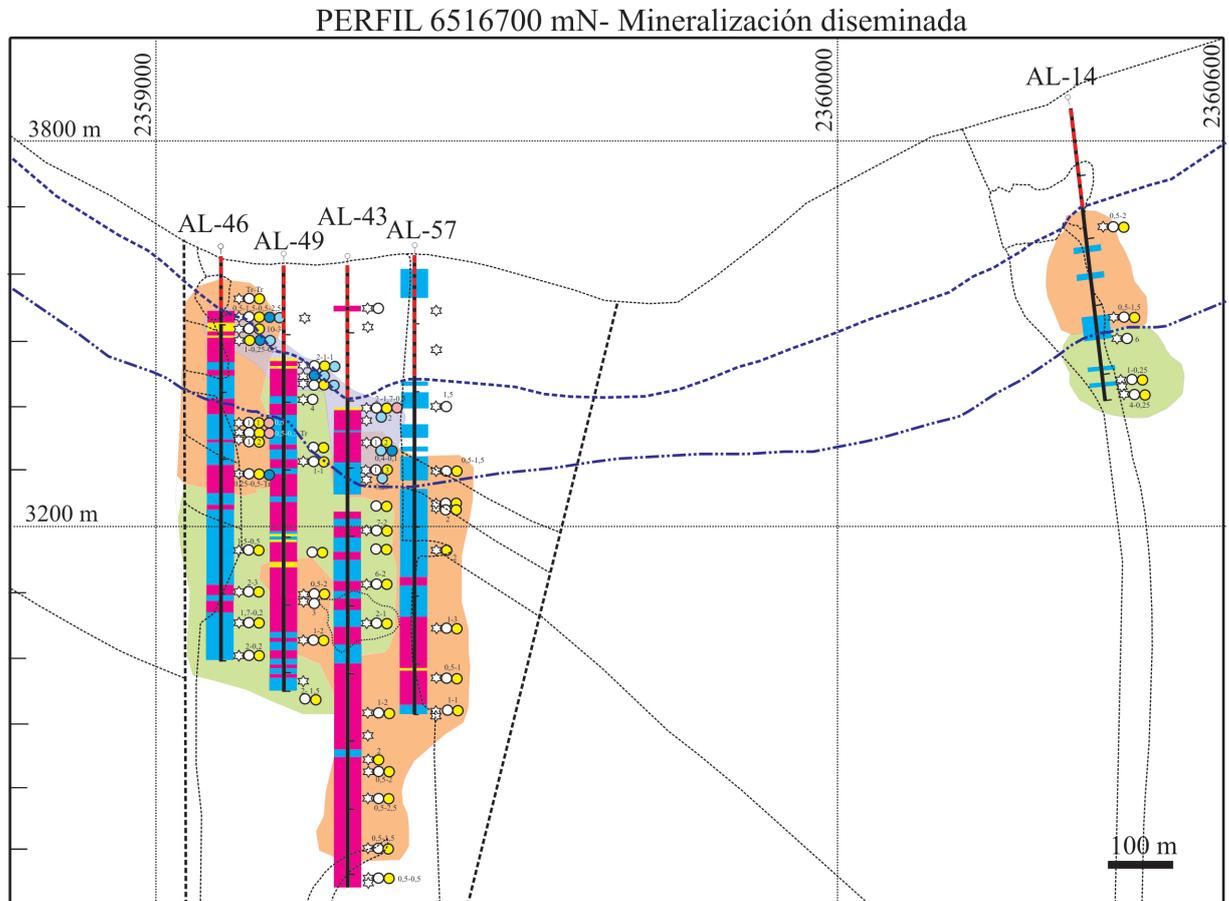
El relleno de estas venas y venillas tempranas consiste de cuarzo, anhidrita, feldespato potásico, calcopirita, pirita y bornita. De acuerdo con las proporciones de estos minerales, el espesor y la forma de las venillas, se identificaron dos subtipos: un subtipo con cuarzo como mineral más abundante (2a) y un subtipo en el cual la calcopirita es preponderante (2b) (Tabla 1).



