



Red DESIR

MÁSTER INTERNACIONAL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS MINERALES

TESIS DE MAESTRÍA

*“Las Inclusiones Fluidas como Guías de Exploración en
Depósitos de Minerales. Ejemplo:
El Pórfido de Cobre Lara
Ayacucho – Perú”*

Jorge Gilberto Acosta Ale

Setiembre, 2007





Red DESIR

**MÁSTER INTERNACIONAL
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS
RECURSOS MINERALES**

Línea: Recursos Minerales

TESIS DE MAESTRÍA

*“Las Inclusiones Fluidas como Guías de Exploración en
Depósitos de Minerales. Ejemplo:
El Pórfido de Cobre Lara
Ayacucho – Perú”*

Jorge Gilberto Acosta Ale

Setiembre, 2007



CURSO 2006-2007

**MÁSTER INTERNACIONAL
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS
MINERALES**

Como director del Trabajo,

Autorizo la presentación de la Tesis de Maestría

*“Las Inclusiones Fluidas como Guías de Exploración en
Depósitos de Minerales. Ejemplo:
El Pórfido de Cobre Lara.
Ayacucho-Perú”*

Realizado por

Jorge Acosta Ale

Bajo mi dirección

y

Humberto Chirif Rivera

José Macharé ordoñez

Firmado: **Prof. Ricardo Castroviejo**

Fecha:



Red DESIR

Constituido el tribunal nombrado por el Coordinador Internacional del Programa de Máster Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales, el día __ de _____ de 2007

Presidente: _____

Vocal: _____

: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis de Maestría el día el día __ de _____ de 2007

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO





Acta de Evaluación de Trabajo sobre Responsabilidad Medioambiental y Social

A fecha de 5/10/2007 se ha constituido la comisión integrada por los expertos citados al pie para evaluar los trabajos individuales presentados por los alumnos de la Maestría Internacional "Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales", en la línea "Recursos Geológicos para un Desarrollo Sostenible", así como la exposición y defensa públicas de dichos trabajos, estructurados en los tres grupos enumerados en Anexo 1. Las calificaciones son las que constan en Anexo 2.

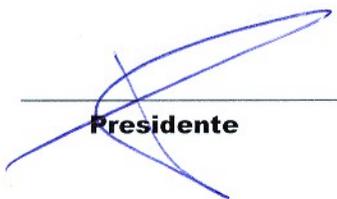
La comisión de evaluación está constituida por:

	Nombre y Apellidos
Presidente (a)	Ricardo Castroviño Bolívar
Secretario (a)	Santiago Español Cao
Vocal	Fredy Castillo Peña
Vocal	Humberto Chirif Rivera
Vocal	Sosé Machare Ordóñez

La comisión ha aplicado la siguiente escala de calificaciones, para este trabajo valorado con 1 crédito:

Escala de calificaciones	
Base	100
Insuficiente	<50
Suficiente	50-70
Notable	70-80
Sobresaliente	>80

Firmas



Presidente



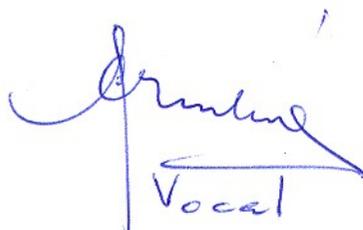
Secretario (a)



Vocal



Vocal



Vocal



Acta de Calificación de la Tesis de Maestría

En la ciudad de Lima, Perú, el día 05 de OCTUBRE de 2007 a las 10 horas, el candidato D. **Jorge Gilberto Acosta Ale**, presentó la defensa de su tesis titulada: LAS INCLUSIONES FLUIDAS COMO GUIAS DE EXPLORACION EN DEPOSITOS DE MISIONES: EST. EL PORFIDO DE COBRE-LAMA. AYAUCCO - PERU. requisito indispensable para obtener el título de Master en la Maestría Internacional "Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales".

El tribunal estuvo constituido por:

	Nombres y Apellidos
Presidente (a)	CÉSAR CANEPA I.
Secretario (a)	ROLANDO CARRASCAL M.
Vocal	HEINZ BERNHARDT.
Vocal	

Una vez presentada el tribunal lo declaró:

APROBADA con la puntuación de 85 (SOBRESALIENTE)

Basada en la siguiente escala:

Escala de calificaciones	
Base	100
Insuficiente	<50
Suficiente	50-70
Notable	70-80
Sobresaliente	>80

Firmas

Presidente (a)

Secretario (a)

Vocal

Vocal

ÍNDICE

	Pag.
RESUMEN.	I
ABSTRACT.	IV
AGRADECIMIENTOS.	VII
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Trabajos anteriores.	1
1.2. Ubicación y accesibilidad a la zona de estudio.	2
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Justificación.	3
1.5. Finalidad y Objetivos.	3
1.5.1. Generales.	3
1.5.2. Específicos.	4
1.6. Estado del arte.	4
1.6.1. Los pórfidos de cobre.	4
1.6.1.1. Ambiente geológico y tectónico.	4
1.6.1.2. Alteraciones hidrotermales y mineralización.	5
1.6.2. Las inclusiones fluidas.	10
1.6.2.1. Clasificación.	11
1.6.2.2. Requisitos para la validez del estudio de inclusiones fluidas.	12
1.6.2.3. Cambios posteriores a la formación de las inclusiones fluidas.	13
1.6.2.4. Aplicación en la exploración de minerales.	13
1.6.2.5. Principio básicos del análisis termométrico.	14
1.6.2.5.1. Calentamiento.	14
1.6.2.5.2. Congelación.	15
1.6.2.5.3. Estimación de la presión y la profundidad de captura.	17
1.7. Metodología.	19
1.7.1. Etapa de Campo.	19
1.7.2. Etapa de gabinete.	19
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO, TECTONOMAGMÁTICO Y METALOGÉNICO.	22

2.1. Marco geológico.	22
2.2. Marco metalogénico.	24
2.2.1 Provincia metalogénica.	24
2.2.2 Épocas metalogénicas	26
2.3. Marco tectonomagmático.	26
2.4. Geología del depósito.	29
2.4.1. Depósitos fluviales y aluviales.	29
2.4.2. Grupo Nazca.	29
2.4.3. Rocas Intrusivas.	32
2.4.4. Estructuras.	35
CAPÍTULO III: ALTERACIONES HIDROTERMALES Y MINERALIZACIÓN.	37
3.1. Introducción.	37
3.2. Evento hidrotermal A.	40
3.2.1. Evento A1: Alteración potásica.	40
3.2.2. Evento A2: Alteración propilítica.	42
3.3. Evento hidrotermal B: Alteración cuarzo-sericita.	42
3.4. Evento supérgeno: Alteración argílica.	45
3.5. Eventos hidrotermales C y D.	45
3.5.1. Evento C: Alteración potásica.	47
3.5.2. Evento D: Alteración cuarzo-sericita.	47
3.6. Mineralización.	51
3.6.1. Zona de sulfuros primarios.	51
3.6.2. Zona enriquecida.	52
3.6.3. Zona de óxidos de cobre.	52
3.6.4. Zona lixiviada.	52
3.7. Paragénesis.	55
CAPÍTULO IV: INCLUSIONES FLUIDAS.	56
4.1 Introducción.	56
4.2 Metodología.	56
4.2.1. Petrografía de inclusiones fluidas y selecciones de familias (FIF).	56
4.2.2. Cálculos termodinámicos y representación de resultados.	57
4.3 Caracterización de las inclusiones fluidas, temperaturas de homogenización, presión y profundidad de captura en la etapa hidrotermal A.	61
4.3.1. Inclusiones fluidas relacionadas a la etapa A1: Alteración potásica.	61
a) Tipos de inclusiones fluidas.	61

b) Composición del fluido.	62
c) Temperatura de homogenización.	63
d) Estimación de la temperatura, presión y profundidad de captura.	67
4.3.2. Inclusiones fluidas relacionadas a la etapa A1: Alteración propilítica.	69
a) Tipos de inclusiones fluidas	69
b) Composición de fluidos.	70
c) Temperatura de homogenización	72
4.4 Caracterización de las inclusiones fluidas, temperaturas de homogenización, presión y profundidad de captura en la etapa hidrotermal B: Alteración cuarzo-sericita.	74
4.4.1. Tipos de inclusiones fluidas.	74
4.4.2. Composición de fluidos.	75
4.4.3. Temperatura de homogenización	76
4.4.4. Estimación de la temperatura, presión y profundidad de captura	78
Resumen.	81
CAPÍTULO V: INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS	94

RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 1.1 Mapa de ubicación del Pórfido de cobre Lara.
- Figura 1.2 Vista panorámica al norte del pórfido de cobre Lara
- Figura 1.3 Distribución de zonas de alteración hidrotermal en un pórfido de cobre.
- Figura 1.4. Distribución de minerales de mena en un pórfido de cobre.
- Figura 1.5. Clasificación de inclusiones fluidas según su composición.
- Figura 1.6. Distribución idealizada de inclusiones fluidas.
- Figura 1.7 Diagrama de fases P-T del agua.
- Figura 1.8 Gráfico de solubilidad para NaCl y KCl.
- Figura 1.9 Isotermas del sistema H₂O-NaCl.
- Figura 1.10 Equipo de inclusiones fluidas FLUID INC.
-
- Figura 2.1 Mapa geológico regional.
- Figura 2.2 Provincia metalogénica donde se encuentra el pórfido de cobre Lara.
- Figura 2.3 Época metalogénica donde se encuentra el Pórfido de cobre Lara.
- Figura 2.4 Esquemas de secciones tectonomagmáticas del margen central de los Andes del norte de Chile y sur del Perú.
- Figura 2.5 Ignimbritas del Grupo Nazca cubriendo a la cuarzo diorita en la Quebrada Socos.
- Figura 2.6 Mapa geológico del Pórfido de cobre Lara.
- Figura 2.7 Sección geológica A-A´.
- Figura 2.8 Fotos de afloramientos y microfotografías de luz transmitida de secciones delgadas de cuarzo diorita, granito y pórfido dacítico.
- Figura 2.9 Tipos de diques que atraviesan el pórfido de cobre Lara.
- Figura 2.10 Principales sistemas de fallas que atraviesan el pórfido de cobre Lara.
-
- Figura 3.1. Map a de alteraciones hidrotermales del Pórfido de cobre Lara.
- Figura 3.2. Secciones de interpretación geológica (A-A´), alteraciones hidrotermales (B-B´) y mineralización (C-C´) del Pórfido de cobre Lara.
- Figura 3.3 Fotos de muestras de taladros de perforación, muestras de mano y secciones delgadas de la zona de alteración potásica del evento hidrotermal A.
- Figura 3.4 Fotos de afloramientos, muestras de mano y secciones delgadas de la zona de alteración propilítica.

Figura 3.5 Fotos de afloramientos, muestras de mano, taladros de perforación y secciones delgadas de la zona de alteración fílica.

Figura 3.6 Fotos de afloramientos, muestras de mano y secciones delgadas de la zona de alteración argílica.

Figura 3.7 Fotos de afloramientos, muestras de mano y secciones delgadas de los eventos hidrotermales C y D.

Figura 3.8 Fotos de afloramientos y microfotografías en luz reflejada de las zonas de óxidos de cobre y sulfuros primarios.

Figura 4.1 Inclusiones fluidas primarias y secundarias encontradas en el Pórfido de cobre Lara.

Figura 4.2 Tipos de inclusiones fluidas según su composición.

Figura 4.3 Tipos y tamaños de inclusiones fluidas en la zona de alteración potásica.

Figura 4.4 Rango de salinidades de los diferentes tipos de inclusiones fluidas en la zona de alteración potásica

Figura 4.5 Histogramas de frecuencia de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración potásica.

Figura 4.6 Temperaturas de homogenización de los diferentes tipos de inclusiones fluidas en la zona de alteración potásica.

Figura 4.7 Histogramas de frecuencia de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración potásica.

Figura 4.8 Gráficos de salinidad versus temperatura de homogenización en la zona de alteración potásica.

Figura 4.9 Tamaños de inclusiones primarias y secundarias Tipo I en la zona de alteración propilítica.

Figura 4.10 Rango de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración propilítica.

Figura 4.11 Histogramas de frecuencia de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración propilítica.

Figura 4.12 Temperaturas de homogenización de las inclusiones fluidas en la zona de alteración propilítica.

Figura 4.13 Histogramas de frecuencia de temperaturas de homogenización de las inclusiones fluidas en la zona de alteración propilítica.

Figura 4.14 Tipos y tamaños de inclusiones fluidas en la zona de alteración cuarzo-sericita .

Figura 4.15 Rango de salinidades de los Tipos I y II de inclusiones fluidas en la zona de alteración cuarzo-sericita.

Figura 4.16 Histogramas de frecuencia de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración cuarzo-sericita.

Figura 4.17 Histograma de frecuencias de temperaturas de homogenización de inclusiones primarias de la zona de alteración cuarzo-sericita.

Figura 4.18 Temperaturas de homogenización de los diferentes tipos de inclusiones fluidas en la zona de alteración cuarzo-sericita.

Figura 4.19 Histogramas de frecuencia de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración cuarzo-sericita.

Figura 4.20 Gráficos de salinidad versus temperatura de homogenización en la zona de alteración cuarzo sericita.

Figura 4.21 Gráfico de salinidad versus temperatura de homogenización que muestra la evolución de los fluidos hidrotermales durante el evento hidrotermal A.

Figura 4.22 Gráfico de salinidad versus temperatura de homogenización que muestra la evolución de los fluidos hidrotermales durante el evento hidrotermal B.

Figura 5.1 Evolución de los fluidos en los eventos hidrotermales A y B en el Pórfido de cobre Lara.

Figura 5.2 Relación de la salinidad de las inclusiones fluidas Tipo I del evento de mineralización económica con la edad y los recursos con los pórfidos de cobre chilenos y el Pórfido de cobre Lara.

RELACIÓN DE CUADROS

Cuadro 3.1 Tipos de alteración hidrotermal y asociación de minerales.

Cuadro 3.2 Tipos de vetillas en las zonas de alteración hidrotermal.

Cuadro 3.3 Asociación de sulfuros y óxidos en la mineralización hipógena y supérgena.

Cuadro 3.4 . Secuencia paragenética en la mineralización hipógena del pórfido de cobre Lara.

Cuadro 4.1 Resumen de la petrografía de inclusiones fluidas y su relación con los eventos hidrotermales en el Pórfido Lara.

Cuadro 4.2 Cuadro resumen que muestra la microtermometría y las condiciones de captura de las inclusiones fluidas en los eventos hidrotermales A y B del Pórfido de cobre Lara.

Cuadro 5.1 Comparación de tipos de inclusiones fluidas del Pórfido de cobre Lara con otros yacimientos porfiríticos de los Andes chilenos.

Cuadro 5.2 Comparación del tamaño de yacimientos tipo pórfido de cobre del Cretácico superior con el Paleoceno – Eoceno en el sur del Perú y Chile.

RESUMEN

El pórfido de cobre Lara se encuentra en la franja metalogénica de pórfidos de Cu-Mo del Cretácico superior en el sur del Perú.

En el depósito se han reconocido cuatro eventos hidrotermales, de los cuales los eventos A y B son los responsables de la mineralización económica en el yacimiento. Estos eventos hidrotermales están relacionados principalmente a la intrusión de la cuarzo monzonita, que se emplazó después de la cuarzo diorita de la Superunidad Tiabaya (78-80 Ma; Mukasa, 1985). Seguidamente, la intrusión de un pórfido dacítico dio más energía al sistema durante el evento B. Posteriormente, intrusiones graníticas estériles dan origen a los eventos hidrotermales C y D. Al final, diques de andesita y dacita cortan las unidades anteriores y son reconocidos como post mineralización.

Durante el emplazamiento de la cuarzo monzonita, controlado por un sistema de fallas sinistral N-S, se formaron las vetillas tipo A1: biotita-magnetita-calcopirita y A2: cuarzo-pirita-calcopirita con halo de biotita a temperaturas mayores que 460°C. El progreso del fallamiento N-S produjo una ebullición de los fluidos hidrotermales entre 440 y 460 °C y dio origen a fluidos hipersalinos (50% de NaCl) y salinos (25% NaCl eq). La composición de los fluidos estaba formada por un sistema salino H₂O-NaCl-KCl. Durante este episodio se formaron las vetillas tipo A3: cuarzo-ortoclasa, que cortaron las vetillas A1 y A2 y rellenaron fracturas del intrusivo precursor cuarzo diorita. Estas manifestaciones corresponden a la alteración potásica del evento hidrotermal A y se dieron en un medio dúctil bajo un régimen litostático. Las presiones fueron de 430 bares y el sistema se encontraba a una profundidad de 1 600 m.

La dilución por efectos de aguas meteóricas ocasionó el enfriamiento del sistema, donde las temperaturas descendieron desde 425 hasta 250°C. La salinidad de los fluidos fue neutralizada, disminuyendo hasta 5% NaCl eq. Durante esta etapa se desarrolló la alteración propilítica, y se formaron vetillas tipo A4: cuarzo-clorita-carbonatos-pirita que rellenaron las fracturas de la cuarzo diorita. Este episodio estuvo controlado por un sistema de fallas NE-SO.

Más adelante se reactivaron las fallas sinistral N-S y apareció el sistema estructural E-O. La intrusión de un pórfido dacítico en profundidad, incorpora más energía al sistema y el progreso del fallamiento sinistral N-S formó el corredor estructural en la Quebrada Aijaracancha. Aquí se formaron las fracturas SE donde circularon las soluciones hidrotermales del evento B con dos

tipos de fluidos, uno de altas temperaturas: 420 a 470°C y salinidades de 20 a 26% NaCl eq. y otro fluido de herencia del evento A (250°C @ 5% NaCl eq). Nuevos disequilibrios de presiones provocan una segunda ebullición a 380°C y una salinidad de 5% NaCl eq. en un régimen: dúctil-frágil. Durante esta etapa se formaron las vetillas con sutura tipo B1: cuarzo-sericita-calcopirita-pirita y tipo B2: cuarzo-pirita con halo de sericita. Las presiones alcanzaron 226 bares y la profundidad máxima se habría encontrado a 2 300 m bajo condiciones hidrostáticas. Sin embargo, es probable que la profundidad haya sido inferior y alcanzado los 850 m en condiciones litostáticas. Posteriormente, debido al enfriamiento del sistema y a la migración de los fluidos hidrotermales, las temperaturas descienden a 270 y 300 °C con salinidades de 10% NaCl eq.

La datación de 77.48 ± 0.53 Ma en sericita por el método Ar^{40}/Ar^{39} en el Pórfido de cobre Puquio (Rivera, 2006), sugiere una edad similar del evento hidrotermal B del Pórfido de cobre Lara, debido a que ambos yacimientos se encuentran en la franja metalogénica de pórfidos de Cu-Mo del Cretácico superior.

La microtermometría nos indica que la temperatura disminuyó desde 500 a 250°C partir de un evento magmático hidrotermal potásico (< 80 Ma) a una alteración cuarzo-sericita (~77.5 Ma). Estos dos episodios evolucionaron de un medio dúctil a presión litostática hacia un medio transicional: dúctil – frágil por pérdida de presión que lo aproxima un poco a condiciones hidrostáticas. El cambio en el estilo de mineralización también se ve acompañado por el cambio de líquidos hipersalinos que coexisten con vapor a un sistema hidrotermal de salinidad mas bajo (<10% NaCl eq).

Después de los eventos hidrotermales A y B y la caída de temperatura del sistema hidrotermal, ocurre un evento de alteración supérgena que origina la argilización y el enriquecimiento secundario de calcosita en el yacimiento.

Posteriormente, una intrusión granítica dio origen a los eventos hidrotermales C y D con alteración potásica y cuarzo sericita respectivamente. Estos eventos son considerados como estériles y presenta sólo trazas de calcopirita y pirita en vetillas C1 de cuarzo, las cuales son cortadas por vetillas D1 de cuarzo-sericita.

Un conjunto de diques andesíticos y dacíticos cortaron los granitoides anteriores y posteriormente el yacimiento fue cubierto por un evento piroclástico de tobas e ignimbritas en el Mioceno.

Finalmente el yacimiento fue erosionado, quedando exhumada parcialmente la alteración potásica.

El estudio de inclusiones fluidas en el Pórfido de cobre Lara de la franja metalogénica del Cretácico superior ha demostrado que el evento hidrotermal de mineralización económica tiene una salinidad menor (11% NaCl eq.) que la de los pórfidos de El Salvador y La Escondida del Paleoceno-Eoceno en Chile (19-40% NaCl eq.), los cuales tienen un mayor tonelaje.

Desde el punto de vista metalogénico regional se ha notado que los pórfidos de cobre del Cretácico superior tienen menor tonelaje que aquellos del Paleoceno-Eoceno en el sur del Perú (Cuajone, Quellaveco y Toquepala) y Chile (El Salvador y la Escondida), debido a que los depósitos más antiguos presentan niveles más profundos de erosión, exhumación de la alteración potásica y poco desarrollo de la zona de enriquecimiento secundario. En consecuencia, la mayor parte de la mineralización se encuentra en la zona primaria de baja ley.

ABSTRACT

The Lara porphyry copper deposit is located in the metallogenic belt of Cu-Mo porphyry copper deposits of late Cretaceous age, in southern Peru.

Four hydrothermal stages have been recognized in the deposit, two of which - stages A and B - are responsible for the economic mineralization. These hydrothermal stages are related mainly to a quartz-monzonite intrusion that was emplaced after the quartz-diorite of the Tiabaya Superunit (78-80 Ma; Mukasa, 1985). Subsequently, a dacitic porphyry intrusion gave more energy to the hydrothermal system during the stage B. Later on, barren granitic intrusions originated hydrothermal stages C and D. To the end, andesitic and dacitic dikes cut the previous units and they are recognized as post mineralization.

The emplacement of the quartz-monzonite was controlled by an N-S sinistral strike-slip fault system, the A1 veins: biotite-magnetite-chalcopyrite and A2 veins: quartz - pyrite-chalcopyrite with biotite halo were formed to more than 460°C. The N-S faulting development produced fluid hydrothermal boiling between 440 and 460 °C and hypersaline (50% NaCl) and saline fluids (25% NaCl eq). The fluid composition was formed by a saline system H₂O-NaCl-KCl. During this episode A3 veins: quartz-orthoclase were formed, cut the A1 and A2 veins and they filled fractures of the quartz-diorite precursor intrusive. These manifestations correspond to the potassic alteration of the hydrothermal stage A and they happened in a ductile environment under lithostatic regime. The capture pressures were 430 bars and the system was to 1 600 m of depth.