**Figura 10.** Mineralización diseminada en el perfil 6517000 N con las zonas de digenita + covelina (dg+cv), pirita > calcopirita (py>cpy) y calcopirita > pirita (cpy>py), límites de las zonas de lixiviación y de sulfuros supergénicos y leyes de Cu.

*Subtipo 2a* cuarzo  $\pm$  anhidrita  $\pm$  feldespato potásico, calcopirita  $\pm$  pirita  $\pm$  bornita. Es el más abundante y forma un “stockwork” denso de venas y venillas de paredes onduladas a rectas con espesores que varían entre  $\sim$ 1 mm y 4 cm (Fig. 13B). Presenta textura granular sin simetría interna y el cuarzo, en individuos anhedrales con bordes crenulados (0,1-0,8 mm), ocupa el 90% de la venilla. Cuando las venillas cortan a las andesitas del CVI tienen un halo

de feldespatos potásico + biotita  $\pm$  rutilo (Fig. 13C). Venillas 2a discontinuas de paredes sinuosas e irregulares han sido identificadas en los niveles más profundos alcanzados por los sondeos (ej. entre los 651 y 869 m del sondeo 43). En los niveles intermedios y superficiales las venillas tipo 2a tienen paredes rectas. Las venas 2a de espesor variable, discontinuas y paredes muy irregulares son antiguas y se han observado cortadas por otras venillas 2a finas y sinuosas, que a su vez están cortadas y dislocadas por venillas más jóvenes, finas y de paredes rectas (Fig. 13D). También se reconocieron venillas 2a muy finas, capilares (Fig. 13E).



**Figura 11.** Mineralización diseminada en el perfil 6516700 N con indicación de las zonas de digenita + covelina (dg+cv), pirita > calcopirita (py>cpy) y calcopirita > pirita (cpy>py), límites de las zonas de lixiviación y de sulfuros supergénicos y leyes de Cu.

Las venillas 2a cortan a las venillas tipo 1 en los pórfidos con alteración potásica (ver Fig. 13A). Suelen mostrar reapertura y relleno con asociaciones minerales de venillas posteriores, que al microscopio se manifiesta por el fracturamiento de los cristales de cuarzo y el relleno de estas fracturas por una nueva generación de cuarzo y sulfuros. Forman un

“*stockwork*” que corta a las rocas en dos zonas principales. Una de ellas se localiza en el filo central y afecta al pórfido 3 (2-40 % en vol.) y al pórfido 4 (20->50 % en vol.) y a las rocas de caja (Fig. 15). En la brecha magmática 2, las venillas 2a están como fragmentos. La otra zona de “*stockwork*” afecta al pórfido 2 (10->50 % en vol.) y a las rocas de caja en el valle este del proyecto (Figs. 16 y 17).

*Subtipo 2b calcopirita ± feldespato potásico ± cuarzo ± biotita ± anhidrita ± pirita.* Cuando está presente el feldespato potásico, ocupa el centro de la venilla y al atravesar los fenocristales de plagioclasa de las rocas, estas venillas tienen un halo muy delgado de feldespato secundario (Fig. 13F). Son venillas finas (<3 mm) y “*seams*”. Se localizan en los niveles profundos, en los pórfidos 2, 3 y 4 y en las rocas de caja (andesita y toba del CVI) próximas a los pórfidos con alteraciones potásica y clorítica (Figs. 15, 16 y 17), donde cortan a las venillas 2a (ver Fig. 13F).