The introduction of meteoric waters caused the cooling of the system, where the temperatures descended from 425 up to 250°C. The salinity of the fluids was neutralized, diminishing up to 5% NaCl eq. During this stage the propilitic alteration was developed, and A4 veins: quartz-chlorite-carbonate-pyrite were formed filling fractures of the quartz-diorite. This episode was controlled by a system of NE-SW faults.

During the next stage, N-S sinistral strike-slip fault system was reactivated and the structural system E-W appeared. The dacitic porphyry intrusion in depth, incorporated more energy to the system and the progress of the N-S sinistral faulting formed the structural corridor in the Aijaracancha valley. Here, new SE fractures formed and hydrothermal fluids of the stage B circulated with two types of fluids: one of high temperature: 420 to 470°C and salinity from 20

to 26% NaCl eq., and another inheritance fluid of the stage A (250°C @ 5% NaCl eq). New imbalances of pressures caused a second boiling to 380°C and a salinity of 5% NaCl eq. in a ductile-fragile regime. During this stage, B1 veins with suture: quartz-sericite-chalcopyrite-pyrite and B2 veins: quartz-pyrite with sericite halo were formed. The pressures reached 226 bars and the maximum depth would have been about 2 300 m under hydrostatic conditions. However, it is probable that the depth has been less and reached the 850 m under lithostatic conditions. Later on, due to the cooling of the system and to the migration of the hydrothermal fluids, the temperatures descended to 270 - 300°C with salinities of 10% NaCl eq.

Considering the hydrothermal sericite age of 77.48 ± 0.53 Ma in the Puquío porphyry copper deposit (Rivera, 2006), the similarity between this deposit and the Lara deposit, and the location of both deposits within the metallogenic belt of Cu-Mo porphyry copper deposits of late Cretaceous age, lead us to suggest a similar age for the hydrothermal stage B of the Lara porphyry copper deposit.

The microthermometry indicates that the temperature decreased from 500 to 250°C from a potassic magmatic hydrothermal stage (<80 Ma) to a quartz-sericite alteration a (~77.5 Ma). These two episodes evolved from a ductile environment with lithostatic pressure toward a transitional environment: ductile-fragile for loss of pressure that approaches to hydrostatic conditions. The change in the mineralization style is also accompanied by the change of hypersaline fluids that coexisted with vapour to a hydrothermal system with lower salinity (<10% NaCl eq).

After the hydrothermal stages A and B and the fall of temperature of the system, a supergenic alteration event originated the argillization and the secondary enrichment with deposition of chalcosite.

A late granitic intrusion telescoped the main system, originating hydrothermal stages C and D with potassic and quartz-sericite alteration respectively. These stages are considered as barren and they only yield chalcopyrite and pyrite traces in C1 quartz veins, which are cut by quartz-sericite D1 veins.

Andesitic and dacitic dikes cut the previous granitoids and Miocene tuffs and ignimbrites covered the mineral deposit. Finally, the region was eroded, exhumating partially the potassic alteration.

The study of the fluid inclusions in the Lara deposit of the metallogenic belt of Cu-Mo porphyry copper deposits of upper Cretaceous has demonstrated that the hydrothermal stage of economic mineralization had a smaller salinity (11% NaCl eq.) than that of El Salvador and La Escondida Paleocene-Eocene deposits in Chile (19-40% NaCl eq.), which have a bigger tonnage.

From the regional metallogenic point of view, it has been noticed that the upper Cretaceous porphyry copper deposits have smaller tonnage than those of Paleocene-Eocene age in southern Peru (Cuajone, Quellaveco and Toquepala) and Chile (El Salvador and La Escondida), because the oldest mineral deposits have deeper levels of erosion, exhumation of the potassic alteration and little development of the secondary enrichment zone. In consequence, most of the mineralization is located in the low grade primary zone.

AGRADECIMIENTOS

El estudio: “Las Inclusiones Fluidas como Guías de Exploración en Depósitos de Minerales. Ejemplo: El Pórfido de Cobre Lara” ha sido posible gracias al apoyo del Ing. Robert Plenge, Gerente de Minas Dixon S.A. por permitir el estudio de este yacimiento.

De igual manera mis agradecimientos van al Dr. José Macharé y al Dr. Victor Carlotto del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) por las facilidades brindadas para terminar este estudio.

A mis asesores Dr. Ricardo Castroviejo, Dr. Humberto Chirif y Dr. José Macharé por la revisión, corrección y sugerencias para presentar esta investigación.

A Jorge Quispe, por compartir sus experiencias en los trabajos de campo y sus recomendaciones para mejorar esta investigación.

A Edilberto Mena y Teresa Velarde (INGEMMET) por la preparación de muestras y estudios de PIMA respectivamente, así como a Lázaro Sánchez de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid-España (ETSI-UPM) por su ayuda en la preparación de muestras.

A las autoridades de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid por el apoyo brindado durante mi estancia en España y permitir el uso del Laboratorio de Microscopía Aplicada y de Inclusiones Fluidas, instrumentación adquirida mediante los proyectos GR92-0135, UE95-0007 y UE98-0027 del Ministerio de Educación y Cultura (MEC) - España y mediante Fondos FEDER de la UE.

A mis compañeros del Laboratorio de Microscopía Aplicada y de Inclusiones Fluidas de la ETSI-UPM, a Andrés Yparaguirre por su ayuda en el manejo del equipo de inclusiones fluidas, a Jorge Casaverde y Juan Carlos Sarmiento por sus sugerencias en el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de la Dirección de Recursos Minerales y Energéticos del INGEMMET, Jorge Chira, Raymod Rivera y Víctor Sánchez por la revisión del manuscrito y sugerencias.

Este trabajo va dedicado:

*A mis padres Amalia y Adalberto,
que siempre apoyaron mis decisiones
y desde la distancia están
al pendiente mío.*

*A Miryam,
fuente de inspiración para vivir
que me hace feliz con su motivación
en mi quehacer diario.*

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El pórfido de cobre Lara se ubica en el flanco pacífico de la Cordillera Occidental de los Andes del Perú, dentro del Batolito de la Costa de edad Cretáceo. El batolito está compuesto por granitoides que varían desde dioritas a granitos, el cual ha sido intruído por pórfidos y aplitas del Paleógeno-Neógeno que habrían sido responsables de la mineralización del depósito.

El Pórfido de cobre Lara está alineado con los pórfidos de cobre del Paleoceno-Eoceno más grandes del sur del Perú, como son Toquepala, Cujone y Quellaveco y se encuentra dentro de la faja metalogénica del Cretáceo.

1.1. Trabajos anteriores.

Existen estudios anteriores que definen la geología regional del área de estudio (Castillo et al, 1993) donde describen una estratigrafía con secuencias silicoclásticas y carbonatos del Jurásico, intruídas posteriormente por el Batolito de la Costa durante el Cretáceo-Paleógeno. Estos depósitos están cubiertos por secuencias volcánicas del Neógeno y Plioceno, conformadas por lavas y coladas piroclásticas.

Posteriormente Nebocat et al., 1999 describe el descubrimiento del pórfido de cobre Lara, donde presenta su marco geológico local, zonas de alteración hidrotermal y mineralización del yacimiento. Las reservas estimadas sólo en cobre de enriquecimiento secundario llegarían a 20 Mt.

1.2. Ubicación y accesibilidad de la zona de estudio.

El pórfido Lara está localizado al sureste de la costa del Perú a 400 km de Lima. Se ubica en la provincia de Laramate del departamento de Ayacucho, a 40 km del poblado de Palpa que se encuentra en la Panamericana Sur. La elevación máxima es de 1850 msnm.



Figura 1.1 Mapa de ubicación del Pórfido de cobre Lara.

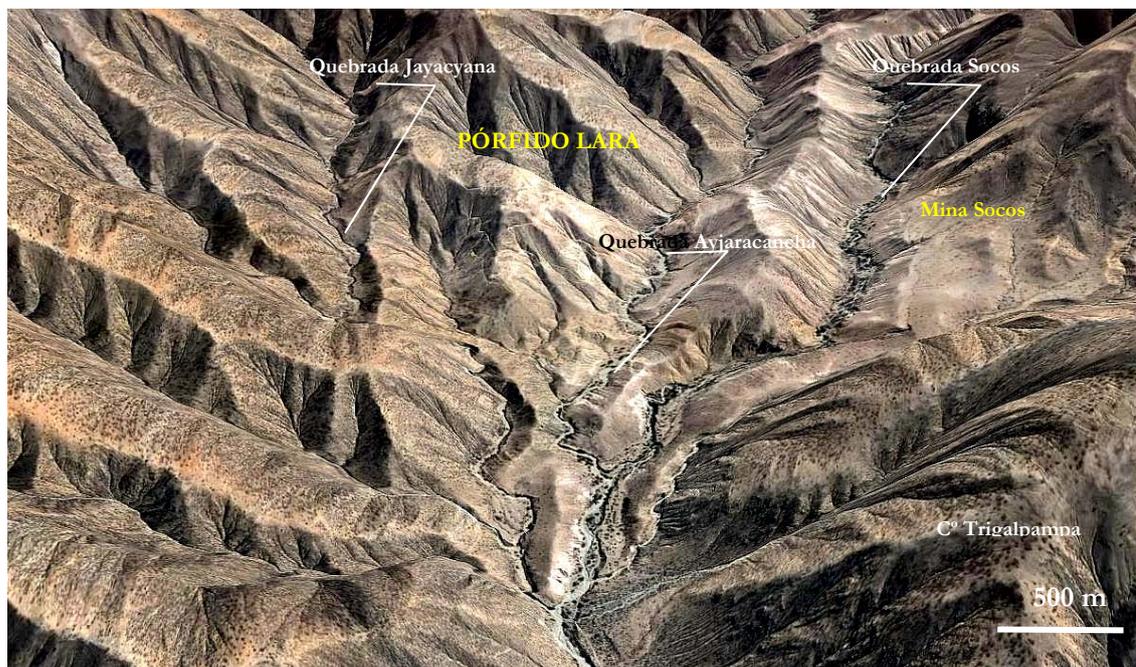


Figura 1.2 Vista panorámica con vista al norte del pórfido de cobre Lara. Imagen en color natural, tomada del Google Earth.

1.3. Planteamiento del problema.

Los eventos geológicos del área de estudio, así como la formación del depósito sólo se conocen por relaciones y descripciones de campo. No se ha presentado un estudio al detalle de la petrografía de las alteraciones hidrotermales y la mineralización. Estos datos son importantes ya que no se conoce cuál es el modelo sobre la evolución de los fluidos hidrotermales y cómo fue la génesis de la mineralización. Este tipo de modelo genético es posible solucionarlo con el estudio de las inclusiones fluidas. De la misma manera, se pretende difundir cuál es la aplicación práctica de las inclusiones fluidas para la búsqueda de pórfidos de cobre, es decir conocer cuál es la relación de la microtermometría y el tipo de fluidos con las zonas más ricas de un depósito de cobre. Todas estas interrogantes, o al menos la mayor parte de ellas pretenden contribuir al estudio de los pórfidos de cobre.

1.4. Justificación.

El estudio del pórfido de cobre Lara, el cual se encuentra cerca de la deflexión de Abancay (lugar donde los Andes toma una dirección O-E), es la clave para explicar por qué la faja de depósitos de cobre que vienen desde el norte de Chile y continúa en el sur del Perú disminuyen en tamaño (tonelaje) y leyes. La comparación de estos resultados con otros estudios de inclusiones fluidas de los pórfidos del sur del Perú y norte de Chile nos ayudará a explicar este tema.

Desde el punto de vista regional, este trabajo nos ayudará a conocer mejor la evolución metalogénica de los pórfidos de cobre en el sur del Perú.

1.5. Finalidad y Objetivos.

1.5.1. Generales.

Contribuir a la exploración de pórfidos de cobre mediante una guía práctica de aplicación de las inclusiones fluidas.

1.5.2. Específicos.

- Definir el tipo de inclusiones fluidas que identifica cada etapa hidrotermal.

- Estudiar la naturaleza de los fluidos hidrotermales que formó la alteración y mineralización.
- Determinar la temperatura de formación de los fluidos mineralizantes.
- Determinar la presión y profundidad a la que se formó la mineralización.
- Encontrar zonas de ebullición y su profundidad de formación.
- Estudiar la evolución de los fluidos hidrotermales durante las etapas hidrotermales.

1.6. Estado del arte.

1.6.1. Los pórfidos de cobre.

Los pórfidos de cobre son grandes depósitos de minerales de Cu muy disperso, de baja ley y alto tonelaje. Están genéticamente relacionados con intrusiones ígneas epizonales, generalmente félsicas y comúnmente porfíricas. Se caracterizan por eventos intrusivos múltiples, enjambre de diques, brechas intrusivas y diques de cantos, donde la roca caja puede ser de cualquier tipo. Ambas pueden estar intensamente fracturadas. (Panteleyev, 1995).

1.6.1.1. Ambiente geológico y tectónico.

Los pórfidos ocurren dentro de cinturones magmáticos alrededor del mundo, y están espacialmente, temporalmente y genéticamente relacionados a intrusiones hipabisales dioríticas a graníticas que comúnmente tienen una matriz aplítica. Su edad varía desde el Fanerozoico y son típicos del Cenozoico, los cuales reflejan un dominado magmatismo relacionado a una tectónica de subducción y preservación en rocas jóvenes. (Seedorff et al., 2005)

Los tipos de intrusiones varían desde rocas faneríticas a stocks porfíricos, batolitos y dikes, raramente pegmatitas. El rango composicional va desde cuarzo dioritas calcoalcalinas a granodioritas y monzonitas. Comúnmente hay emplazamientos múltiples de fases intrusivas y una amplia variedad de brechas (Panteleyev, 1995)

La comprensión de los pórfidos de cobre depende de la determinación de edades de los eventos y de su correlación en diferentes lugares. Los sistemas con la ley más alta y exposición continua generalmente han sido basculados y desmembrados por una deformación postmineralización. Estos depósitos ocurren comúnmente en

clusters, encima de una o más cúpulas de la raíz de una intrusión intermedia a silícea. Las cámaras magmáticas operaron como sistemas abiertos con una recarga de magmas máficos, asimilación de paredes de rocas, cristalización e intrusión, pero las intrusiones mineralizantes no salieron (Seedorff et al., 2005).

Los pórfidos de cobre se forman en cinturones orogénicos de márgenes de placas convergentes, vinculados comúnmente a un magmatismo producido por la subducción. También están asociados a emplazamientos de stocks de alto nivel durante eventos tectónicos de extensión relacionados a fallas de rumbo y una extensión de tras-arco seguido por una acreción del margen continental (Panteleyev, 1995).

1.6.1.2. Alteraciones hidrotermales y mineralización.

Desde la aparición del clásico modelo de las zonas de alteración en un pórfido de cobre de Lowell & Gilbert (1970), el cual se ha utilizado con éxito en la búsqueda de nuevos depósitos, Makshev (2004) hace un recuento de la variación del modelo presentado por otros autores como: Gustafson & Hunt, 1975; Carten, 1986; Dilles & Einaudi, 1992 y Giggenbach (1997) y presenta un modelo que incorpora todos los aportes. (Figura 1.3)

Las etapas del proceso de alteración hidrotermal y mineralización de los sistemas de pórfidos de cobre andinos son bien descritos por Camus (2003), el cual hace una síntesis de varias fuentes que lo describen, del cual nos valdremos para explicar esta parte.

La formación de los sistemas porfiríticos se relacionan con las etapas más tardías del magmatismo félsico que incluye procesos ortomagmáticos, transicionales e hidrotermales (Burnham, 1967; 1979; 1997; Burnham y Ohmoto, 1980 in Camus, 2003).

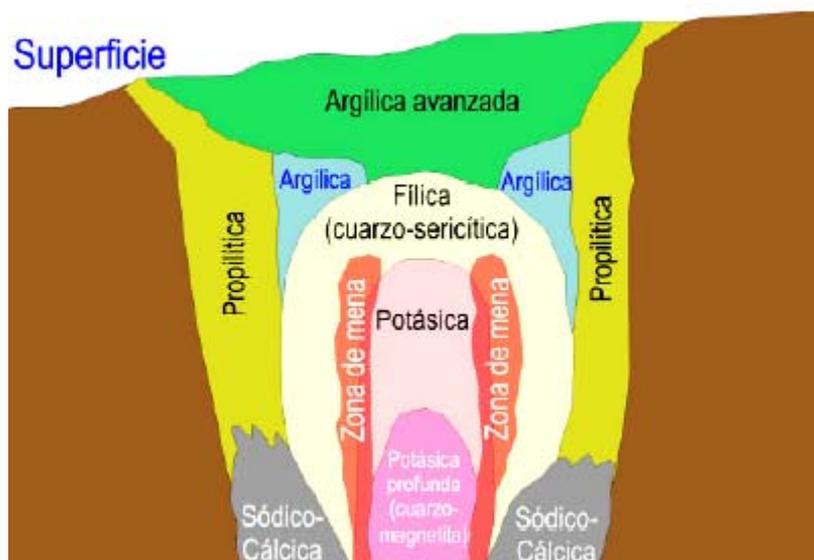


Figura 1.3 Distribución de zonas de alteración hidrotermal en un pórfido de cobre. Modelos combinados de Lowell y Gilbert (1970), Gustafson y Hunt (1975) y Giggenbach (1997). Núcleo de alteración potásica rodeado de alteración cuarzo-sericitica, alteración argílica intermedia local en torno a zona filica, halo externo de alteración propilitica, alteración sódico-cálcica profunda (Carten, 1986; Dilles & Einaudi, 1992) y cubierta de alteración argílica avanzada (in MaksaeV, 2004).

Los procesos ortomagmáticos están relacionados a la generación, emplazamiento y cristalización de magmas. Aquellos magmas que tienen que ver con la mineralización son moderadamente hidratados y ricos en metales; se originan de la fusión parcial del manto astenosférico o de la corteza continental inferior en zonas de subducción. Estos fundidos tienden a ser ricos en metales básicos y preciosos (Burnham, 1979 in Camus, 2003).

Etapa de alteración hidrotermal tardimagmática.

Conocida también como alteración potásica. Está asociada al emplazamiento de intrusivos portadores de la mineralización de cobre y oro (Gustafson & Hunt, 1975; Sillitoe, 1989). Se produce en condiciones de equilibrio con el magma fuente bajo temperaturas mayores que 300 °C a partir de fluidos altamente salinos (>35-40%p de ClNa equivalente). Se caracteriza por presentar mineralización de cobre-molibdeno o cobre-oro, feldespato potásico, biotita y anhidrita que reemplazan a los feldespatos, minerales máficos y rellenan vetillas EB y A (Gustafson & Quiroga, 1995; Gustafson & Hunt, 1975). A veces se reconoce rutilo y magnetita. Las vetillas EB consisten en biotita con albita, feldespato potásico, clorita actinolita,

anhidrita y sericita verde. Sin embargo, las vetillas A son sinuosas y están compuestas por cuarzo, feldespato potásico y anhidrita., acompañada por bornita y calcopirita. Contemporáneamente a la alteración potásica se origina la alteración propilítica, la cual forma una halo externo de menor temperatura constituido por clorita, epidota, carbonato y pirita. En ocasiones se puede encontrar albita, magnetita y hematita especular. Esta fase define los límites externos de los sistemas de pórfidos de cobre (Figura 1.4).

Las asociaciones de plagioclasa sodica-actinolita (alteración calcosódica) y albita-epidota-clorita-carbonato (alteración propilítica) se forman a partir de un fluido con baja acidez y por lo común carecen de minerales de mena.

Etapa transicional.

Existe una etapa transicional entre las etapas tardimagmática y las hidrotermales posteriores (Gustafson & Hunt, 1975). Se forma por la disminución de las condiciones de presión y temperatura debido a la cristalización de los complejos intrusivos. La incorporación de flujos de aguas meteóricas hace descender la temperatura del sistema, notándose las primeras evidencias de los efectos retrógrados, los cuales se pueden distinguir en datos isotópicos y de inclusiones fluidas (Sheppard & Gustafson, 1976; Skewes & Atkinson, 1985). De esta manera, el sistema ha cambiado desde temperaturas magmáticas y presión litostática a condiciones hidrostáticas de menor temperatura. En esta etapa se inicia el metasomatismo de hidrógeno, representado por las vetillas de cuarzo tipo B. Estas vetillas son planas y llevan una sutura central con delgados halos de sericita (Gustafson & Hunt, 1975; Skewes & Atkinson, 1985). Durante esta etapa hay aporte de cobre, pero la molibdenita es más importante, la cual enriquece los núcleos internos en los pórfidos de cobre. No obstante, el origen de los fluidos también puede ser magmático, como se demostró en el pórfido de cobre de El Salvador (Chile). Allí se determinaron temperaturas de 450-500 °C en vetillas tipo B (Watanabe & Hedenquist, 2001).

Etapa de alteración hidrotermal dominante.

La etapa hidrotermal principal es conocida como la alteración cuarzo-sericita y se forma por el enfriamiento del sistema debido a la migración de los fluidos desde el magma fuente. Se desarrolla en condiciones de alta actividad S_2 , baja fugacidad O_2

y bajo cociente K^+/H^+ , donde la textura original de la roca es obliterada casi por completo. La asociación mineralógica comprende cuarzo, sericita, piritita con proporciones menores de calcopirita, bornita, enargita, esfalerita y galena. Localmente puede presentar anhidrita, turmalina y rara vez carbonatos. Las vetillas tipo D caracterizan esta alteración (Gustafson y Hunt, 1975) y son planares y continuas, compuestas por cuarzo junto con piritita con halos de sericita y a veces con clorita. Esta alteración puede profundizar y superponerse a las anteriores hasta reemplazarlas casi totalmente debido a la profundización del fracturamiento por súbitas descompresiones, producto de la disminución de la carga litostática y el consiguiente descenso de la transición dúctil-frágil (Fournier, 1999). El origen de esta fase se asocia a los procesos físicos y químicos (Tosdal & Richards, 2001) relacionados con la separación por enfriamiento, a partir de fluidos generados en condiciones supercríticas, de las fases líquida y vapor, que producen aumento de volumen con el siguiente incremento en el fracturamiento y la formación de chimeneas de brecha, dentro o sobre el techo del intrusivo. Los procesos químicos se relacionan con la relación entre el fluido de alta temperatura rico en SO_2 y el agua meteórica que forma H_2SO_4 (Burnham, 1979). Estudios de inclusiones fluidas en cuarzo de las vetillas D muestran baja salinidad (5-20‰ de ClNa equivalente) lo que sugiere la influencia de aguas meteóricas en esta etapa (Gustafson & Hunt, 1975; Skewes & Atkinson, 1985). No obstante, datos isotópicos obtenidos en muscovitas de la zona de alteración filica del El Salvador indicarían presencia de aguas magmática durante esta fase (Watanabe & Hedenquist, 2001). La mineralización de cobre que se introduce al sistema es menor en comparación con las anteriores (Figura 1.4).

Etapas de alteración hidrotermal tardía.

La etapa hidrotermal tardía representa la última fase de la alteración que afecta a los pórfidos y corresponde a la alteración argílica avanzada (Meyer & Hemley, 1967). Sillitoe (1995) ha reconocido que las zonas de alteración argílica avanzada forman recubrimientos de rocas alteradas (lithocaps) sobre los sistemas porfíricos en los diferentes distritos mineros del mundo y representan la expresión superficial de los pórfidos de cobre, así como de los depósitos de oro, molibdeno o de estaño. Esta alteración está compuesta por cuarzo calcedónico y alunita cristalizada, la que gradúa lateralmente a caolinita, dickita, sericita, pirofilita y diáspora (Sillitoe, 1995). En las partes profundas la mineralogía es de mayor temperatura y corresponde a andalucita y corindón (Sillitoe, 1995; Gustafson & Hunt, 1975). La mineralización sulfurada

está compuesta por pirita, marcasita, sulfosales de cobre (enargita, luzonita, tenantita/tetrahedrita) junto con bornita, calcosina y covelita primarias y forman rellenos de sulfuros a lo largo de las vetas. En los pórfidos de cobre andinos se puede apreciar la mayor parte de las características de estos lithocaps, los cuales son menos erosionados (Sillitoe, 1995), especialmente en el norte de Chile. Esta etapa de alteración hidrotermal tardía se produce por la acción de fluidos muy ácidos y relativamente oxidados y por las rocas ubicadas en un ambiente subvolcánico (Sillitoe 1995). Estos fluidos son ricos en HCl y SO₂, los cuales producen un pH entre 0 y 1 que origina una extensa lixiviación ácida en las rocas afectadas (Hedenquist, 1987), formando zonas de sílice oquerosa residual.

RESUMEN

Las observaciones típicas de la evolución temporal en los pórfidos de cobre parten de una etapa temprana de alta temperatura a otra de baja temperatura, pasando por asociaciones de biotita ± feldespato-K (alteración potásica) a asociaciones muscovita ± clorita (alteración sericitica), asociaciones de arcillas (alteración argílica avanzada e intermedia), lo cual es consistente con el progresivo aumento de la acidez y el cociente fluido-roca antes de su eventual neutralización. Aunque la alteración argílica avanzada es relativamente posterior en los depósitos donde esta superimpuesta en la mena y la alteración potásica, en los depósitos donde la alteración argílica avanzada (especialmente como cuarzo + alunita) es preservada espacialmente sobre la mena y comúnmente se extiende hasta la paleosuperficie, esta puede formarse al inicio, ampliamente contemporánea con la alteración potásica (Seedorff et al., 2005).

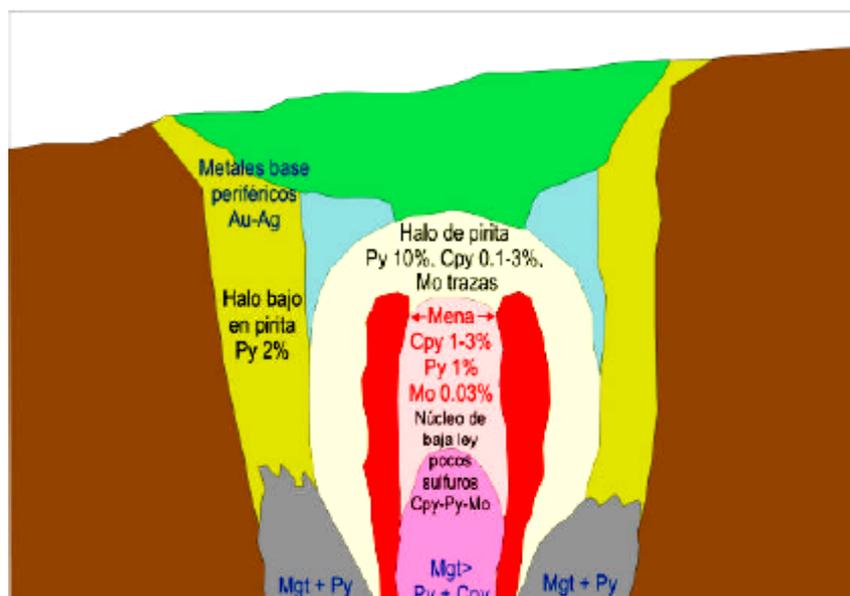


Figura 1.4. Distribución de minerales de mena en un pórfido de cobre. Py= pirita, Cpy = calcopirita, Mo = molibdenita, Mgt = magnetita (Maksaev, 2004).

1.6.2. Las inclusiones fluidas.

Las inclusiones fluidas son cantidades pequeñas de fluidos atrapados en cristales durante su crecimiento o bien introducen a lo largo de microfracturas y clivajes después de la cristalización del mineral que los contiene. Los fluidos guardan relación con los procesos hidrotermales magmáticos que han ocurrido en dicho depósito de minerales. (Shepherd, 1985).

Gracias a estas evidencias, se supone que las inclusiones fluidas han conservado las propiedades químicas y físicas de las soluciones originales, y se les considera como muestras directas de las fases volátiles. Los resultados de los estudios microtermométricos contribuyen a conocer su temperatura, presión, densidad y composición de los fluidos que originaron la mineralización.

1.6.2.1. Clasificación.

Al principio Nash (1976) propuso una clasificación referida a la composición de las inclusiones fluidas (Figura 1.5) donde distinguió cuatro tipos: a) Tipo I: tienen moderada salinidad y presentan una fase líquida de agua y otra fase gaseosa de vapor de agua con diferente volumen según la temperatura de captura; b) Tipo II, son ricas en gas (normalmente vapor de agua con más del 60% de la inclusión,

suelen interpretarse como buenos indicadores de ebullición, especialmente cuando coexisten con las de tipo I. Aunque sean predominantemente acuosas, pueden contener algo de CO_2 ; c) Tipo III, tienen alta salinidad y contienen pequeños cristales (minerales hijos) de halita de hábito cúbico a veces junto con silvita, anhidrita, hematita, pirita, calcopirita, magnetita, etc., los cuales pueden identificarse por sus características ópticas o cristalográficas o por técnicas de microanálisis; etc.; d) Tipo IV, tienen alto contenido de CO_2 , con una relación $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ variable pero casi siempre comprendida entre 3 y 30% del volumen (in Velasco, 2004).

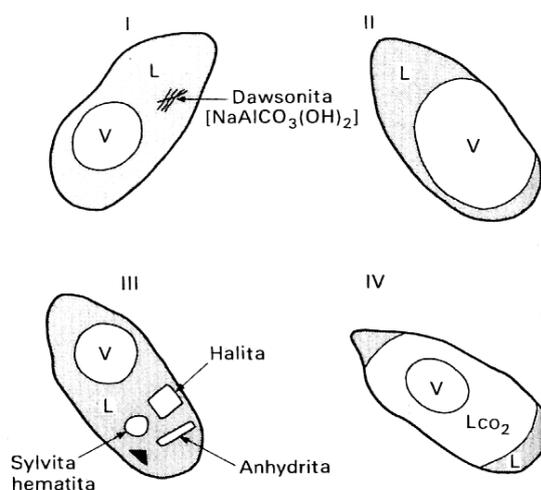


Figura 1.5. Clasificación de inclusiones fluidas según su composición. (Nash, 1976). L: líquido acuoso, V: vapor, L CO_2 : líquido CO_2 .

Roedder (1979) clasificó las inclusiones fluidas según su origen en: a) Primarias (P), identificadas por su desarrollo en las zonas de crecimiento de un cristal; b) Secundarias (S), se forman en microfracturas, planos de cizalla o planos de maclas de deformación en un cristal, las cuales son atrapadas durante la obturación de una fractura. Mas adelante, el mismo Roedder (1984) introdujo un nuevo tipo de inclusiones: c) Seudosecundarias (PS), son inclusiones que terminan en el límite de una zona de crecimiento de un cristal (Figura 1.6).

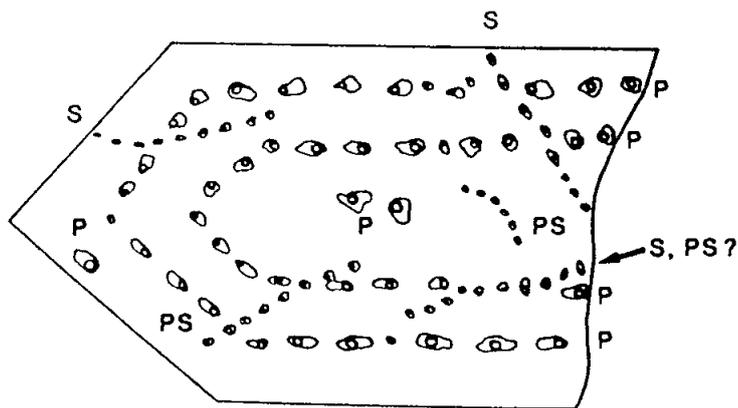


Figura 1.6. Distribución idealizada de inclusiones fluidas. Inclusiones de tipo P, S y PS en un cristal de cuarzo de sección paralela al eje c (Shepherd, 1985).

No obstante podemos encontrar otras clasificaciones como la de Shepherd et al., (1985), en la cual toma en cuenta las fases dominantes. Presenta una serie de dibujos típicos con las morfologías más frecuentes y las fases presentes a temperatura ambiente y propone más abreviaturas para simplificar su descripción (L= líquido; V = vapor, S = salinas; GL = vitreas).

1.6.2.2. Requisitos para la validez del estudio de inclusiones fluidas.

Las condiciones de pre-captura de la inclusión deben ser a partir de un fluido homogéneo (sólo una fase), ya sea en estado líquido, gaseoso o hipercrítico. Sin embargo, estas condiciones pueden prevalecer también en un sistema heterogéneo cuando ha existido un fluido en ebullición (Shepherd, 1985). Dentro de las inclusiones pueden haber cristalizado fases sólidas (minerales hijos) al disminuir la temperatura y presentarse una burbuja de gas, pero originalmente los componentes estaban disueltos en un fluido homogéneo.

Se debe demostrar que el cristal que ha atrapado la inclusión permanece sellado a los cambios químicos y que la inclusión representa un sistema cerrado (isoplético) desde su captura. Debido a la rigidez de los cristales y a que los fluidos tienen un coeficiente de expansión termal mucho más alto que el cristal que la encierra, se debe asumir que el volumen de la inclusión es constante (isocórico) desde su captura. Durante la post-captura se debe asumir que el volumen constante es realmente una aproximación, ya que las variaciones internas de presión pueden

causar una pequeña deformación elástica y el cambio en las condiciones de alta presión y temperatura en un cristal puede cambiar el volumen de la inclusión (Lacazette, 1993 in Goldstein & Reynolds, 1994).

1.6.2.3. Cambios posteriores a la formación de las inclusiones fluidas.

Las inclusiones pueden sufrir una serie de evoluciones que pueden afectar a su composición y forma. Estos cambios pueden ser de variaciones de volumen, pérdida de parte del fluido, estrangulamiento y decrepitación total (in Velasco 2004), los cuales afectan al cálculo de la temperatura de homogenización y salinidad de la inclusión fluida.

El cambio de volumen por sobrecalentamiento producido por metamorfismo se traduce por dilataciones y contracciones de las inclusiones rellenas de líquido (Bodnar y Bethke, 1984 in Velasco 2004). Estas deformaciones afectan a la temperatura de homogenización, conduciendo a sobre estimaciones erróneas.

La pérdida de fluido por difusión en el mineral huésped puede ser total o parcial y reequilibrada por fluidos secundarios y se puede comprobar durante la microtermometría, cuando al repetir las medidas sobre una misma inclusión los valores no son reproducibles.

El estrangulamiento es causado por la redisolución y recristalización durante la confinación del fluido y su enfriamiento, ocasionando diferencias en la temperatura de homogenización y algunas veces en su salinidad.

La decrepitación total debido a la deformación y el metamorfismo (Touret, 2001) en algunas inclusiones pueden llegar a romperlas con el consiguiente escape y pérdida de solución. De esta manera, las inclusiones afectadas parcialmente o adyacentes a las decrepitadas pueden tener salinidades y temperaturas de homogenización más altas.

1.6.2.4. Aplicación en la exploración de minerales.

Las inclusiones fluidas nos permiten obtener datos del sistema hidrotermal en el que se formó el mineral: temperatura (geotermometría), presión (geobarometría) y composición general del fluido, densidad del fluido.

Las inclusiones primarias y secundarias contenidas en los minerales de mena y ganga pueden ser utilizadas de manera indirecta como la huella digital de ciertos tipos de fluidos formadores de menas; para caracterizar asociaciones particulares de minerales de mena y definir las áreas dónde estos fluidos pueden concentrarse. También es posible predecir si las condiciones de estado de presión y temperatura, determinadas para el fluido, favorecen a la deposición de la mena (Shepherd, 1985).

1.6.2.5. Principios básicos del análisis termométrico.

Existe una amplia información sobre el estudio de inclusiones fluidas y el análisis termométrico descrito por Roedder (1984), Shepherd et al. (1985), Goldstein & Reynolds (1994), donde se describen ampliamente los principios básicos del análisis termométrico. En esta parte haremos un resumen de esta técnica.

1.6.2.5.1. Calentamiento.

Cuando se forma una inclusión a partir de un líquido homogéneo (L) a una presión y temperatura determinada, el líquido se enfría conservando su densidad a lo largo de una línea de igual densidad (isocora) en un diagrama de fases del H₂O. Su descenso continua por la isocora hasta interceptar la línea líquido - vapor, donde se forma una burbuja (L+V) y su enfriamiento prosigue por la línea de fase líquido – vapor (Figura 1.7).

De esta manera, si una inclusión se encuentra a la temperatura ambiente llena de L+V, en el laboratorio se puede invertir el proceso si se calienta la inclusión hasta el punto de desaparecer la burbuja. Es así como la temperatura medida corresponde a la temperatura de homogenización (Th), la cual es la temperatura mínima de captura del fluido hidrotermal. Pero como no conocemos la presión de captura del fluido, esta temperatura medida debe ser corregida para obtener la temperatura de captura (Tt) o de formación. De este modo, debemos hacer una corrección por presión:

$$T^{\circ} \text{ de captura} - T^{\circ} \text{ de homogenización} = \text{corrección por presión}$$

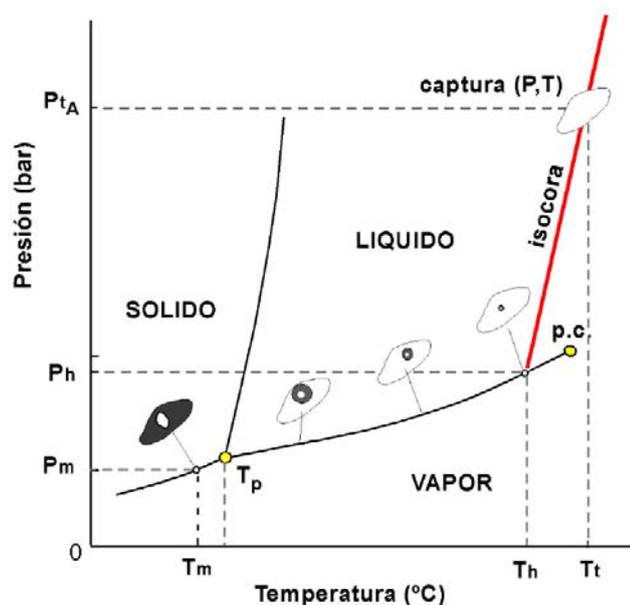


Figura 1.7 Diagrama de fases P-T del agua. Se muestra la diferencia que existe entre la temperatura de homogenización (T_h) a líquido y la temperatura de captura (T_t) de una inclusión. También se puede apreciar la trayectoria al descender la temperatura en un diagrama de fases de H_2O de un líquido (L) atrapado en una inclusión fluida ($V = \text{vapor}$) (in Velasco, 2004).

Sólo en el caso cuando la inclusión ha sido atrapada a partir de un fluido en ebullición (donde coexiste la fase líquida + gaseosa) tenemos que $T_h = T_t$, por lo que no es necesario hacer una corrección por presión.

1.6.2.5.2. Congelación.

Por otra parte, los fluidos hidrotermales son en general soluciones salinas y otro antecedente de interés a obtener de las inclusiones fluidas es la salinidad del fluido atrapado y esto se obtiene en términos relativos a partir de la temperatura de fusión del hielo de una inclusión, la que es dependiente de la salinidad de l fluido. Para determinar la temperatura de fusión se congela la inclusión, con nitrógeno líquido, mucho más allá de la temperatura de solidificación, porque por razones cinéticas no se congela inmediatamente. Luego se deja que su temperatura vuelva a subir gradualmente y se llega al punto en que comienza a derretirse, el que corresponde a la composición del eutéctico de 23,3% NaCl, luego comienza a disolverse la sal y cuando desaparece el último cristal de hielo se mide la temperatura. Esta última es la que interesa.

La temperatura de fusión del hielo nos permite determinar la salinidad del fluido en % peso NaCl equivalente de acuerdo a curvas determinadas experimentalmente. Cabe señalar que las inclusiones frecuentemente tienen otras sales disueltas Ej. KCl, NaCl, etc., pero como la determinación es indirecta se asume un sistema simple de H₂O + NaCl y se determina la salinidad relativa a este sistema.

Cuando no hay sales (sólidas) en la inclusión, la salinidad puede determinarse por la fórmula planteada por Potter (1977):

$$\% \text{ peso NaCl eq.} = 1,76958T_m - 4,2384 \times 10^{-2}T_m^2 + 5,2778 \times 10^{-4}T_m^3 \pm 0,028$$

Donde: T_m = temperatura en °C a la que se funde el último cristal de hielo en la inclusión.

La fórmula permite calcular la salinidad en el rango $-20,8^\circ\text{C} < T_m < 0^\circ\text{C}$ de temperaturas de fusión.

En inclusiones fluidas saturadas que contienen fases sólidas de sales hay que calentarlas para disolver la fase sólida y con la temperatura a la que se disuelve el último cristal de sal se puede determinar la salinidad por la fórmula:

$$\% \text{ peso NaCl eq.} = 26,218 + 0,0072T_s + 0,000106T_s^2 \pm 0,05$$

Donde: T_s = temperatura a la que el último cristal de sal se disuelve en la inclusión (en este caso no es la temperatura de fusión; hay que calentar la inclusión para que la sal se disuelva).

También puede estimarse la salinidad de inclusiones fluidas utilizando la temperatura de disolución de la halita o silvita (Figura 1.8).

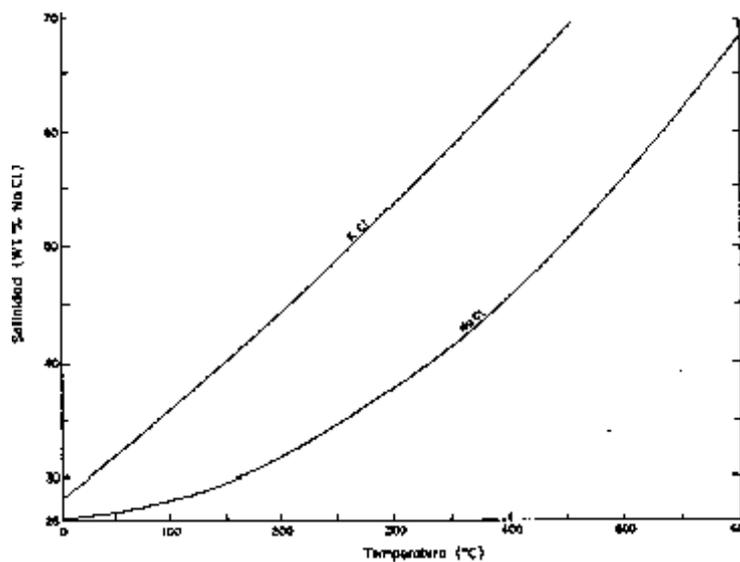


Figura 1.8 Gráfico de solubilidad para NaCl y KCl. En el eje X temperatura de disolución de halita o silvita y en el eje Y salinidad del fluido en la inclusión (Shepperd et al.,1985).

1.6.2.5.3. Estimación de la presión y la profundidad de captura.

La corrección de presión no es significativa en depósitos formados a bajas temperaturas y poca profundidad con fluidos salinos y densos, habitualmente en estos casos la corrección no excede de 25°C. Sin embargo, en minerales formados a altas temperaturas a partir de fluidos de baja salinidad y a profundidades mayores de 10 Km, la corrección puede exceder de 300°C. La corrección de presión se puede realizar si existen datos independientes de la profundidad en que se emplazó el depósito mineral hidrotermal y si la precipitación ocurrió en condiciones de presión hidrostática o litostática.

Si existió ebullición coexistirán inclusiones fluidas ricas en líquido con inclusiones ricas en vapor y ambas deberían homogenizarse dentro de un mismo rango de temperatura tanto a líquido como a vapor respectivamente (haciendo la salvedad que no es fácil determinar al microscopio la temperatura de homogenización de inclusiones ricas en vapor porque estas homogenizan justamente a vapor y es casi imposible apreciar la fina película de líquido que queda dentro de la inclusión antes que llegue a ser vapor homogéneo). Dadas estas condiciones la presión de fluido puede usarse para estimar la profundidad de captura asumiendo condiciones de presión hidrostática (sistema hidrológico abierto hacia la superficie) o condiciones litostáticas como se muestra en la figura siguiente (Figura 1.9).