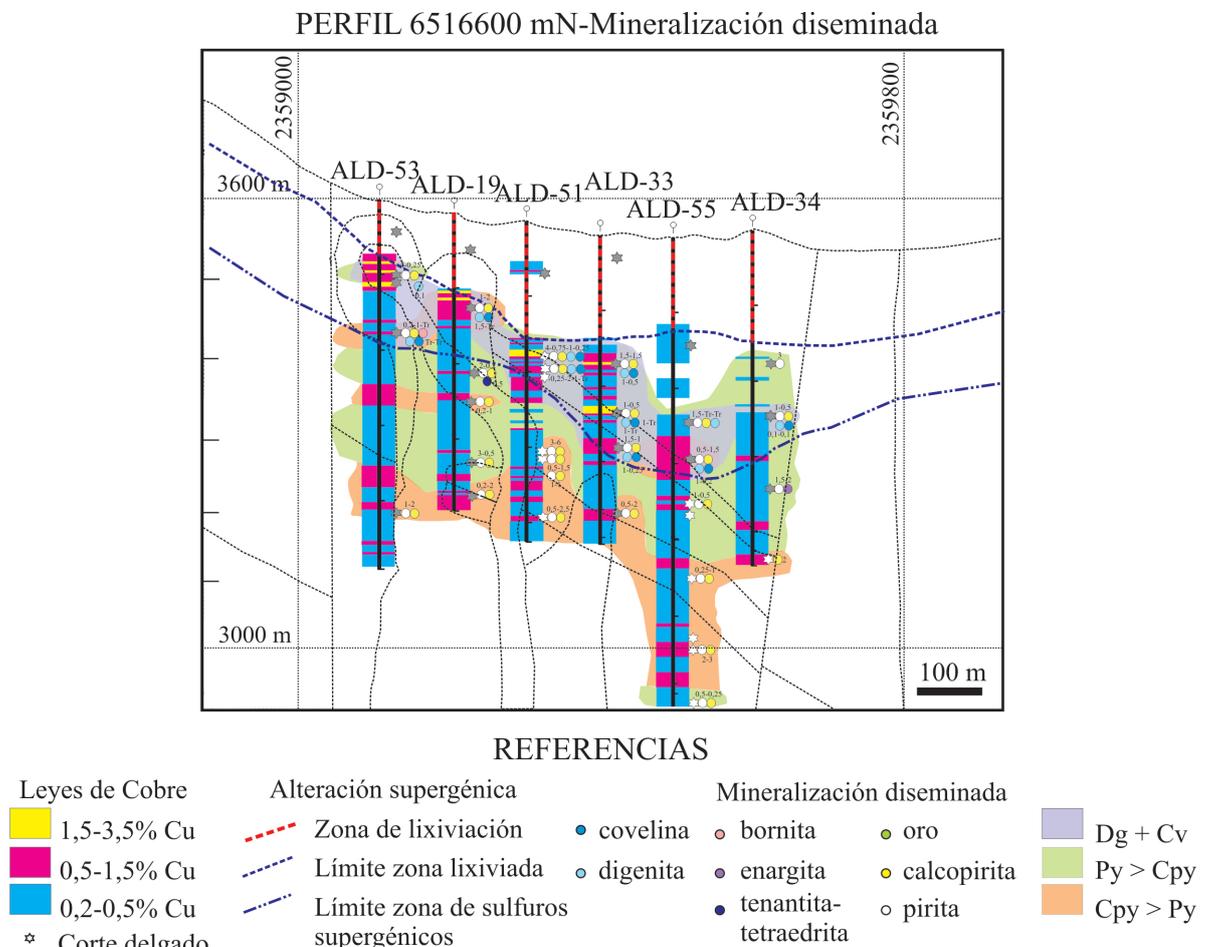