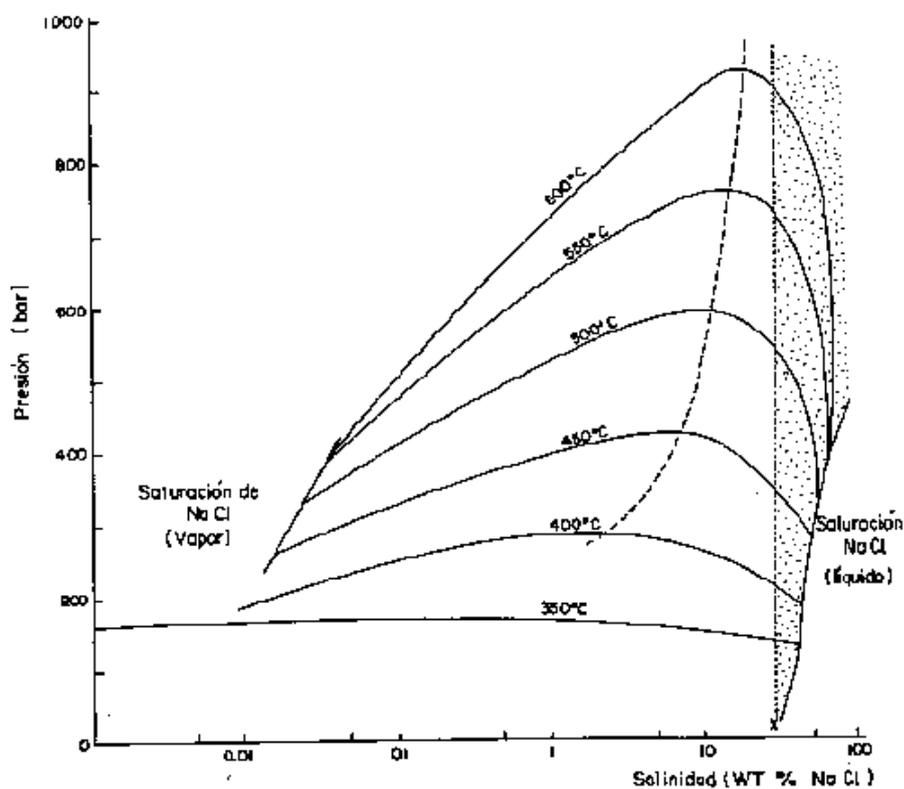


Figura 1.9 Isotermas del sistema H₂O-NaCl. Ilustra la relación entre la temperatura de ebullición, la presión en bares y el contenido salino de la solución (X = indica la saturación de la halita a temperatura ambiente).

En este caso particular la fórmula que relaciona la presión con la profundidad es:

$$P = h \cdot \rho \cdot g$$

Donde: h = profundidad, P = presión, ρ = densidad, g = aceleración de gravedad
Para simplificar los cálculos la profundidad (h) se expresa en m y la presión P en bares (Shepperd et al., 1985).

En la mayoría de los estudios de inclusiones fluidas la presión no se determina a partir de las inclusiones. Muchas inclusiones son atrapadas a presiones mayores que su presión de vapor y generalmente la presión a la que ocurrió se determina a partir de evidencias geológicas (Ej. a partir de reconstrucciones geológicas del material removido por erosión desde la formación del yacimiento); entonces esta presión se usa junto con datos termodinámicos para soluciones apropiadas para calcular la corrección por presión. Sin embargo, normalmente habrá incertidumbre en la composición del fluido y a priori no se puede asegurar si la inclusión fluida fue atrapada en condiciones hidrostáticas o litostáticas, de modo que habitualmente esta condición debe ser inferida. En consecuencia, la geobarometría de inclusiones fluidas es poco precisa y no es exacta ya que algunos de los métodos comunes usados para determinar presión de inclusiones fluidas dan valores de presión erróneos (Roedder, 1984).

Por otra parte, la densidad del fluido atrapado en una inclusión fluida puede derivarse de las relaciones de fase y la temperatura de homogenización de la inclusión. Esta es la única manera que tenemos de estimar la densidad del fluido hidrotermal que circuló durante la formación de un depósito mineral, lo que tiene importancia dado que la circulación de fluidos hidrotermales se debe principalmente a diferencias de densidad.

1.7. Metodología.

1.7.1. Etapa de Campo.

Para este trabajo se utilizó como base topográfica el mapa a escala 1:10 000 del pórfido de cobre Lara. Se hizo un reconocimiento y cartografiado tanto geológico como de las alteraciones hidrotermales.

Se tomaron 17 muestras para estudios de alteración hidrotermal, 5 para estudios de mineralización 12 para estudios de petrografía de inclusiones fluidas, de las cuales se seleccionaron sólo 6 muestras para el estudio de microtermometría.

1.7.2. Etapa de gabinete.

La preparación de las muestras para los estudios respectivos se realizó en el Laboratorio de Petrografía del Instituto Geológico Minero Metalúrgico de Perú (INGEMMET) y los estudios se llevaron a cabo en los laboratorios de Microscopía aplicada y de Inclusiones Fluidas de la Escuela de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid de España (UPM).

Se realizaron los estudios de petrografía, alteraciones hidrotermales y minerografía en secciones delgadas y pulidas en un microscopio OLYMPUS BX40 de luz transmitida y reflejada, con aumentos de 2.5X, 4X, 10X y 20X.

Seguidamente, se realizó la clasificación de las asociaciones minerales de alteración hidrotermal según Lowell y Guilbert (1970). La forma de ocurrencia de la alteración (penetrativa o vetiforme) se describió según Titley (1982). La simbología utilizada para designar las zonas de alteración corresponden a: K (potásica), S (filica), P (propilitica), Ch (cloritización), Q (silicificación). La intensidad de la alteración se realizó estimando el volumen que ocupaba en la roca, en una escala de 1 (10%) a 10 (100%). Así mismo, la forma de ocurrencia se calificó en una escala de 1 (para vetillas) a 10 (si era penetrativa). De esta manera, una codificación K-7-1 significa que el 70% de la muestra presenta una alteración potásica vetiforme.

Para el caso de la determinación de la asociación de minerales de arcillas en las zonas de alteración argílica, también se utilizó el equipo de espectrometría PIMA del Laboratorio de Petromineralogía del INGEMMET.

Posteriormente, se realizó el estudio de petrografía de inclusiones fluidas, la cual es la etapa más importante antes de hacer la microtermometría. En esta fase se seleccionaron los minerales y se caracterizaron las inclusiones fluidas para tomar las medidas. Para este fin, se utilizaron láminas transparentes doblemente pulidas (LTDP) con un espesor de 100 micrones y sin cubierta de vidrio.

Para el estudio de inclusiones fluidas se utilizó el equipo FLUID INC, adaptado del sistema de flujo gaseoso de calentamiento/enfriamiento de la USGS del Laboratorio de Inclusiones fluidas de la Universidad Politécnica de Madrid. El equipo consta de un microscopio Leitz Laborlux de luz polarizada con aumentos de 4X, 10X y 40X; una platina rectangular de movimiento X-Y, un monitor SONY Trinitron GVM1411QM y

una impresora termal de video MITSUBISHI P66E incorporada (Figura 1.4). El equipo utilizó consumibles de nitrógeno líquido y seco, así como aire comprimido.

El sistema de calentamiento/enfriamiento del equipo de inclusiones fluidas utiliza una platina de Reynolds, la cual tiene un rango de trabajo entre $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con la ayuda de patrones, la platina fue calibrada a tres temperaturas, las cuales representan el punto triple del CO_2 , ($-56.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) congelamiento ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) y punto triple del agua ($374.1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tiene una resolución de medida de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una precisión de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $-56.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+660.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fluid Inc, 1991). Su tasa de calentamiento/enfriamiento es de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y su estabilidad termal $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Shepherd et al., 1985).

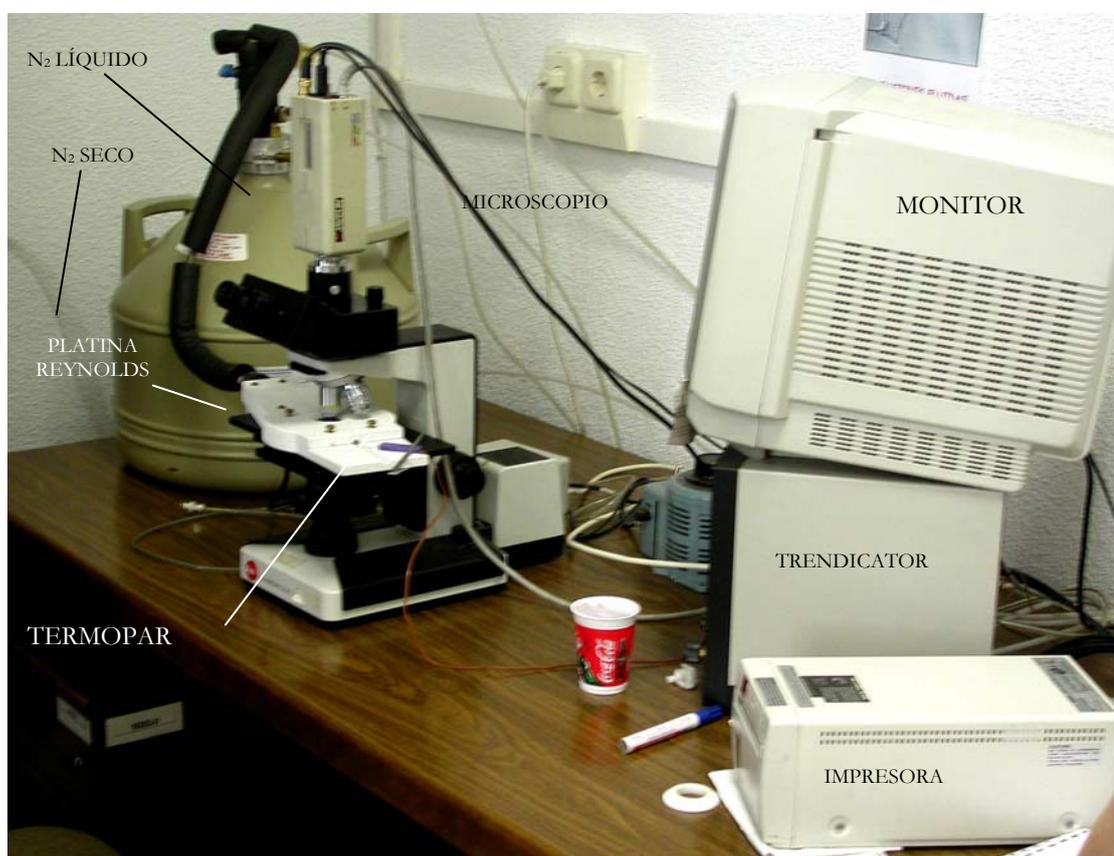


Figura 1.10 Equipo de inclusiones fluidas FLUID INC.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO, METALOGÉNICO Y TECTONOMAGMÁTICO

2.1. Marco geológico.

La zona de estudio se encuentra dentro del Batolito de la costa, el cual ha sido intruído por una serie de plutones más recientes que aparecen como granitos (Castillo et al., 1993) en la geología regional del área de Laramate que mas bien podrían llamarse como aplitas y pórfidos riolíticos (Nebocat et al., 1999). El Batolito de la costa ha sido cortado también por diques de composición andesítica y dacítica que también cortan a las intrusiones félsicas más jóvenes.

Las litologías más jóvenes en el área pertenecen al Grupo Nazca del Mioceno inferior, el cual consiste de flujos volcánicos subaéreos, aglomerados, brechas y tobas. Estas rocas están inalteradas y parecen ser posteriores al evento de intrusión-alteración del pórfido de cobre.

La geología regional muestra algunas estructuras como una serie de bloques fallados de dirección NO-SE que atraviesan el distrito, los cuales muestran desplazamientos relativos entre las litologías mencionadas. También se distinguen ejes de plegamiento NO-SE que corresponden al Grupo Nazca.

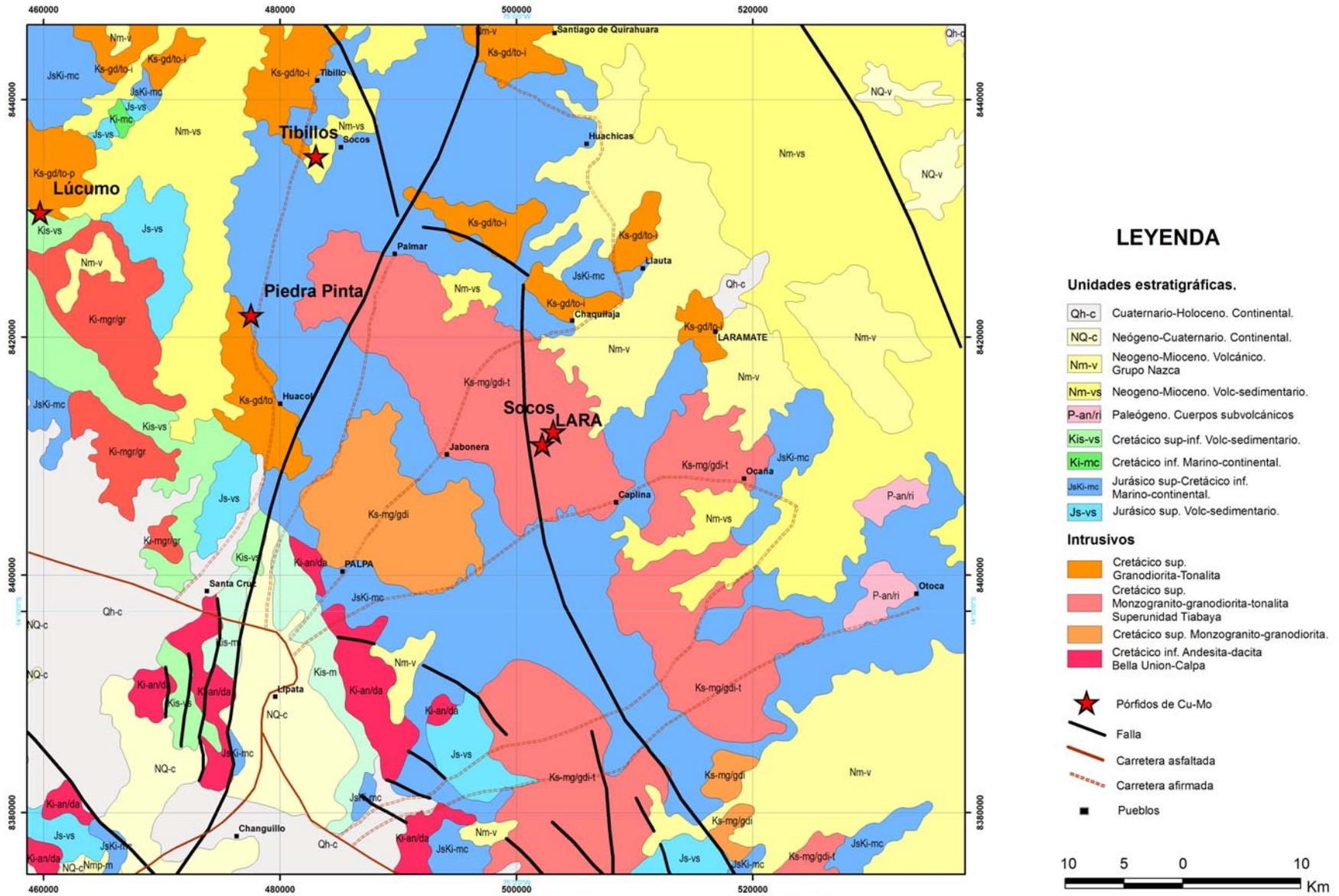


Figura 2.1 Mapa geológico regional.

2.2. Marco metalogénico.

2.2.1. Provincia metalogénica.

El pórfido de cobre Lara se encuentra en la Provincia de Cu del Flanco Pacífico de la Cordillera de los Andes, al Este de las provincias de Fe-Cu-Au de la Cordillera de la Costa y de Au-(Cu) Mesothermal del Batolito de la Costa (Figura 2.2).

La mayor parte de esta provincia está constituida por el Batolito de la Costa, cuya composición varía de gabros a granitos, predominando las tonalitas, granodioritas, adamelitas y dioritas. Hacia el oeste el Batolito aparece emplazado en formaciones volcánicas y volcánicas sedimentarias del Jurásico y Cretáceo inferior. En esta parte, el control estructural está dominado principalmente por fallas NO-SE que pueden pasar los 100 km, como es el caso de la Falla Cerrillos, la cual se extiende a lo largo de Marcona. Sin embargo, más al SE de la zona de estudio, las estructuras parecen ser más una prolongación del Sistema de Fallas Incapuquio (SFI) que viene desde Tacna.

El pórfido de cobre Lara se encuentra dentro del segmento de intrusivos de Arequipa, asociado principalmente a la Superunidad Tiabaya junto a un gran número de pórfidos de Cu-Mo como Socos, Huaracumi, Alondra, Marcahui y Durazno. La Superunidad Tiabaya proviene de magmas félsicos adakíticos (Pitcher et al., 1985). Más al NO de la zona de estudio existen otros pórfidos de cobre alineados con dirección SE-NO como Lúcumo, Tibillos y Puquio. Algunos de estos pórfidos se encuentran generalmente asociados a unidades menores de estos plutones y son descritas como unidades granulares intermedias félsicas (granodioritas, monzodioritas, etc), pero en general tienen gradaciones a pórfidos de pasta granular. Las alteraciones son típicas de los pórfidos de Cu, como la potásica, fílica y propilítica donde existen algunas asociadas con aureolas de skarn. No obstante, estas alteraciones no siempre se desarrollan de la manera más clásica y muchas veces forman parches irregulares indicando un débil desarrollo del sistema. En todos estos casos la presencia de calcopirita es escasa o nula y las zonas de oxidación ricas en Cu y de enriquecimiento secundario de Cu son escasas y pequeñas. De igual forma, en todos los casos la mineralización parece producto de un solo evento o pulso (Injoque, & Aranda, 2005).

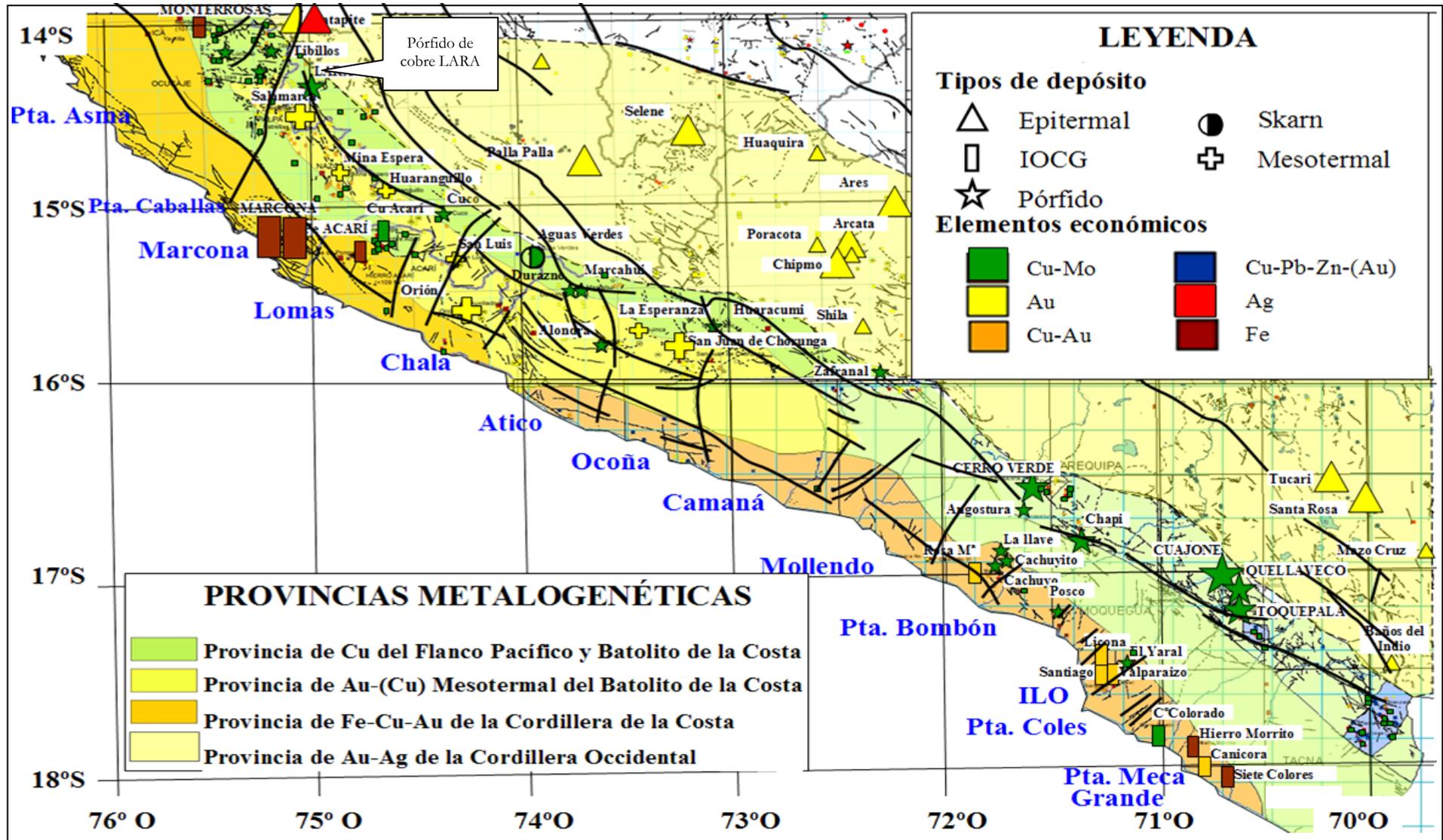


Figura 2.2 Provincia metalogénica donde se encuentra el pórfido de cobre Lara.

2.2.2. Épocas metalogénicas.

Desde la Cordillera de la Costa hasta el Flanco Pacífico de la Cordillera Occidental se han identificado tres épocas metalogénicas que comprende el Jurásico superior, Cretáceo inferior y Cretáceo superior. Estas épocas se hacen más jóvenes hacia el continente. Esto representa la migración sistemática de los arcos magmáticos hasta su ubicación actual en la Cordillera Occidental (Figura 2.3).

La mineralización del pórfido de cobre Lara no ha sido datada aun, sin embargo se encuentra dentro de la faja del Cretáceo superior junto con otros pórfidos de Cu-Mo, skarns de Cu-Mo-W y vetas de Au que ocurren en el Batolito de la Costa (Vidal et al., 1985). Hacia el NO está alineado con el pórfido de cobre-molibdeno Puquio, el cual ha sido datado en sericita hidrotermal por el método Ar^{40}/Ar^{39} en 77.48 ± 0.53 Ma (Rivera F, 2006). Hacia el SE está alineado con los pórfidos de cobre Cuco, Aguas Verdes, Durazno, Marcahui y Huaracumi que serían de esta misma época, ya que también se presentan alineados con los pórfidos que vienen del extremo SE del Perú, como Zafranal y Angostura (68 Ma: Quang et al., 2005).