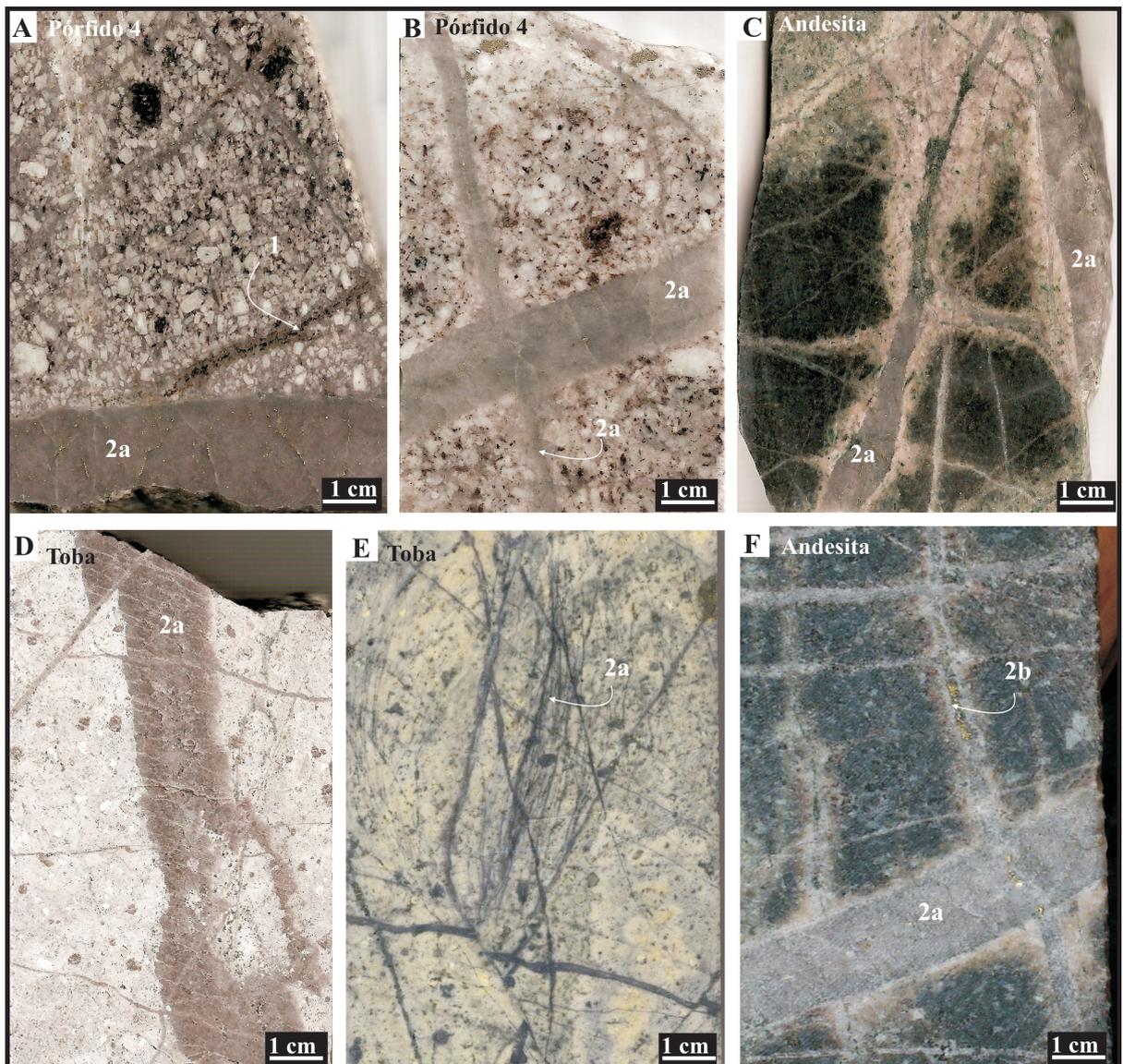