2.3. Marco tectonomagmático.

Desde el Jurásico y Cretáceo inferior es probable que la Cordillera de la Costa, a la altura de Ica, se encontraba bajo un marco tectónico de extensión y transtensión de subducción de alto ángulo (Fig 2.4a) tal como sucedió más al sur del Perú y norte de Chile (Uyeda & Nakamori, 1979 in Camus 2003; Clark et al., 1990; Sillitoe & Perelló, 2005), bajo un magmatismo de composición basáltica-intermedia durante el Mesozoico medio – superior (Sillitoe, 2003; Sillitoe & Perelló, 2005). Esto podría estar evidenciado en parte por la Falla NO dextral “Treinta Libras” en Ica (Injoque, 2002). En estos lugares, este periodo esta caracterizado por una mineralización de tipo Fe-Cu-Au a lo largo de la Cordillera de la Costa, alojada principalmente como relleno de fracturas y en mantos en los depósitos de esta edad, tales como: Marcona, Mina Justa, Monterrosa y Hierro Acarí.

El origen del pórfido de cobre Lara esta relacionado al cambio del ángulo de subducción, que ocurrió al principio del Cretáceo superior, de un alto ángulo a otro menos inclinado o tipo chileno (Uyeda & Nakamori, 1979. En Camus 2003), el cual habría afectado también al sur del Perú. Esto se ve demostrado por el intenso magmatismo de la época reflejado en el Batolito de la Costa de la misma edad (Pitcher et al., 1985). Este cambio en la subducción ocasionó una modificación del marco tectónico de extensión a uno en compresión (Camus, 2003), interpretándose a este periodo como el inicio del engrosamiento cortical, vigente desde hace 100 a 120 Ma (Clark et al., 1990).

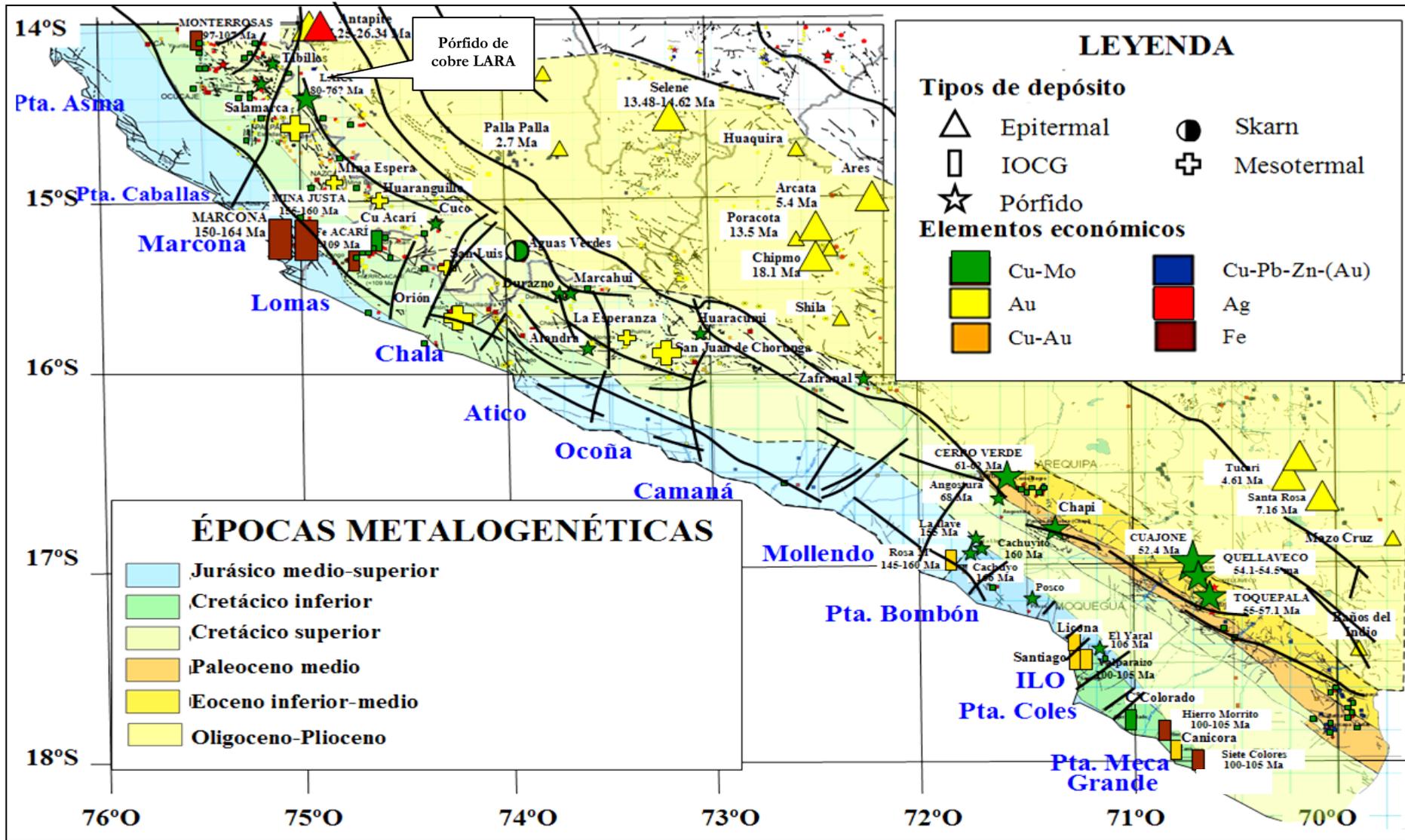


Figura 2.3 Época metalogénica donde se encuentra el Pórfido de cobre Lara.

A partir de este periodo las características de la mineralización cambian, predominando pequeños depósitos de tipo pórfido de cobre y rellenos de fracturas de oro y cobre principalmente (Fig 2.4 a). Esto se ve evidenciado con la alineación de pórfidos de cobre en la faja del Cretáceo superior en el Flanco Pacífico de la Cordillera Occidental (Fig 2.3).

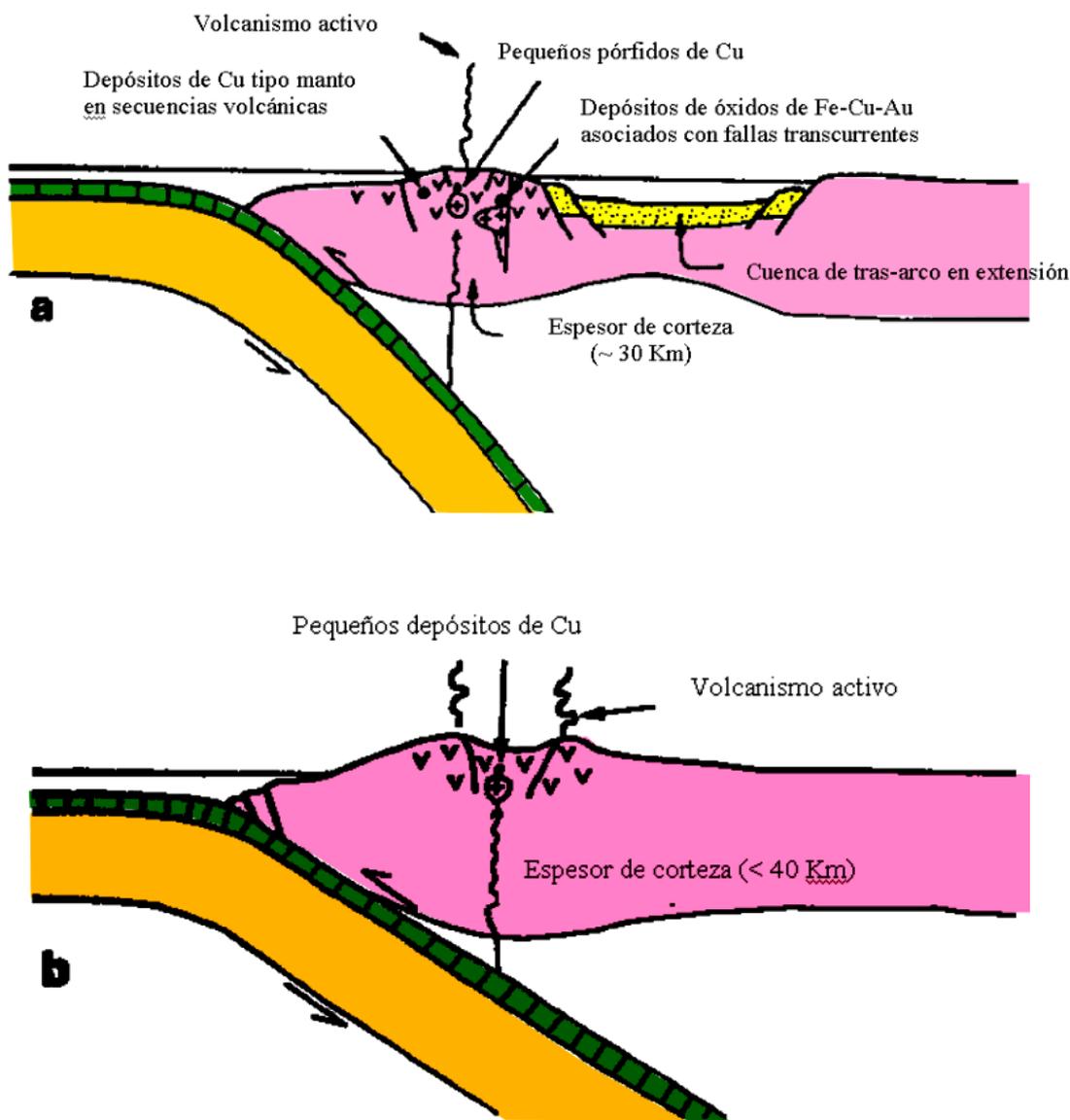


Figura 2.4 Esquemas de secciones tectonomagmáticas del margen central de los Andes del norte de Chile y sur del Perú. (a) Arco en extensión o transtensión: Faja del Jurásico-medio-Cretáceo inferior (Camus, 2003; Sillitoe & Perelló, 2005). (b) Arco magmático neutral a extensión media: Faja del Paleoceno-Eoceno-inferior (Sillitoe & Perelló, 2005).

2.4. Geología del depósito.

2.4.1. Depósitos fluviales y aluviales.

Los depósitos fluviales se encuentran rellenando valles y quebradas formando terrazas menores de 5 m y corresponden a secuencias granodecrecientes de gravas y arenas. Los depósitos aluviales se encuentran en la base de las secuencias fluviales y corresponden a depósitos caóticos de huaycos con bloques de hasta 3 m sostenidos en una matriz limoarcillosa.

2.4.2. Grupo Nazca.

Corresponde a una secuencia de rocas volcánicas de naturaleza tobácea que afloran en la parte oriental del distrito. Estas rocas se encuentran cubriendo la cuarzo diorita, cuarzo monzonita y granitos que pertenecen al Batolito de la Costa (Fig 2.5). Litológicamente, el Grupo Nazca está constituido por tobas blanco-amarillentas y pardo rosadas, de grano medio a grueso, y composición riolítica, riodacítica y traquiandesítica; en bancos gruesos con marcada disyunción columnar (Castillo et al., 1993). Estos depósitos provienen de una caldera ubicada en Pampa Galeras (Noble et al., 1979).

Dataciones radiométricas indican edades antiguas de 22.4, 20.5, 23.2 y 18.7 Ma y señalan al Grupo Nazca de edad Mioceno inferior, contemporáneo con el volcánico Huaylillas del sur del país, el mismo que descansa en discordancia sobre el Grupo Tacaza (Noble et al., 1979). El Grupo Nazca representa el último evento volcánico en la zona de estudio.



Figura 2.5 Ignimbritas del Grupo Nazca cubriendo a la cuarzo diorita en la Quebrada Socos.

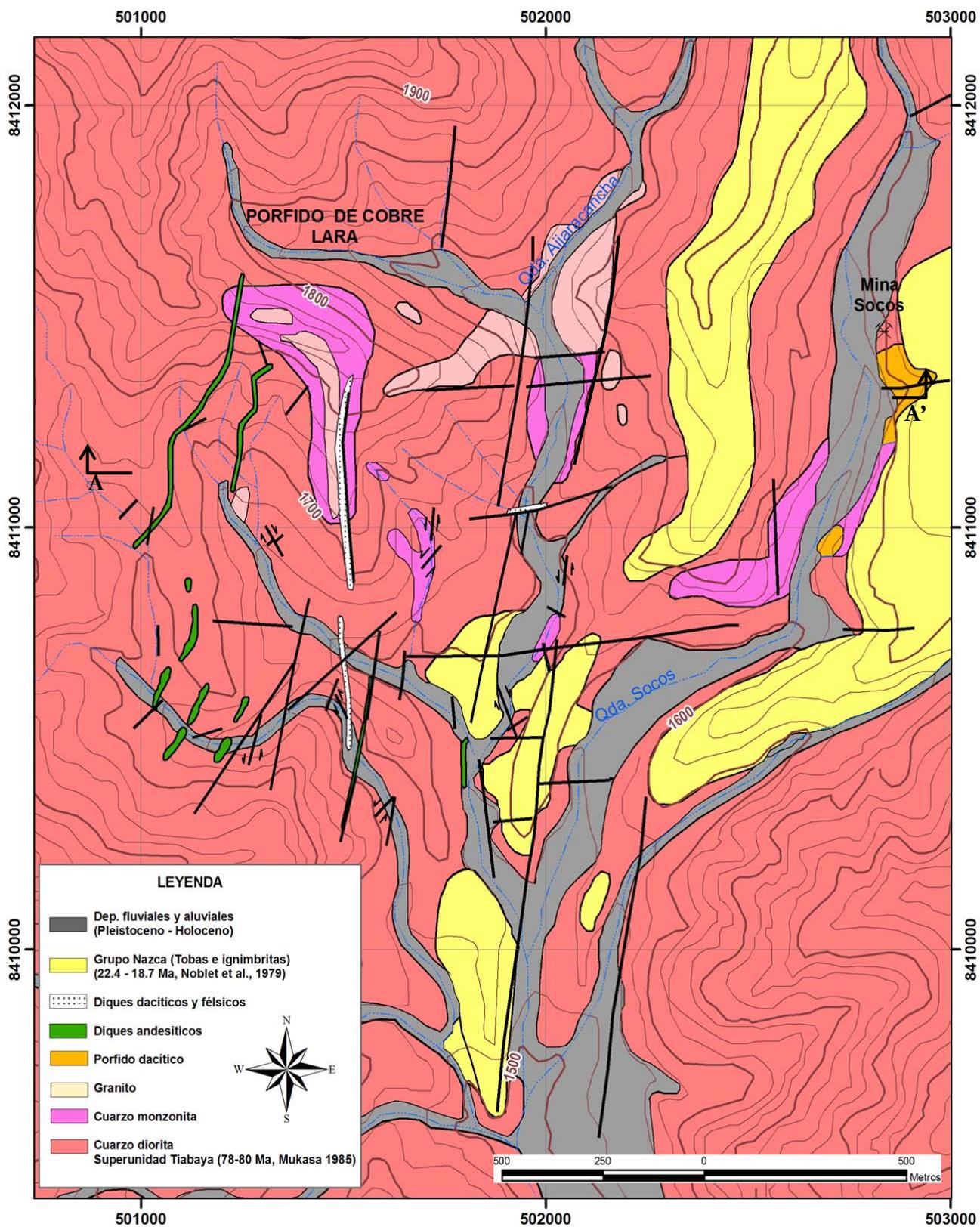


Figura 2.6 Mapa geológico del Pórfido de cobre Lara (modificado de Nebocat et al, 1999).

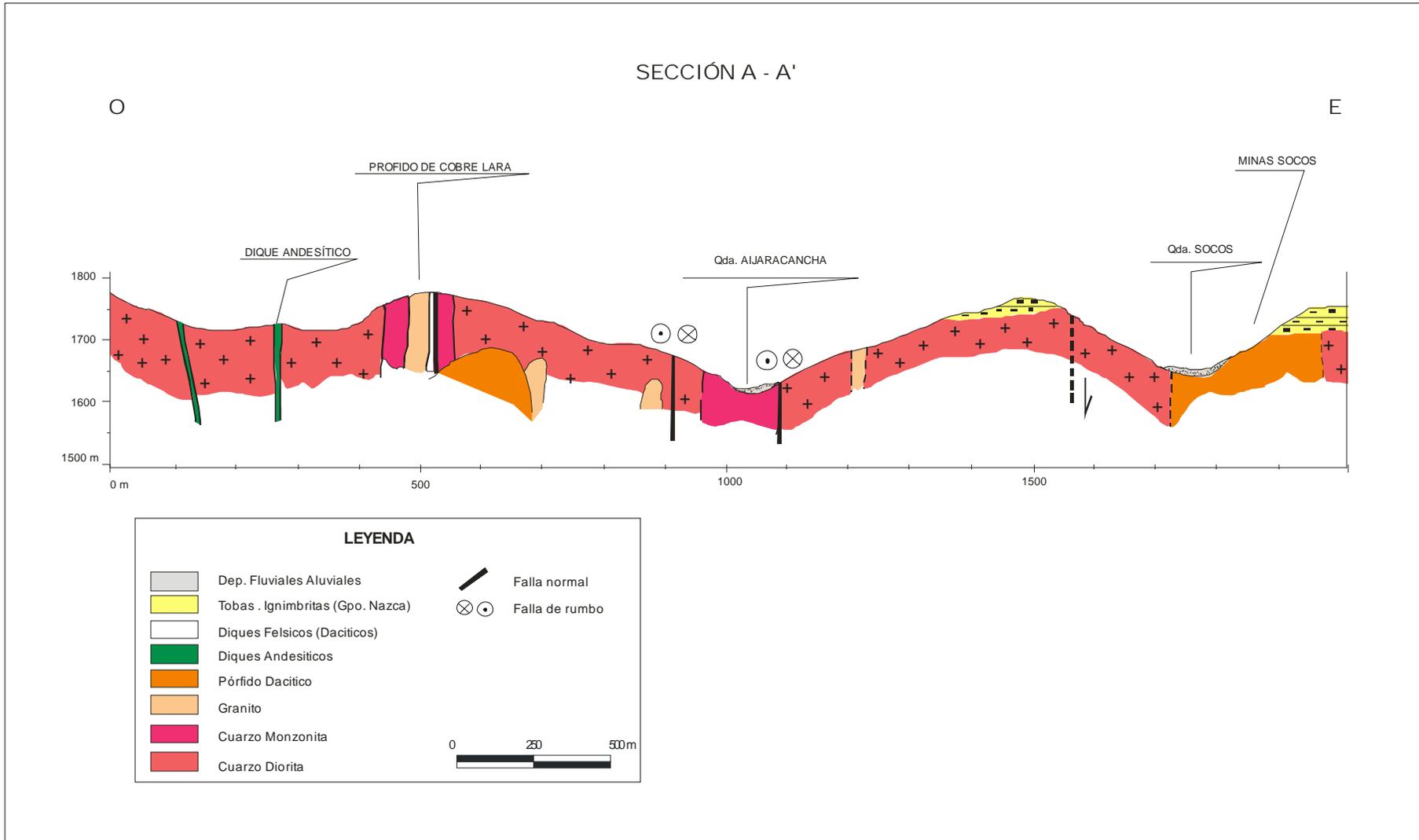


Figura 2.7 Sección geológica A-A'.

2.4.3. Rocas Intrusivas.

Regionalmente se ha observado una secuencia de emplazamiento de los cuerpos intrusivos que va en orden creciente de acidez, es decir de diorita a tonalita-granodiorita y granito, los cuales son interpretados como pulsaciones de magma a diferentes intervalos de tiempo y relacionados a la orogenia de los Andes (Castillo et al., 1993). Estos intrusivos se presentan en forma de grandes "stocks" y "diques" de pegmatita y aplita, así como en cuerpos subvolcánicos. Sin embargo, localmente se han encontrado cuarzo dioritas, cuarzo monzonitas, granitos, pórfidos de dacita y diques. Estas rocas intrusivas, dentro del contexto regional, pertenecen a la superunidad Tiabaya del Batolito de la Costa, las cuales corresponderían al Cretáceo superior (80-78 Ma; Mukasa 1985).

2.4.3.1. Cuarzo diorita.

Estas rocas se extienden en toda la parte de la zona de estudio y contiene fases menores de cuarzo monzonita. La cuarzo diorita hornbléndica tiene una apariencia más o menos fresca, sin embargo localmente grada a una fase propilitica. Los contactos entre ambas fases, fresca y propilitizada, son algo arbitrarios en los lugares, pero muchos de ellos parecen estar relacionados a las fallas. En dirección al centro del depósito las fases inalteradas y propilitizadas cambian rápidamente a rocas argilizadas, donde la cuarzo diorita es cortada por la cuarzo monzonita, granito y diques.

La cuarzo diorita es una roca de color gris oscuro, granuda y holocristalina. Presenta plagioclasas blancas euhedrales y macladas hasta de 3.3 mm (75%) y cuarzo de color gris alotriomorfo de 2.5 mm (10%). Los minerales máficos (12%) están representados predominantemente por hornblenda y luego biotita. Los contenidos de ortoclasa son inferiores al 5% (Figura 2.8A). Esta roca está bien expuesta en el Cerro Trigalpata, sector donde la cuarzo diorita es hornbléndica (Figura 2.6).

2.4.3.2. Cuarzo monzonita

Esta roca aflora en la parte central del depósito, en las quebradas Ayjaracancha y Socos. En la parte central del depósito Lara está alterada a sericita con venillas de

cuarzo y goethita, la cual está meteorizada. En esta zona la cuarzo monzonita contiene más del 10% de cuarzo de 1 mm de diámetro y la alteración a sericita es común, así como en menor proporción la biotita secundaria.

En la quebrada Ayjaracancha esta roca también presenta una alteración fílica con venillas de cuarzo-sericita y cuarzo-sericita-pirita. Esta roca está cortada por cuerpos longitudinales de granito. En la Quebrada Socos también se observa que la cuarzo monzonita es cortada por un pórfido dacítico (Figura 2.8F)

2.4.3.3. Granito.

Los afloramientos se ubican cerca en la parte central del depósito (Figura 2.8B) y en las quebradas Aijaracancha y Socos. Se presentan a manera de pequeños "stocks" y cuerpos alargados que intruyen a la cuarzo diorita y cuarzo monzonita (Figuras. 2.6 y 2.7).

La roca tiene textura holocristalina con cristales subhedrales de feldespato potásico y cuarzo (Figura 2.8C). El feldespato potásico corresponde a microclinas de 4.5 mm con textura perítica y los cristales de cuarzo pueden llegar hasta 3 mm (Figura 2.8D).

En la parte central del depósito afloran cuerpos intrusivos de forma alargada y textura de grano fino y grueso que corresponden a granitos y aplitas respectivamente. Estos cuerpos constituyen las últimas manifestaciones magmáticas del batolito en el sector de estudio.

2.4.3.4. Pórfido dacítico.

Al este del pórfido de cobre Lara y en la Mina Socos se encuentra una dacita oscura con textura porfírica. La roca parece de poca importancia, contiene pocos signos de oxidación en la capa expuesta en la quebrada, no obstante, muestra sulfatos de hierro y limonitas en fracturas por encima del nivel freático.

Se trata de una roca gris oscura de textura porfírica con fenocristales euhedrales de plagioclasa de 3.5 mm (albita u oligoclasa) y anfíboles en una matriz felsítica de

plagioclasa y cuarzo alotriomorfo de 0.3 mm. Los anfíboles están alterados a cloritas (0.4 mm) y carbonatos, mientras que la mayoría de las plagioclasas se presentan frescas, macladas y zonadas (Figura 2.8E).

El pórfido dacítico se encuentra cortando la cuarzo monzonita (Figura 2.8F) y contiene rellenos de fracturas y disseminación de pirita y calcopirita en una proporción de 4:1. Presenta poca alteración argílica a diferencia de la diorita que la rodea (Nebocat et al, 1999).

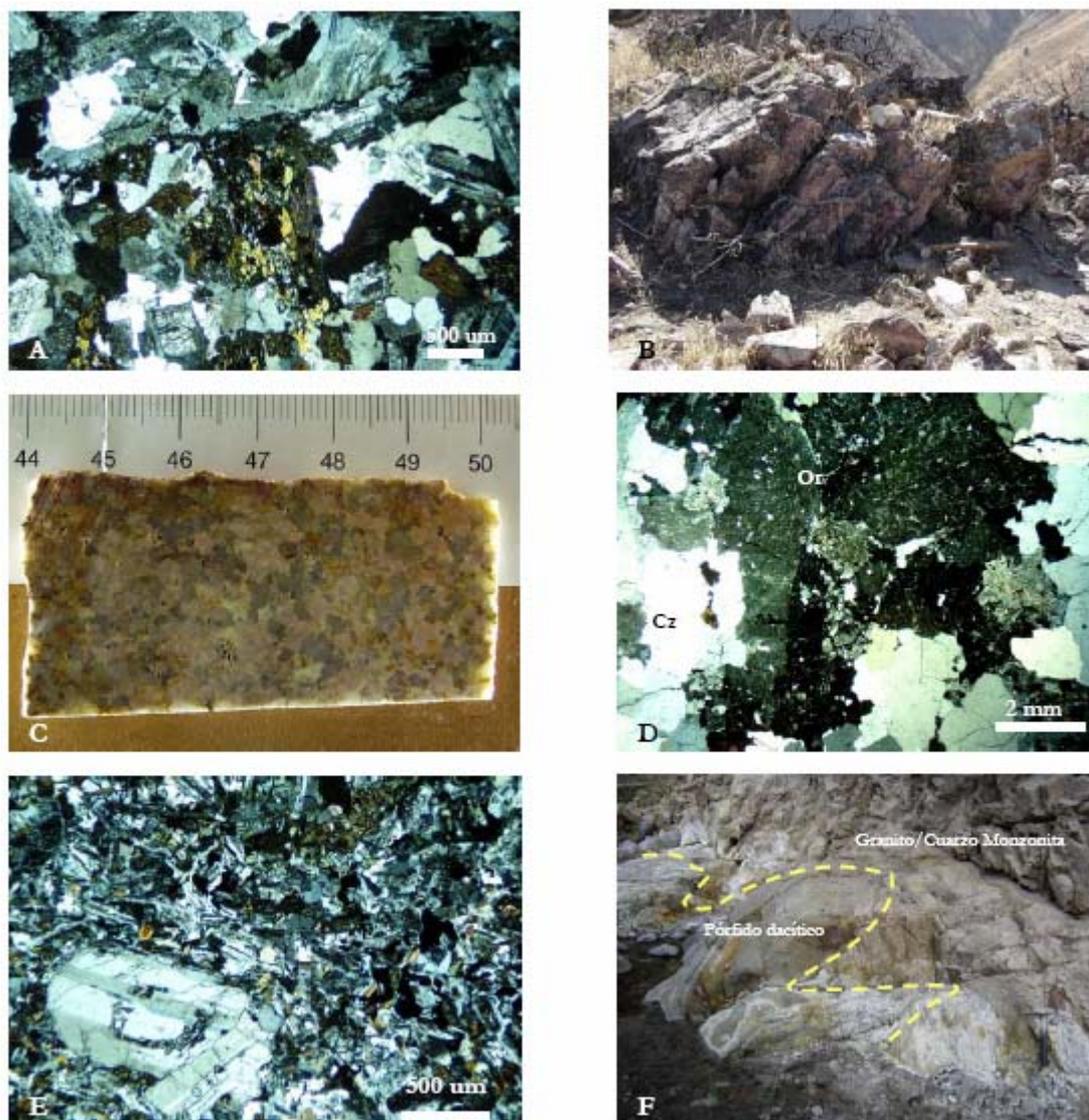


Figura 2.8 Fotos de afloramientos y fotomicrografías de luz transmitida de secciones delgadas de cuarzo diorita, granito y pórfido dacítico. A) Fotomicrografía de cuarzo diorita holocristalina con plagioclasas blancas euhedrales y macladas (Muestra 051). B) Afloramiento de granito en la parte central del depósito con vista al NNO cortado por venillas de cuarzo-pirita-calcopirita y cuarzo-sericita. C) Granito con textura granuda y cristales subhedrales de feldespato potásico y cuarzo (Muestra 012). D) Fotomicrografía de granito en la Quebrada Aijaracancha. (Muestra 012) E) Fotomicrografía del pórfido dacítico en la Quebrada Socos. (Muestra 029) F) Pórfido dacítico cortando al granito/ cuarzo monzonita en la Quebrada Socos.

2.4.3.5. Diques.

Los diques se encuentran atravesando el depósito y cortan la cuarzo diorita, cuarzo monzonita y granitos. Se caracterizan por ser de naturaleza andesítica, dacítica y aplítica (Figura 2.9B) donde los diques félsicos parecen ser más recientes que los anteriores (Figura 2.9A). Estos tipos de diques son postmineral y no han sido alterados como la cuarzo diorita, monzonita y granito (Nebocat et al, 1999).

Los diques andesíticos son de color gris oscuro, textura granular fina y gran cantidad de plagioclasas dentro una pasta microcristalina. Tienen una dirección principal NE de 30° y buzamientos subverticales entre 75° - 90° al Este con espesores de 0.50 a 4.0 m.

Los diques dacíticos tienen una dirección preferencial N-S y buzamientos subverticales al Este entre 64°-90°. Es común encontrar en sus fracturas carbonatos de cobre movilizado y tenorita/neotocita aparentemente recuperados por los minerales de manganeso que llenan las fracturas en los diques.



Figura 2.9 Tipos de diques que atraviesan el pórfido de cobre Lara. A) Dique dacítico cortando la cuarzo diorita y dique andesítico. Quebrada. B) Dique aplítico cortando la cuarzo diorita.

2.4.5. Estructuras.

En el pórfido de cobre Lara el rasgo estructural dominante es el fallamiento en bloques, donde se han registrado cuatro conjuntos mayores de fallas (Figuras. 2.6 y 2.7). De acuerdo a su cronología tenemos un sistema dominante más antiguo N-S (010/87 E).

Las principales estructuras de este sistema se extienden en la Qda. Aijaracancha (Fig. 2.10A) y son fallas de rumbo sinistral con componente normal que pasan los 1 500 m. Estas fallas forman un corredor estructural que ha controlado el emplazamiento de intrusivos, alteraciones y mineralización del yacimiento. Este sistema divide en dos grandes bloques al Distrito, donde el bloque Este descendió y parte del bloque Oeste fue erosionado (tobas e ignimbritas del Grupo Nazca y capa de lixiviación). El segundo sistema tiene una dirección E-O (090/85 N) y divide al corredor N-S, donde aparentemente hace descender al bloque sur. El tercer sistema NE-SO (055/80 SE) controló la alteración potásica y propilítica en la parte sur del yacimiento. Localmente este sistema es cortado por una falla dextral NO-SE mas reciente (320/75 SO) como se aprecia en la Fig. 2.10B. Los dos últimos sistemas de falla habrían controlado la alteración y mineralización ya que también constituyen las orientaciones de vetillas tipo B en la alteración fílica.

Las fallas N-S son paralelas a la dirección de muchos tributarios y junto con las fallas E-O habrían controlado también el emplazamiento de los diques postmineralización.

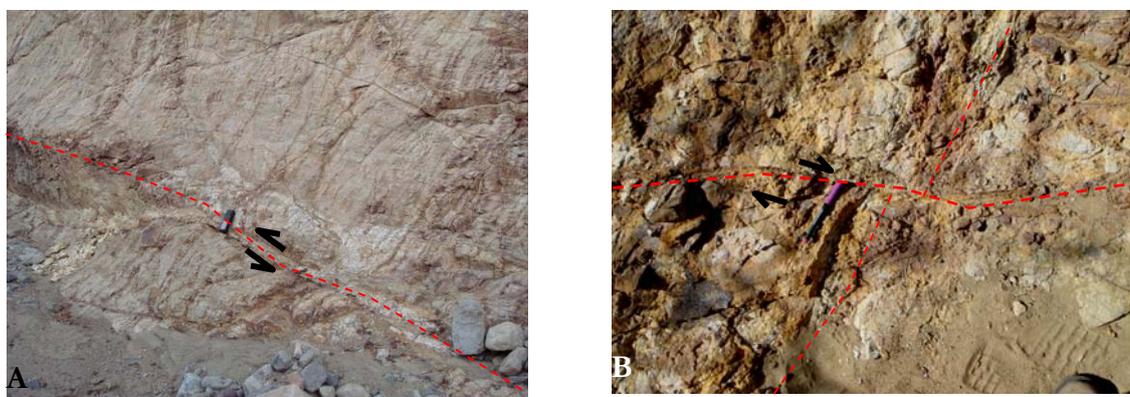


Figura 2.10 Principales sistemas de fallas que atraviesan el pórfido de cobre Lara. A) Falla de rumbo N-S sinistral presente en la Quebrada Aijaracancha atravesada por vetillas subverticales tipo B1: cuarzo-sericita-pirita. B) Falla de rumbo NO-SE dextral corta a falla NE-SO en zona de alteración fílica en Quebrada s/n al SO del yacimiento .

CAPÍTULO III

ALTERACIONES HIDROTERMALES Y MINERALIZACIÓN

3.1. Introducción.

Las alteraciones hidrotermales y la mineralización en el Pórfido de cobre Lara se desarrollaron durante un proceso continuo en el tiempo y espacio (Figuras 3.1 y 3.2). De esta manera, para explicar la evolución secuencial del depósito es necesario definirlo por medio de zonas y eventos de alteración. Padilla (2004) define una zona de alteración como la distribución espacial de una asociación de minerales y un evento hidrotermal corresponde a un grupo de alteraciones que tienen efectos en el tiempo.

Para identificar los eventos hidrotermales en el Pórfido de cobre Lara se estudió la asociación de minerales de alteración de las muestras obtenidas (Cuadro 3.1) y su estilo de ocurrencia en el campo. Es así que se definieron cuatro eventos hidrotermales denominados A, B, C y D, los cuales se describirán más adelante.

El primer evento hidrotermal A muestra a un estilo de alteración penetrativo y en vetillas (Cuadro 3.1 y 3.2), donde se han identificado cuatro tipos de vetillas (A1, A2, A3 Y A4). Este evento está relacionado con las primeras manifestaciones de las intrusiones de la cuarzo monzonita. La roca de caja, representada por la cuarzo diorita, muestra una alteración potásica penetrativa y en vetillas: su matriz presenta biotitas secundarias alteradas a cloritas y es cortada por vetillas A3 de cuarzo-ortoclasa (Muestra 041). La alteración propilítica siguió a la alteración potásica y alteró a la cuarzo diorita también, manifestándose en la matriz de la roca con una asociación mineralógica de clorita-epídota±carbonato-pirita y con vetillas A4 de cuarzo-clorita-carbonatos-pirita (Muestra 052).

El segundo evento hidrotermal B se caracteriza por presentar un estilo de alteración en vetillas (B1 y B2) con asociaciones mineralógicas cuarzo±sericita-pirita-calcopirita, cuarzo-pirita-calcopirita-sericita que cortan la cuarzo monzonita y cuarzo diorita. Los sulfuros generalmente se presentan oxidados y lixiviados en superficie (Cuadro 3.1 y 3.2) respectivamente. Este evento esta superpuesto al primero y se debe a la incorporación de fluidos de origen meteórico que hacen descender la temperatura del sistema, notándose las primeras evidencias de los efectos retrógrados (Sheppard & Gustafson, 1976; Skewes Atkinson, 1985).

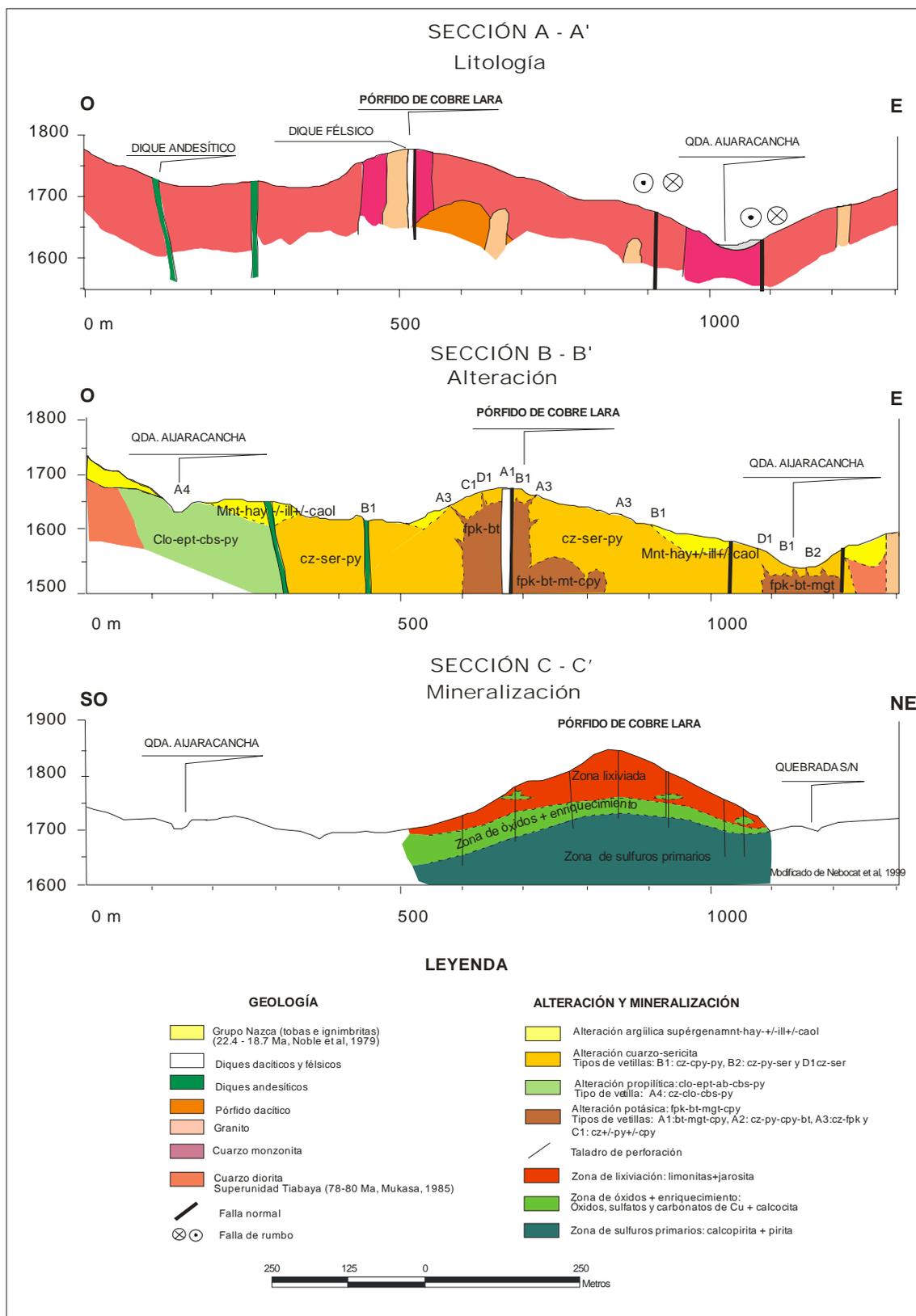


Figura 3.2. Secciones de interpretación geológica (A-A'), alteraciones hidrotermales (B-B') y mineralización (C-C') del Pórfido de cobre Lara. Simbología: bt: biotita, caol: caolinita, clo: clorita cp: calcopirita, cz: cuarzo, ept: epidota, hay: halloysita, ill: illita, lims: limonitas, mnt: montmorilonita, mgt: magnetita, or: ortoclasa, py: pirita, ser: sericita

Al evento anterior se superpone una alteración argílica de origen supérgena, caracterizada por una asociación mineralógica montmorilonita-halloysita±illita±caolinita.

Un tercer evento hidrotermal C con vetillas C1: cuarzo-ortoclasa±pirita±calcopirita y un cuarto evento D con vetillas estéril tipo D1: cuarzo-sericita están vinculados al último evento intrusivo granítico, estéril y postmineralización.

El pórfido de cobre Lara se encuentra en la superunidad Tiabaya del Batolito de la Costa que tiene una edad del Cretácico superior (80-78 Ma; Mukasa, 1985) y corresponde al intrusivo precursor de la mineralización en el Distrito. Dataciones de mineralización en el pórfido de cobre-molibdeno Puquio, ubicado al NO del pórfido de cobre Lara y en la misma faja metalogénica del Cretácico superior (Figura 2.3), dan una edad de 77.48 Ma (Rivera F, 2006) en sericita hidrotermal, datada por el método Ar^{40}/Ar^{39} . Por consiguiente, estos datos nos permiten sugerir que la evolución de los fluidos hidrotermales en el pórfido de cobre Lara habrían tomado lugar entre los 80 y 77.5 Ma.

A continuación, la descripción de la evolución temporal de las zonas de alteración está relacionada a la superposición de asociaciones mineralógicas y las relaciones de corte entre vetillas.

3.2. Evento hidrotermal A.

3.2.1. Evento A1: Alteración potásica

Esta alteración afecta a la cuarzo monzonita y cuarzo diorita. Aflora en la parte central SE del yacimiento, donde altera a la cuarzo monzonita. También se la encuentra en relictos de vetillas dentro de la alteración fílica (Muestras 041 y 046). En profundidad se han distinguido en orden cronológico vetillas tipo A1: biotita-magnetita-calcopirita con proporciones variables de feldespato potásico, A2: cuarzo-pirita-calcopirita con halo de biotita y A3: cuarzo-feldespato potásico (Figuras 3.3 A-D). Ya en superficie son más conspicuas las vetillas A3: cuarzo-ortoclasa (Figuras 3.3 E y F). Estas vetillas cortan la cuarzo diorita, la cual presenta una matriz con crecimiento de biotita secundaria. La ortoclasa es anhedral y tiene tamaños de hasta 1 mm y ocurre intercrecida con cristales de cuarzo subhedral de 2 mm. En superficie las vetillas tipo A3 están superpuestas por las alteraciones cuarzo-sericita (Figura 3.3E) y argílica, donde ocasionalmente han obliterado la textura original de la roca.

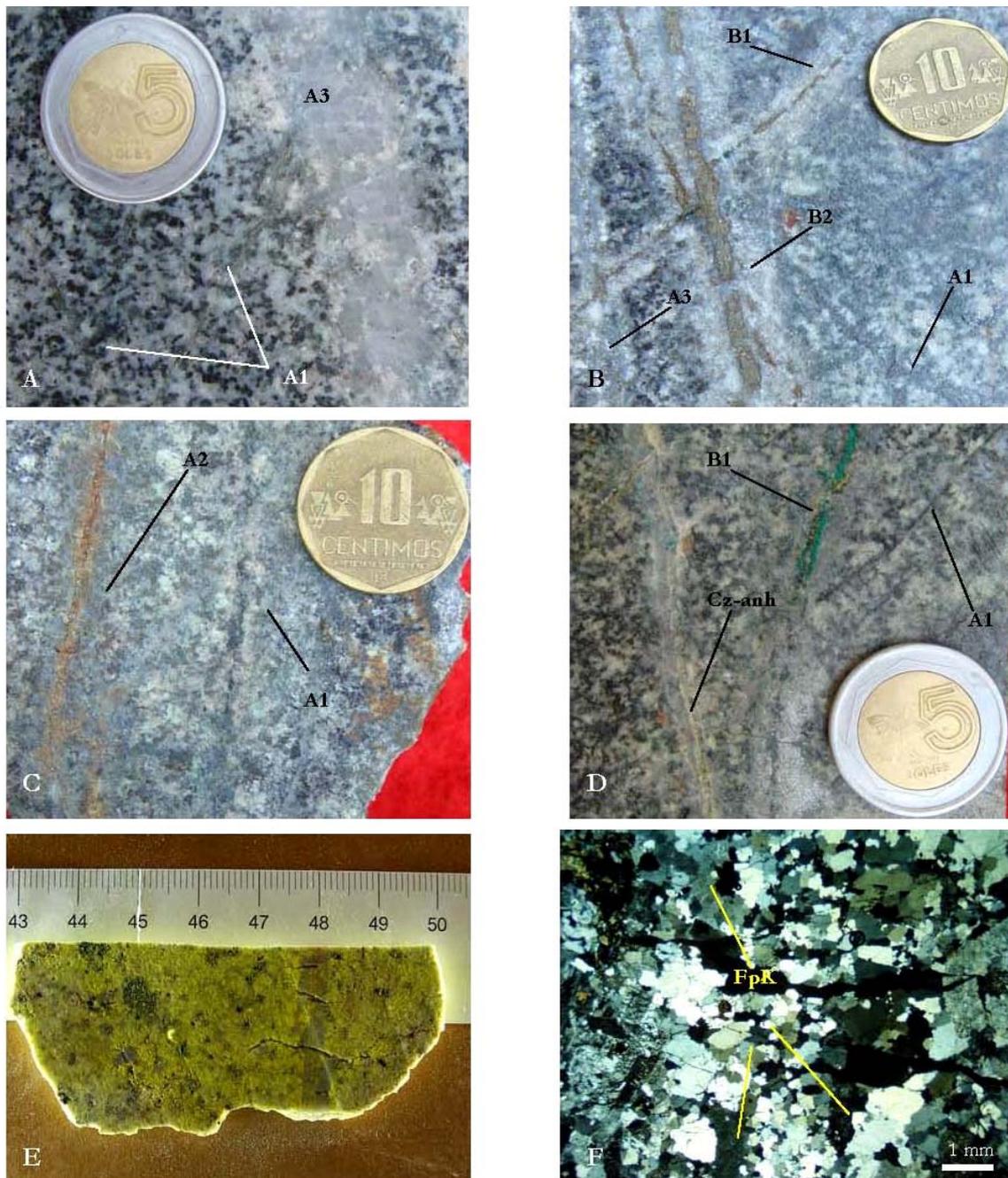


Figura 3.3 Fotos de muestras de taladros de perforación, muestras de mano y secciones delgadas de la zona de alteración potásica del evento hidrotermal A.. A) Cuarzo monzonita (Taladro LDD 14 @ 108.5m) con vetillas tipo A1: biotita-magnetita-calcopirita cortadas por vetilla tipo A3: cuarzo-feldespato potásico. B) Cuarzo diorita (Taladro LDD 13 @ 107m) cortada por vetillas tipo A1: biotita-magnetita-calcopirita, A3: cuarzo-feldespato potásico, B1: cuarzo-pirita-calcopirita (alterada a calcocita) y B2: cuarzo-pirita con halo de sericita. C) Cuarzo diorita (Taladro LDD 13 @ 84 m) cortada por vetillas tipo A1: biotita-magnetita con proporciones variables de feldespato potásico y tipo A2: cuarzo-pirita-calcopirita con halo de biotita. D) Cuarzo diorita (Taladro LDD 14 @ 90m) con vetilla tipo A1: biotita magnetita cortada por vetilla tipo B1: cuarzo-calcopirita alterada a calcocita y sulfatos de cobre. Se puede notar una vetilla de cuarzo anhidrita posterior a las anteriores E) Vetilla tipo A3: cuarzo-feldespato potásico teñido y agregados de biotita secundaria en matriz de cuarzo diorita (Muestra 041) F) Fotomicrografía de luz transmitida en nicols cruzados de vetilla tipo A3. Se puede distinguir la ortoclasa anhedral intercrecida con cristales de cuarzo (Muestra 041).