Figura 12. Mineralización diseminada en el perfil 6516600 N con indicación de las zonas de digenita + covellina (dg+cv), pirita > calcopirita (py>cpy) y calcopirita>pirita (cpy>py), límites de las zonas de lixiviación y de sulfuros supergénicos y leyes de Cu.

Una vena de tipo 2a cortada por microvenillas capilares 2b fue analizada por catodoluminiscencia (Fig. 18). Los núcleos de los granos de cuarzo anhedral de las venillas

2a (Cz-1) tienen luminescencia moderada a baja y exhiben una zonación de crecimiento euhedral (textura “A”) (Figs. 18 A y B). El cuarzo más joven de baja luminiscencia, sin zonación y de tonalidad rojiza (Cz-2), sólo visible con microscopía CL, es el que está en contacto con la mineralización de calcopirita, pirita y bornita y forma microvenillas 2b irregulares que cortan al cuarzo Cz-1 (Fig. 18B). El cuarzo joven también se encuentra en redes con textura en “tela de araña” (Rusk y Reed, 2002) (textura “B”) (Fig. 18B) e interrumpe las zonas de crecimiento del cuarzo Cz-1. En otra fotografía CL de estas mismas venillas (Figs. 18C, D y E), el cuarzo en contacto con los sulfuros (Cz-2) muestra contactos irregulares y difusos sobre el cuarzo Cz-1. Estas fotografías permitieron reconocer que los sulfuros en estas venillas están asociados al cuarzo (Cz-2) de las venillas tipo 2b, que precipita en huecos dejados por la disolución del cuarzo (Cz-1) de la venilla 2a.



**Figura 13.** Fetas de rocas de los sondeos con ejemplos de las venillas 1, 2a y 2b. A) Venilla fina tipo 1 cortada por venilla 2a en el pórfido 4. B) Venillas 2a cortan al pórfido 4. C) Venilla 2a de paredes irregulares con halo de feldespato potásico + biotita ± rutilo en las andesitas del CVI. D) Venillas 2a de paredes irregulares cortadas

por venillas 2a finas y de paredes irregulares, ambas cortadas por venillas 2a finas de paredes rectas, en la toba del CVI. E) Venillas finas capilares 2a de paredes rectas cortan a la toba del CVI. F) Venillas 2b cortan a venillas 2a, andesita del CVI.

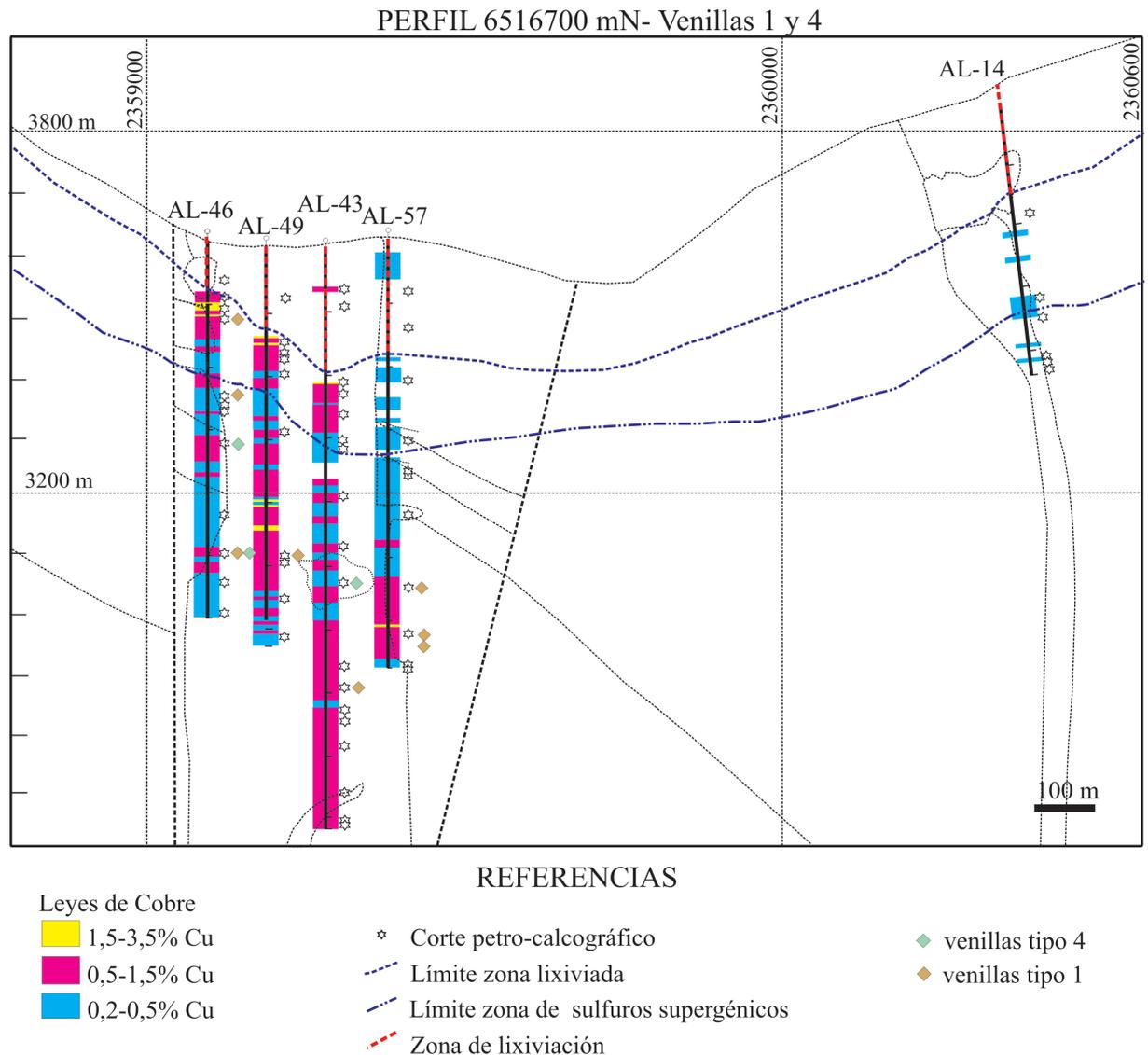


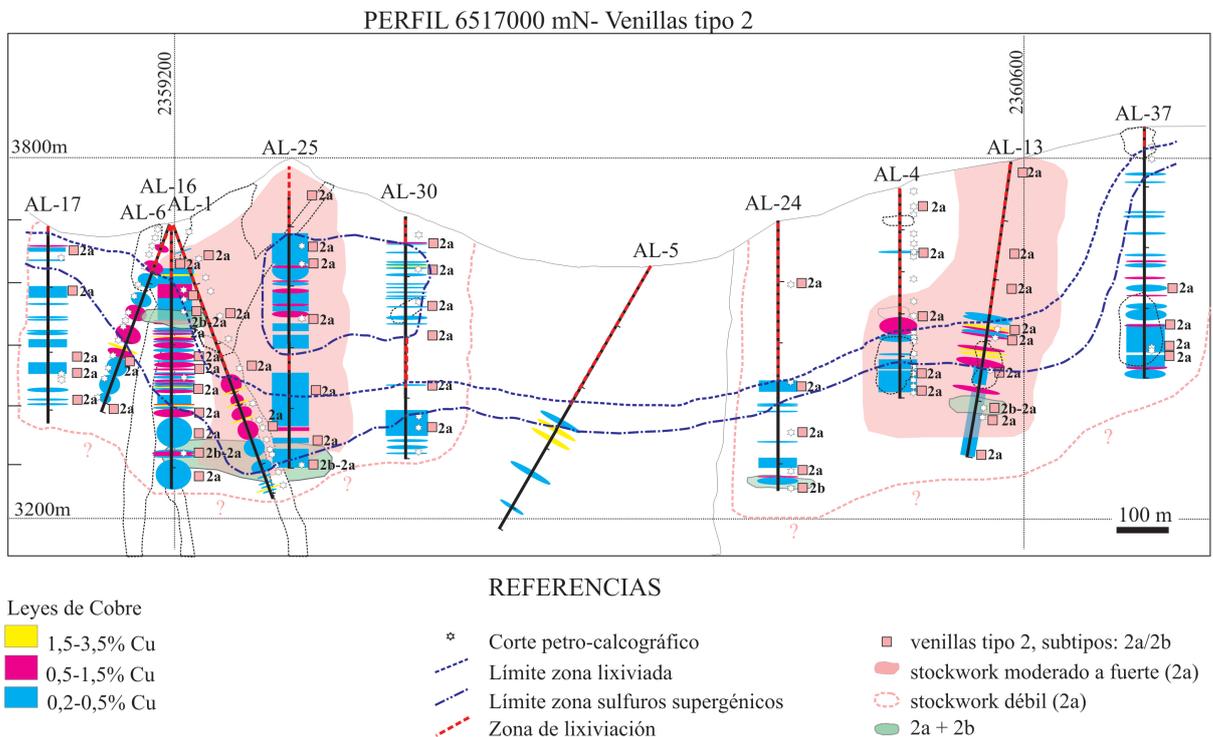
Figura 14. Distribución de las venillas 1 y 4 en el perfil 6516700 N y leyes de Cu.