3.2.2. Evento A2: Alteración propilítica

Se encuentra en la periferia del depósito y su contacto con la roca fresca es arbitrario. De esta manera, muchos de los contactos parecen estar relacionados a fallas locales N-S. Esta alteración está circunscrita principalmente al S y SO del yacimiento donde aflora la cuarzo diorita hornbléndica.

Se caracteriza por presentar vetillas tipo A4: cuarzo-clorita-carbonatos-pirita (Figura 3.4 A, B) que cortan la cuarzo diorita en la Quebrada Jayacyana. Estas vetillas se caracterizan por ser rectas y no presentan sutura; el cuarzo y la clorita se encuentran juntos y la pirita dispersa en la venilla .

La matriz de la cuarzo diorita está alterada y presenta una asociación mineralógica: clorita-epídota-albita±carbonato-pirita. La alteración es selectiva y afecta a los minerales ferromagnesianos (hornblenda y biotita), los cuales cambian a clorita, epídota y carbonatos. Los bordes de las hornblendas y biotitas se alteran a clorita, mientras que los carbonatos junto con la pirita son frecuentes en el centro de las hornblendas. Lo mismo sucede con las plagioclasas, las cuales se alteran desde sus bordes a albita (Figura 3.4 C y D). La mineralización en la cuarzo diorita es diseminada y presenta trazas de magnetita-calcopirita-pirita (Figura 3.8 C y D).

3.3. Evento hidrotermal B: Alteración cuarzo-sericita.

Esta alteración es muy común en la parte central del depósito, en la Quebrada Ayjaracancha y en la Quebrada s/n al SO del yacimiento. En la parte central y en la Quebrada Ayjaracancha la alteración cuarzo-sericita afecta a la cuarzo monzonita y más al SO del yacimiento también afecta a la cuarzo diorita.

La alteración se caracteriza por presentarse en dos tipos de vetillas. Las vetillas tipo B1 son rectas y presentan una sutura central. Se componen de cuarzo±sericita y la sutura está rellena de calcopirita-pirita (Figura 3.5 A-D), mientras que las vetillas tipo B2 son de cuarzo-pirita con halo de sericita. (Figs. 3.5 E y F). Las vetillas B1 tienen grandes cristales de cuarzo gris (2 mm) y cuarzo fino con sericita (10 μm).

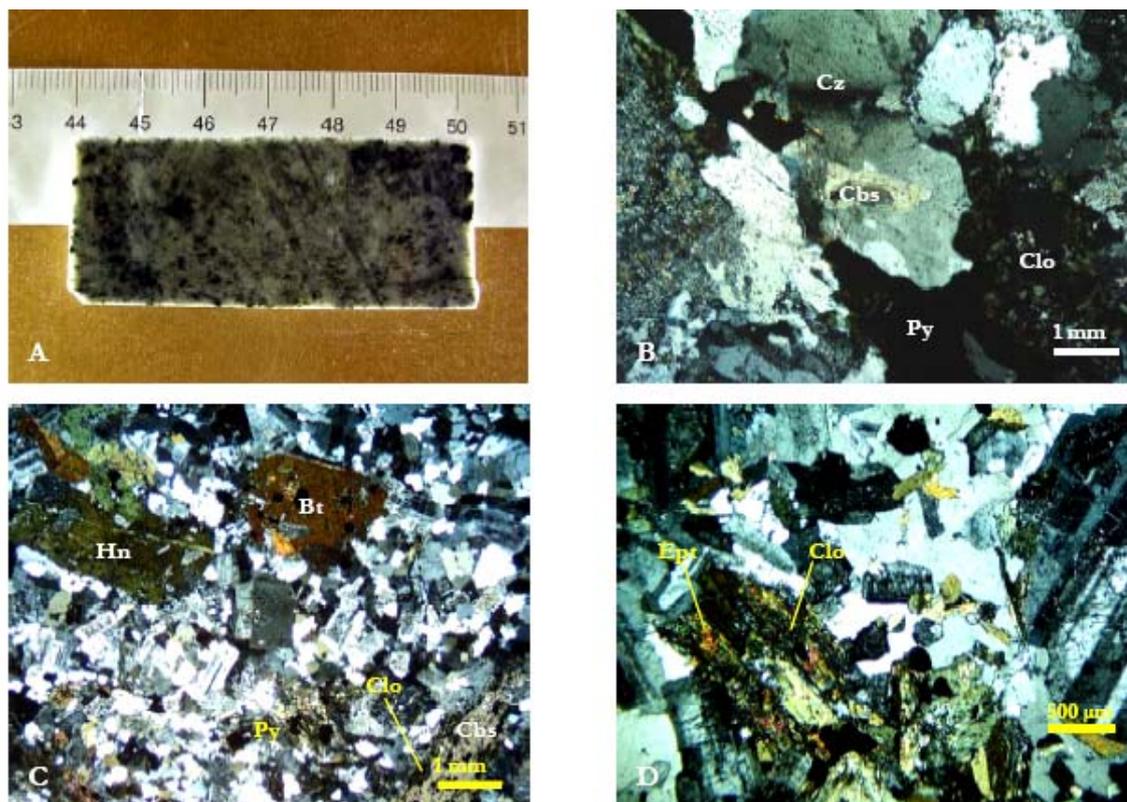


Figura 3.4 Fotos de afloramientos, muestras de mano y secciones delgadas de la zona de alteración propilítica. A) Cuarzo diorita cortada por vetilla tipo A4: cuarzo-clorita-pirita en la Quebrada Jayacyana (Muestra 052). B) Fotomicrografía de luz transmitida con nicols cruzados de vetilla tipo A4: cuarzo clorita-epídota±carbonato-pirita (Muestra 052). C) Fotomicrografía de luz transmitida con nicols cruzados de cuarzo diorita con alteración selectiva de hornblendas y biotita a cloritas y plagioclasas a albita. También se puede notar cómo los carbonatos y pirita reemplazan a la hornblenda (Muestra 01). D) Fotomicrografía de luz transmitida con nicols cruzados Alteración de hornblenda a clorita y epídota en cuarzo diorita hornbléndica (Muestra 048).

En superficie se puede notar que esta zona de alteración presenta una mayor densidad de estas vetillas y frecuentemente los sulfuros han sido oxidados y lixiviados, dejando vetillas con oquedades o rellenos de limonitas (Figura 3.5 A). Su espesor varía de algunos milímetros hasta un poco más de un centímetro y su longitud supera el metro. En el corredor estructural N-S de la Qda. Aijaracancha estas vetillas son casi verticales (85°-90°) y tienen dos orientaciones preferenciales: 150° y 120° (Figura 2.10 A).

La alteración fílica está formada por la asociación mineralógica: cuarzo-sericita-calcopirita-pirita. Esta asociación puede llevar clorita cuando esta cerca a la zona de la alteración potásica. También se puede notar impregnaciones de cuarzo secundario euhedral dentro de mares de sericita, la cual presenta forma de escamas hasta de 0.1 mm y corroe al feldespato potásico (Figura 3.5 B).

En esta zona de alteración las concentraciones de goethita y jarosita son ligeramente iguales,

excediendo localmente la goethita. La hematita puede estar presente y su intensidad aumenta hacia el centro del yacimiento. La tenorita y neotocita cuprífera se han visto localmente con concentraciones de goethita (Nebocat et al., 1999).

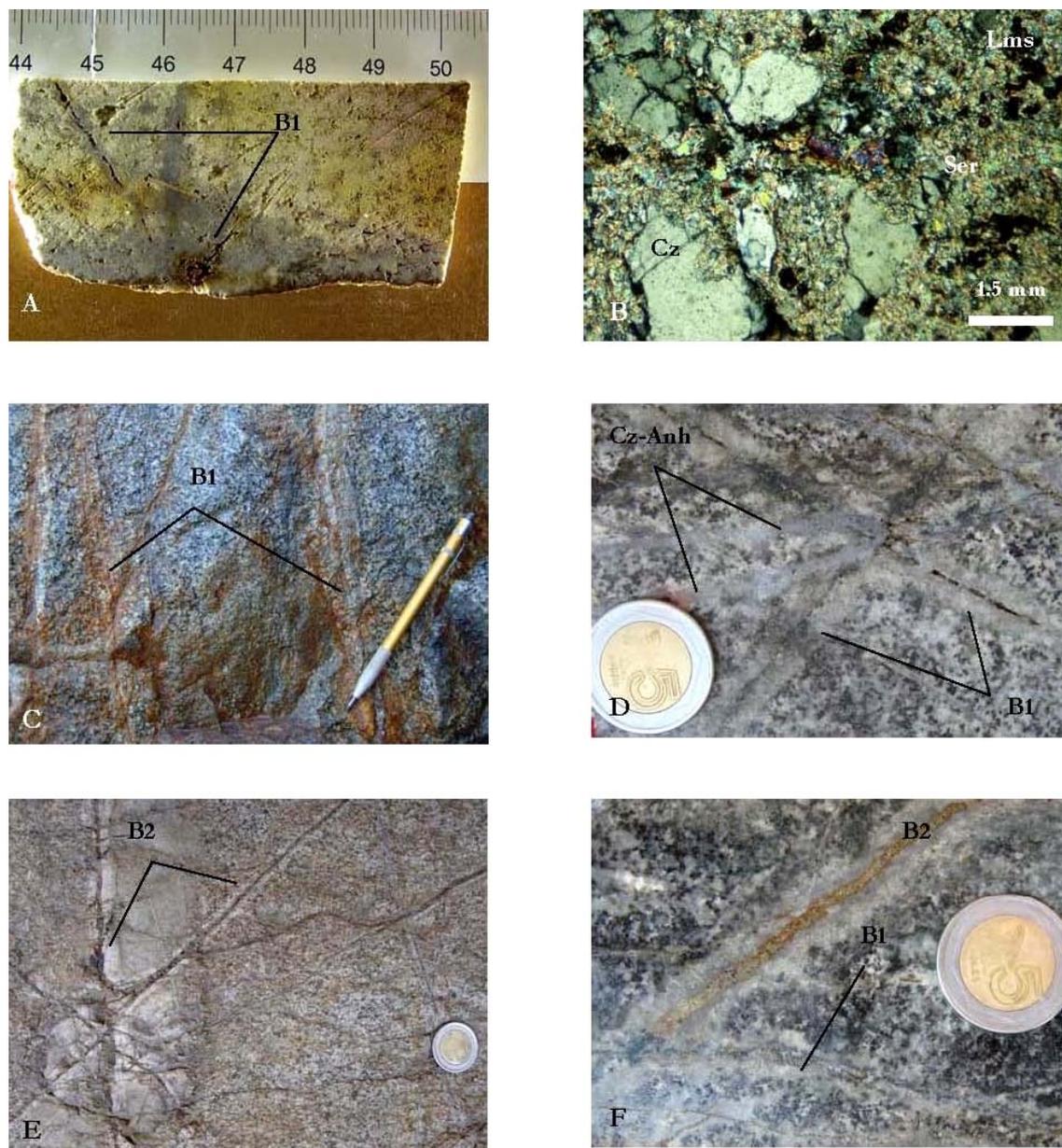


Figura 3.5 Fotos de afloramientos, muestras de mano, taladros de perforación y secciones delgadas de la zona de alteración filica. A) Cuarzo diorita con alteración filica penetrativa y cortado por vetillas con sutura tipo B1: cuarzo±sericita-goethita. En la zona de lixiviación este tipo de vetillas presentan oquedades y rellenos de limonitas debido a la oxidación y lixiviación de los sulfuros (Muestra 040). B) Fotomicrografía de luz transmitida con nicóles cruzados de la matriz de cuarzo diorita con feldespatos alterados a sericita, cuarzo hidrotermal subhedral y limonitas (Muestra 040). C) Afloramiento de cuarzo monzonita en Quebrada Aijaracancha con vetillas tipo B2 de cuarzo con sutura rellena de pirita. D) Stockwork de vetillas tipo B1: cuarzo-calcopirita-pirita en cuarzo diorita (Taladro LDD 14 @ 104m). Las vetillas presentan una sutura central rellena de calcopirita (alterada a calcocita) y son cortadas por venillas de cuarzo-ahidrita E) Vetillas tipo B2: cuarzo-pirita con halo de sericita que cortan la cuarzo diorita en la Quebrada Aijaracancha. La mayor parte de la pirita ha sido oxidada. F) Cuarzo diorita (Taladro LDD 14 @ 99m) atravesada por vetilla B2: cuarzo-pirita con halo de sericita que corta vetilla tipo B1.

En ambos casos, las vetillas de los eventos hidrotermales A y B están cortadas por vetillas de cuarzo anhidrita como se puede apreciar en las Figuras 3.3 D y 3.5 D.

3.4. Evento supégeno: Alteración argílica.

Posterior a los eventos hidrotermales A y B ocurrió un evento supégeno que dio origen a la argilización del yacimiento.

La alteración argílica tiene una mayor extensión en la zona de estudio, afecta principalmente a la cuarzo diorita y se superpone a la alteración cuarzo-sericita (Figura 3.6 A y B).

Presenta una asociación mineralógica: montmorilonita-halloysita±caolinita que altera principalmente a la sericita y después a los feldespatos (Figuras D-F). En las zonas donde había sulfuros como rellenos de suturas en venillas de cuarzo y cuarzo-sericita, estos fueron oxidados a limonitas (Figura 3.6 C).

En la periferie la alteración argílica esta formada por arcillas de tipo montmorilonita y halloysita junto con gohetitas y jarositas (Figura 3.6 A, B). Cerca al centro del depósito, además de los minerales encontrados en la periferia, también se encuentra caolinita y hematita (Figura 3.6 C).

En muchos casos las plagioclasas han sido argilizadas y conservan su forma original (Figura 3.6 D), así como el feldespato potásico (Figura 3.6 E). Se puede notar una superposición de la alteración argílica sobre la cuarzo-sericita donde los feldespatos y sericita se alteran a arcillas (Fig 3.6 F).

3.5. Eventos hidrotermales C y D.

Estos últimos eventos hidrotermales no tienen tanta relevancia cómo los anteriores, responsables de la mineralización del yacimiento, ya que representan las últimas etapas de un sistema con baja energía y una fuente agotada de metales. Estos eventos acompañaron el último evento magmático, representado por una intrusión granítica.

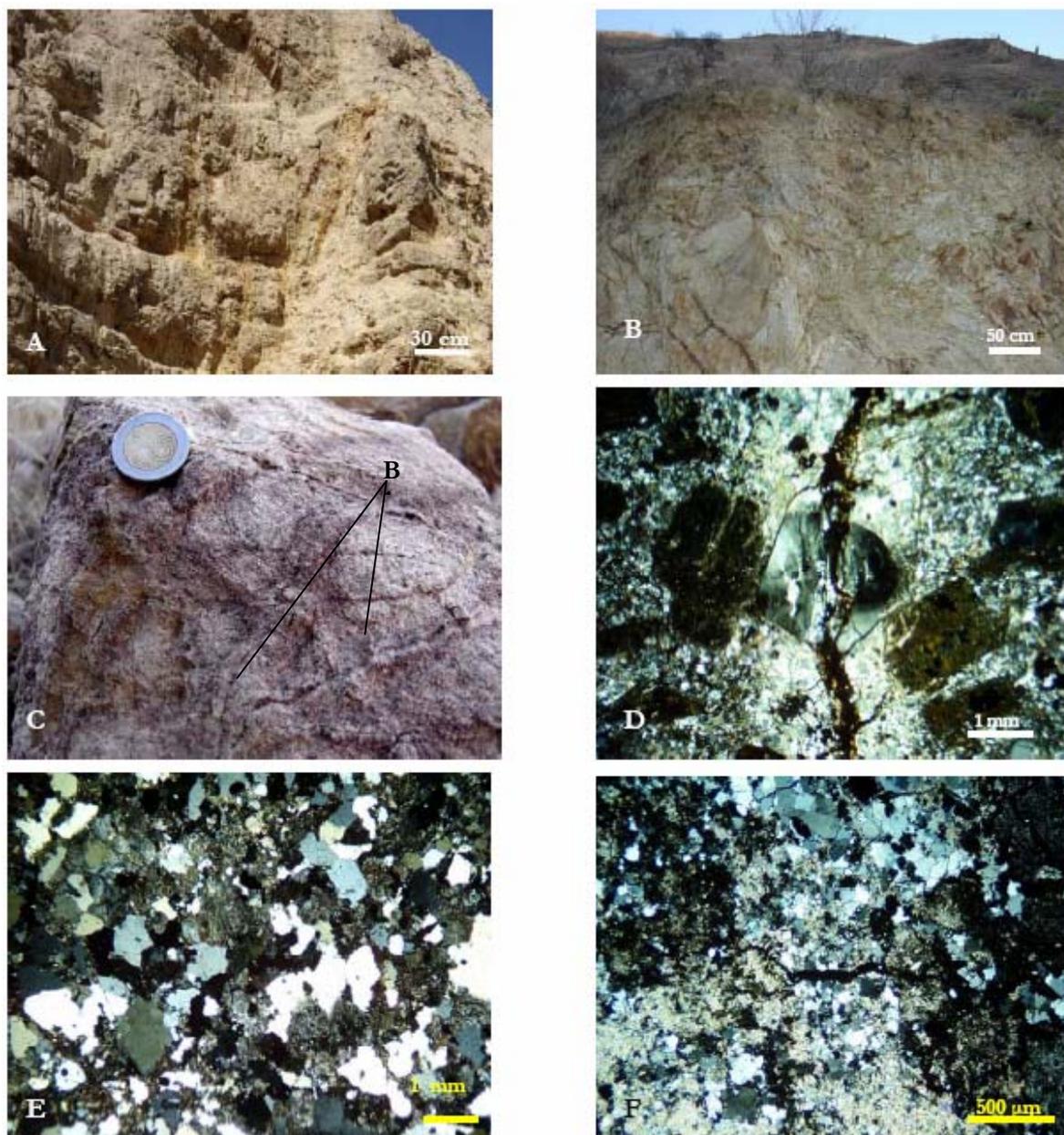


Figura 3.6 Fotos de afloramientos, muestras de mano y secciones delgadas de la zona de alteración argílica. A) Venillas tipo B1 con sericita alterada a arcillas, goethita y jarosita en la Quebrada Aijaracancha. B) Superposición de arcillas, limonitas y jarosita en zona de alteración filica con relictos de alteración potásica (Muestra 041) cerca al centro del yacimiento. C) Vetillas tipo B1 con sericita argilizada y sutura rellena de sulfuros oxidados a hematitas. D) Fotomicrografía de luz transmitida con nicoles cruzados de pórfido dacítico cortado por vetilla tipo B2 con cuarzo fino, sericita y sutura rellena de goethita (Muestra 42). La sericita y las plagioclasas se alteran a arcillas. E) Fotomicrografía de luz transmitida con nicoles cruzados de argilización selectiva de feldespato potásico en granito (Muestra 034). F) Fotomicrografía de luz transmitida con nicoles cruzados de cuarzo monzonita? con alteración filica afectada por argilización de feldespatos (Muestra 38).

3.5.1. Evento C: Alteración potásica.

Esta alteración aflora en la Quebrada Aijaracancha y altera al granito (Figura 3.7 A). Se caracteriza por la presencia de biotita secundaria en microvenillas y agregados. (Figura 3.7 B). También se distingue que parte de la biotita es alterada a clorita por un evento retrógrado. La matriz presenta magnetita martitizada y calcopirita diseminada (Figura 3.8 B).

Este evento va acompañado de vetillas tipo C1: cuarzo con trazas de pirita y calcopirita. Las vetillas tienen una textura gruesa y sus espesores alcanzan los 8 mm (Figura 3.7 F) Los cristales de cuarzo son subhedrales y mayores que 1 mm y las trazas de mineralización está diseminada.

3.5.2. Evento D: Alteración cuarzo sericita.

El principal rasgo que distingue este evento son las vetillas estériles tipo D1: cuarzo-sericita, las cuales presenta una sutura central sin relleno y se cruzan entre si formando una estructura stockwork (Figura 3.7 E).

Estas vetillas son rectas, con espesores que varían de algunos milímetros hasta mayores que 1 cm (Figura 3.7 C) y su longitud pueden exceder el metro. Se encuentran cortando a las vetillas C1 (Figura 3.7 F). Tienen una textura gruesa con cristales de cuarzo que llegan a los 2 mm. La sericita se encuentra alterando al feldespató potásico y se presenta en forma de escamas de 10 μm junto con finos cristales de cuarzo (Figura 3.7 D).