### Venas y venillas tipo 3

Están caracterizadas por una mineralogía que consiste de cuarzo como mineral más abundante con cantidades subordinadas de molibdenita  $\pm$  calcopirita  $\pm$  pirita (Tabla 1). Sus espesores varían entre pocos milímetros a  $\sim$ 2 cm y tienen paredes rectas (Fig. 19A). En general no presentan halos, excepto cuando cortan a las andesitas del CVI con alteración potásica que muestran un halo de feldespato secundario  $\pm$  biotita (Fig. 19A).

En imágenes de catodoluminiscencia se reconocieron tres distintas generaciones de cuarzo en estas venillas. La primera generación de cuarzo (Cz-1), que constituye el 90% de la venilla, presenta granos subhaciales (0,2-1 mm) con luminescencia moderada y débil zonación de crecimiento euhedral (A) (Fig. 19B). Hacia el centro de la venilla aumenta el

tamaño de los cristales Cz-1, que se alinean con sus longitudes mayores perpendiculares a las paredes de la venilla. En el centro de la venilla, el Cz-1 está afectado por disolución y corrosión en microfracturas (textura “B”), y estos espacios han sido rellenados (textura “C”) por un cuarzo más joven (Cz-2) (Fig. 19C), de color gris oscuro en las imágenes CL y que carece de zonación de crecimiento (Fig. 19C). Los cristales laminares (<0,4 mm) de molibdenita se agrupan en una o varias bandas paralelas cerca de los márgenes de las venillas, donde cortan a Cz-1 (Figs. 19D, E y F). La última generación de cuarzo de color rojizo está en zonas irregulares en el contacto entre los granos de cuarzo y forma redes que cortan a los cuarzos previos (Fig. 20E); parece estar en contacto con la molibdenita. La calcopirita y la pirita (0,1-0,2 mm) son intersticiales entre los granos de cuarzo y acompañan a la molibdenita en cantidades muy subordinadas (Fig. 19G). Es común en estas venillas la reapertura y el relleno por microvenillas de pirita + calcopirita, anhidrita y calcita tardías. Todos estos minerales están en contacto con el cuarzo de tonalidad rojiza Cz-3 en el centro de la venilla (Fig. 19H).



**Figura 15.** Distribución de las venillas 2a y 2b en el perfil 6517000 N, localización de zonas de *stockwork* débil y moderado a fuerte de venillas 2a, zonas con venillas 2a y 2b y leyes de Cu.

Las venillas 3 casi siempre se encuentran en las rocas con alteración filica y muestran reaperturas muy comunes (Fig. 20A); cortan a las venillas tipo 2a (Fig. 20B). Son abundantes en el filo central, donde cortan al pórfido 4 y a las rocas de caja en contacto con este intrusivo en los niveles intermedios a profundos y con menor intensidad cortan al pórfido 2 a profundidades intermedias (Figs. 21, 22 y 23).