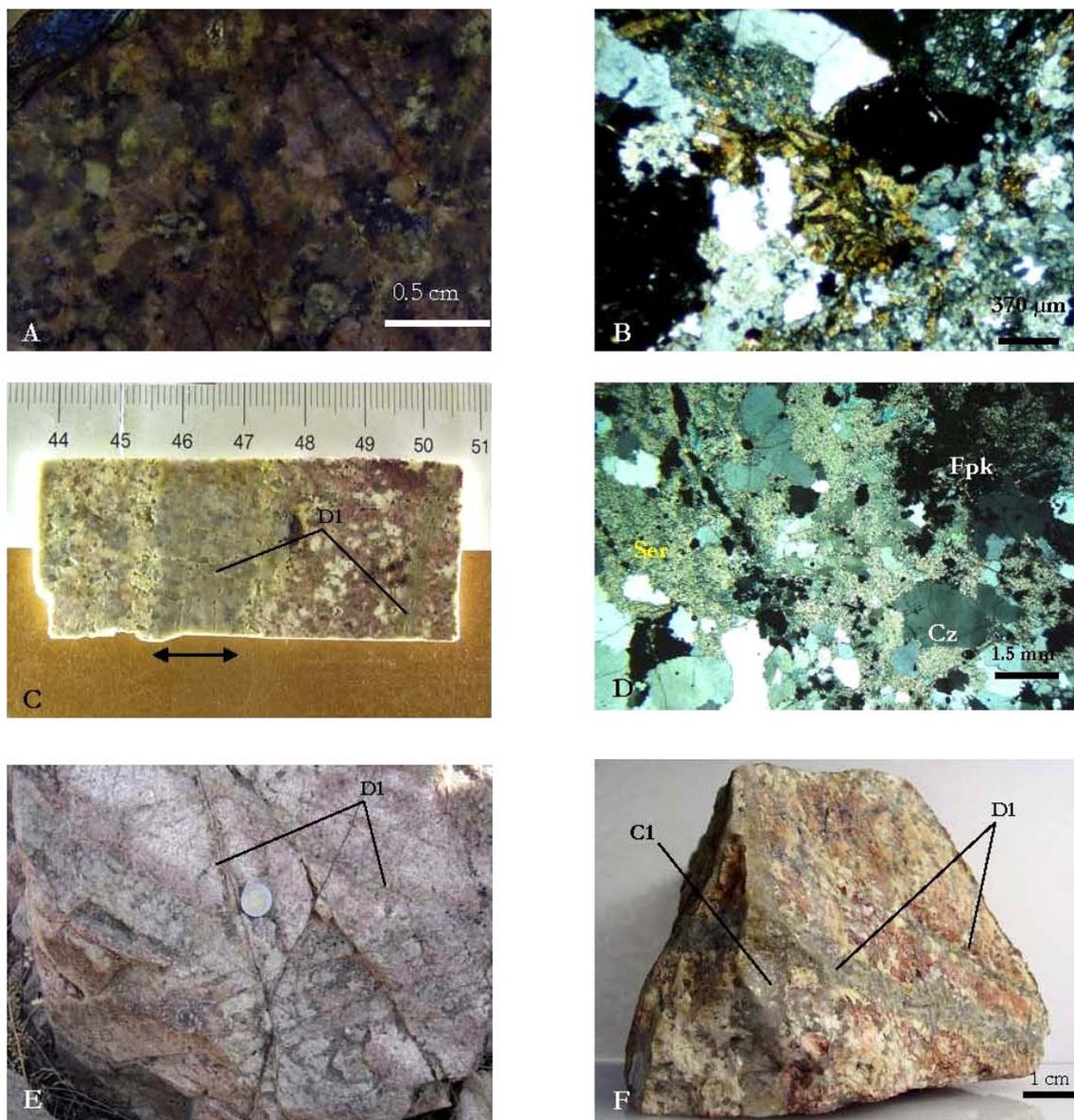


Figura 3.7 Fotos de afloramientos, muestras de mano y secciones delgadas de los eventos hidrotermales C y D. A) Granito con agregados de biotita secundaria y clorita retrógrada en afloramiento de la Quebrada Aijaracancha (Muestra 011). B) Fotomicrografía de agregados de biotita secundaria y clorita en granito (Muestra 011). C) Granito con alteración filica cortado por vetillas tipo D1: cuarzo-sericita con sutura sin relleno (Muestra 035). D) Fotomicrografía de granito cortado por vetilla con sutura tipo D1: sericita con cuarzo secundario subhedral de impregnación. La sericita altera al feldespato potásico (Muestra 035). E) Parte central del yacimiento donde el granito muestra una superposición de la alteración filica sobre alteración potásica. Se aprecia una estructura stockwork entre vetillas tipo D1: cuarzo-sericita y tipo C1: cuarzo-pirita-calcopirita F) Detalle de la Fig. 3.7E, donde se aprecia las relaciones de corte entre las vetillas C1 y D1.

No	Muestra	Roca probable	Tipo de Alteración		Asoc. de minerales
1	001	Cuarzo diorita de hornblenda	Propilítica	Ch-2-10	clo-ept±ser-opcs
2	004	Dique félsico	Cuarzo-Sericita	K-3-1; S-7-1	cz-ser-fpK-clo-py
3	011	Granito	Potásica	K-2-1; Bt-3-1; Ch-5-10	cz-bt; cz-fpK; clo-ser
4	012	Granito	Inalterada	-	fpK-cz±pg
5	034	Granito aplítico	Potásica-Cuarzo-Sericita	K-4-5; S-3-1; A-2-5	cz-fpk--ser ± py ± cp; mon+ hal
6	035	Granito	Cuarzo-Sericita	S-10-1	cz-ser ± goh ± hm
7	038	Monzonita?	Cuarzo-Sericita	S-7-6; A-5-10	cz-ser; kaol+mon+hal
8	039	Monzonita	Cuarzo-Sericita-Potásica	K-8-1; S-10-1; Q-6-1	cz-fpk; cz-ser ± goh ± hm; cz
9	040	Cuarzo diorita?	Cuarzo-Sericita	Ch-7-10; S-10-1; A-8-10	clo-ept; cz-ser ± go; mon-hal
10	041	Cuarzo diorita	Potásica	K-6-1; Bt-3-7; Ch-3-4	cz-fpk; bt-clo
11	042	Pórfido dacítico	Argílica	S-4-2; A-10-10	cz-ser-lims; mon-kaol-hal
12	043	Cuarzo monzonita	Cuarzo-Sericita	Ch-5-5; S-6-8	clo-ept; cz-ser-clo-lims
13	044	Monzonita	Potásica	K-6-1; S-2-1; A-4-10	cz-fpk; cz-ser: mon hal
14	046	Cuarzo diorita	Potásica	Ch-4-4; K-7-1; A-3-4	clo-ept; cz-fpk; mon-hal
15	048	Cuarzo diorita	Propilítica	Ch-3-10	clo ± ept ± py
16	051	Cuarzo diorita de hornblenda	Propilítica	Ch-5-10; A-3-10	clo-ept ± py; mon-ill
17	052	Cuarzo diorita	Propilítica	Ch-4-10; A-3-10	cz-clo-cbs-py-cp; mon-hal

Cuadro 3.1 Tipos de alteración hidrotermal y asociación de minerales.

EVENTO HIDROTHERMAL	TIPO DE ALTERACIÓN	TIPOS DE VETILLA
EVENTO D < 77.5 Ma	Cuarzo-Sericita Se presenta principalmente en vetillas tipo D1.	D1: Son vetillas estériles de cuarzo-sericita con sutura central sin relleno. Tiene forma recta, color gris, brillo graso y espesores hasta de 2 cm. Cortan al granito. Serían equivalentes a B1, pero de segunda generación.
EVENTO C < 77.5 Ma	Potásica La alteración es penetrativa y presenta vetillas tipo C1. Su asociación mineralógica corresponde a feldespato potásico-biotita-magnetita-clorita	C1: Corresponden a vetillas de cuarzo cristalino de color gris. Tiene espesores de de 8 mm. No tienen sutura y llevan trazas de pirita y calcopirita diseminada. Cortan a las vetillas C2 y al granito. Estas vetillas vendrían a ser equivalentes a A3, pero de segunda generación.
EVENTO B ~77.5 Ma	Cuarzo-Sericita La alteración se manifiesta en vetillas tipo B1 y B2. Presenta una asociación cuarzo-sericita-pirita.	B2: Vetillas de cuarzo-pirita con halo de sericita. Cortan a las vetillas B1, cuarzo diorita y cuarzo monzonita.
		B1: Son vetillas rectas de cuarzo±sericita con sutura rellena de calcopirita-pirita. Espesor inferior a 1.5 cm. Tienen cristales grandes de cuarzo gris (2 mm) y cuarzo fino (10 µm) con sericita. Cortan a las vetillas A1, A, cuarzo diorita y cuarzo monzonita. Corresponden a vetillas de transición.
EVENTO A ~78-77.5 Ma	Propilitica Es principalmente penetrativa y su asociación mineralógica es clorita-epídota-albita±carbonato-pirita. Se observa localmente vetillas tipo A4. La pirita también se encuentra diseminada.	A4: Tienen una asociación cuarzo-clorita-carbonatos-pirita. Su espesor es de algunos milímetros, son rectas y no presentan sutura. Cortan a la cuarzo diorita.
		A3: Son vetillas de cuarzo-feldespato potásico de textura granular y forma irregular. Presentan halos difusos de feldespato potásico. Corta a las vetillas A1 y A2. Cortan a la cuarzo diorita y cuarzo monzonita. Corresponden a vetillas tardimagmáticas.
		A2: Tienen asociación mineralógica cuarzo-pirita-calcopirita con halo de biotita. Presentan textura granular y su espesor puede alcanzar los 15mm. Cortan a la cuarzo diorita. Corresponden a vetillas transicionales.
	Potásica Se presenta principalmente en vetillas A3 y en otros casos vetillas A1. Su asociación mineralógica corresponde a feldespato K±biotita±magnetita ±calcopirita.	A1: Vetillas de biotita-magnetita-calcopirita de algunos milímetros de espesor de textura fina a gruesa. Pueden contener proporciones variables de feldespato potásico. Cortan a la cuarzo diorita y cuarzo monzonita. Corresponden a vetillas tempranas.

Cuadro 3.2 Tipos de vetillas en las zonas de alteración hidrotermal. Las edades de los eventos hidrotermales han sido inferidas a partir de datos de alrededores de la zona de estudio: Rivera, 2006 y Mukasa, 1985.

3.6. Mineralización.

3.6.1. Zona de sulfuros primarios.

Esta zona corresponde a la mineralización hipógena que se formó durante el emplazamiento de la cuarzo monzonita y corresponde a los dos primeros eventos hidrotermales que tienen diferentes asociaciones de minerales de Fe y Cu.

En el evento hidrotermal A la mineralización de magnetita-calcopirita±pirita se encuentra principalmente vetillas tipo A1 y A2, y está asociada a la alteración feldespató potásico-biotita (Figura 3.3). Estas vetillas han sido cortadas por otras de un evento hidrotermal posterior.

Hacia la zona propilítica la mineralización es diseminada y en vetillas. La mineralización contiene principalmente pirita y en menor porcentaje calcopirita y magnetita. Los cristales de pirita de 500 μm son mayormente anhedrales y se encuentran dispersos y formando agregados. La pirita se encuentra junto con cristales de magnetita o calcopirita. Los cristales de calcopirita son subhedrales y miden 150 μm , aparentemente reemplaza a la pirita (Figura 3.7 C) y también a la magnetita. Los cristales de magnetita son subhedrales y tienen 500 μm , al parecer reemplazan a la pirita (Figura 3.7 D). En las vetillas de cuarzo y clorita también se ha encontrado pirita de segunda generación. Son cristales subhedrales más grandes (750 μm).

La presencia de magnetita y calcopirita diseminada en la zona propilítica indicarían un ambiente más profundo de alteración (Pirajno, 1992).

En el evento hidrotermal B la mineralización de calcopirita y pirita se encuentra en vetillas tipo B1 y B2 y está intercrecida con sericita (Figura 3.5). La incorporación de más vetillas con calcopirita de este evento y la superposición al anterior, hace que el contenido de cobre se incremente en esta etapa. Esto hecho se nota en superficie, donde los contenidos de cobre entre la zona fílica y argílica se encuentran entre 750-2750 ppm y hacia el centro del yacimiento estos valores llegan hasta los 3500 ppm.

Si bien es cierto el evento hidrotermal C no tiene relevancia por ser estéril, sin embargo la alteración potásica presenta trazas de mineralización diseminada de magnetita y calcopirita. La magnetita se presenta en cristales subhedrales y también se encuentra

rellenando microvenillas de 200 μm junto goethita y biotita. Una principal característica de la magnetita es que se encuentra alterada a hematita en sus planos de clivaje y muestra una textura martitizada (Figura 3.7 B). La calcopirita aparece en cristales subhedrales de 50 μm en la matriz del granito.

En la Cuadro 3.3 se puede apreciar un resumen de la mineralización hipógena en el yacimiento.

3.6.2. Zona enriquecida.

Es una capa de 14 a 28 m de espesor (Figura 3.2, sección C-C') más o menos paralela a la topografía con contenidos de cobre mayores que 0.5% y se encuentra entre 60 y 80 m de profundidad (Nebocat et al, 1999). La mineralización se presenta diseminada y principalmente como finas manchas de calcosita que reemplazan a la calcopirita y cubren a la pirita en las vetillas tipo B1 que cortan la cuarzo diorita y cuarzo monzonita. Cálculos preliminares sugieren que el recurso de cobre enriquecido sería de 20 millones de toneladas.

3.6.3. Zona de óxidos de cobre.

Consideramos como óxidos de cobre a todos los minerales como óxidos, sulfatos y carbonatos de cobre. En superficie ocurren principalmente en las zonas de alteración potásica y fílica como impregnaciones y rellenando fracturas. En algunas zonas de la alteración fílica podemos encontrar carbonatos de cobre y tenorita (o neotocita) rellenando fracturas, de igual forma, en la Quebrada Aijaracancha, el granito presenta fracturas rellenas de malaquita y azurita (Figura 3.8 A). También están presentes en coluviones (Figura 3.8 B), rellenando intersticios con tenorita, malaquita y azurita. La malaquita y tenorita se presentan en formas botroidales, mientras que la azurita tiene hábito tabular (Figura 3.8 C).

En profundidad los óxidos de cobre se reemplazan a los sulfuros primarios (calcopirita) de vetillas y rellenan fracturas (Figura 3.3 D).

3.6.4. Zona lixiviada.

Esta zona se caracteriza por presentar limonitas y jarosita en forma diseminada y en vetillas principalmente. De manera general, la jarosita es más frecuente en las

márgenes del yacimiento y disminuye hacia el centro. La jarosita se encuentra junto con la goethita y acompaña a la alteración argílica. Hacia el centro del yacimiento es más común el contenido de hematita y goethita.

Esta zona presenta un espesor variable entre 25 a 100 m (Figura 3.2, sección C-C') con un área de 500 x 650 m. El espesor mayor se encuentra en el centro del yacimiento, a partir de allí disminuye hacia el NE y SO.

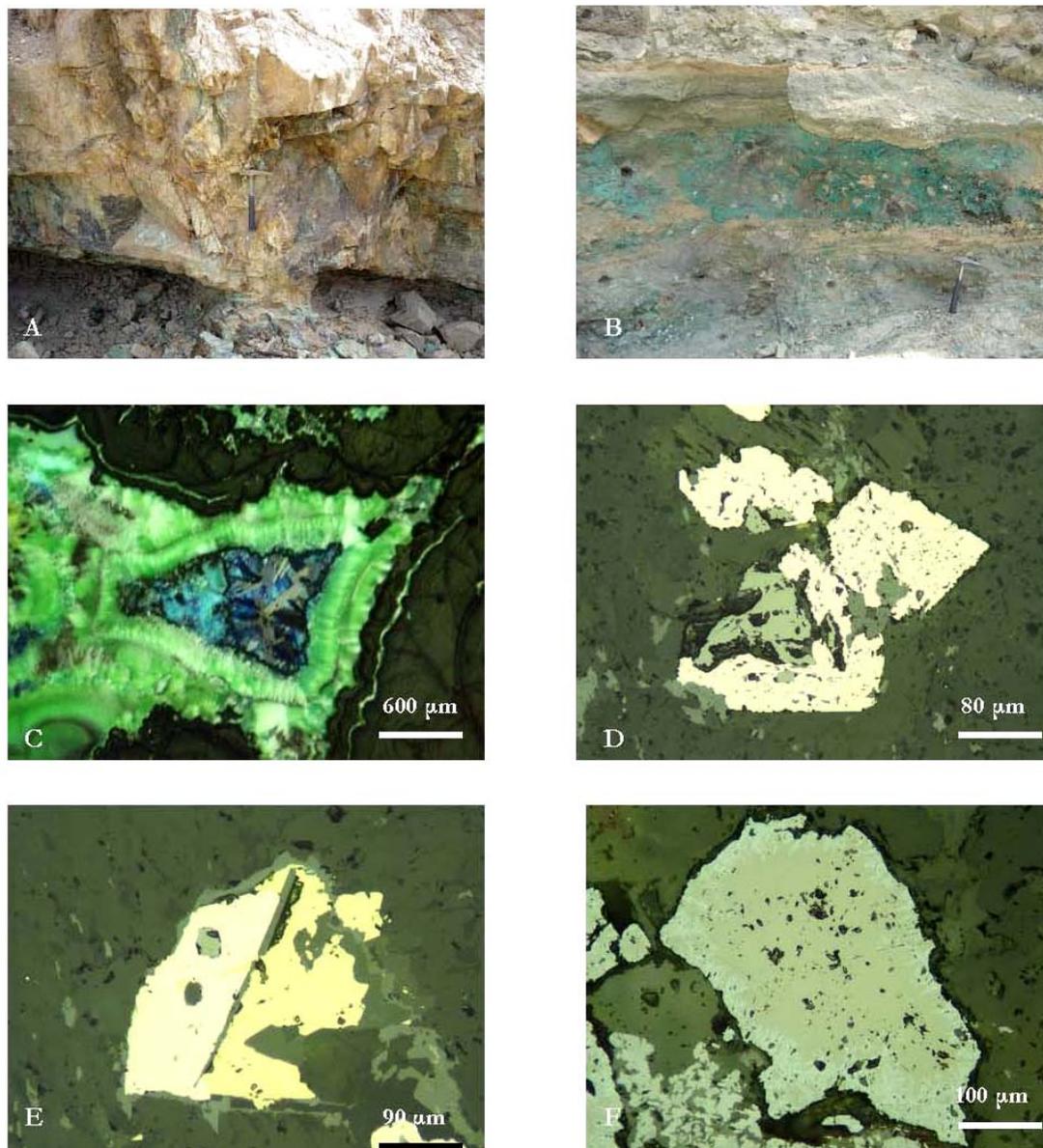


Figura 3.8 Fotos de afloramientos y secciones pulidas de las zonas de óxidos de cobre y sulfuros primarios. A) Fracturas rellenas de tenorita, malaquita y azurita en granito con alteración potásica ubicado en el margen derecho de la Quebrada Aijracancha B) Óxidos y carbonatos de cobre que rellenan intersticios de los conglomerados en depósito coluvial ubicado en la Quebrada Aijracancha. C) Texturas coloformes de crecimiento tenorita y malaquita junto con cristales tabulares de azurita (Muestra 008). D) Reemplazamiento de magnetita en pirita en matriz de cuarzo diorita (Muestra 052) E) Reemplazamiento de calcopirita en pirita en matriz de cuarzo diorita (Muestra 052). F) Magnetita alterada a hematita con

Muestra	Roca probable	Tipo de Alteración		Asoc. de minerales	Ganga	Comentarios
004	Dique félsico	Cuarzo-Sericita	K-3-1; S-7-1	py I - cp, py II - goh	cz	py I subhedral de 50 - 375 μm en agregados en la matriz y en menor proporción cp subhedral de 5 μm . Vetilla de 0,75 mm. con cz-fpK con py II subhedral de 750 μm con halo de goh.
008	Relleno de intersticios de conglomerados	-	-	ten-mlq-az	-	ten y mlq con textura coloforme intercrecidas. Ten presenta fracturas de tipo "mud crack"; esta intercrecida con mlq con RI verdes. La az tienen hábito tabular con RI azules.
011	Granito aplítico	Potásica	K-2-1; Bt-3-1; Ch-5-10	mgt-hm-goh-cp; az-mlq	fpk, cz	mgt y cp disseminada en matriz. Cp subhedral de 50 μm en fpK y cz primario; mgt martitizada junto con goh en microvenillas de 200 μm asociada a clos y cz. Az y mlq crecen en fracturas
043	Cuarzo monzonita	Cuarzo-Sericita	Ch-5-5; S-6-8	py-cp; mlq-ten-goh	cz, pg, fpK	py de 25 μm con halo de hm de 80 μm y cp subhedral de 10-25 μm en cz de la matriz de la roca. Mlq con textura fibrosa creciendo en vetilla de cz junto con mlq, goh y ten.
052	Cuarzo diorita	Propilítica	Ch-4-10; A-3-10	mgt-cp-py I, py II	pg, cz, fpK	py I euhedral - subhedral de 500 μm junto con mgt y cp en matriz de la roca, corta a venilla de cz. Py II subhedral de 750 μm en vetilla de cz subhedral de 1,75 mm. Mgt euhedral - subhedral de 500 μm reemplaza a py I, no presenta martitización. Cp anhedral - subhedral de 150 μm reemplaza mgt y py I.

Cuadro 3.3 Asociación de sulfuros y óxidos en la mineralización hipógena y supérgena.

3.7. Paragénesis.

Los minerales de mena y de alteración han sido ordenados en una secuencia paragenética según su ubicación en las zonas de alteración y al evento hidrotermal que corresponde como se aprecia en la Cuadro 3.4.

MINERALES	EVENTO HIDROTHERMAL				
	A1 Potásico	A2 Propilítico	B Cuarzo-Sericita	C Potásico	D Cuarzo-Sericita
Biotita	■			■	
Cuarzo	■				
Feldespato K	■			■	
Clorita		■			
Sericita			■		■
Pirita		■		■	
Magnetita	■			■	
Calcopirita	■			■	

Cuadro 3.4 . Secuencia paragenética de la mineralización hipógena del Pórfido de cobre Lara.

CAPÍTULO IV

INCLUSIONES FLUIDAS

4.1. Introducción.

En el capítulo anterior se ha definido las zonas de alteración hidrotermal con sus respectivas asociaciones de minerales, así como las relaciones espaciales temporales de los eventos hidrotermales. De la misma manera, se ha establecido cuál fue la secuencia paragenética de la mineralización en el pórfido de cobre Lara.

En este capítulo investigaremos cuáles fueron las características de los fluidos hidrotermales y cuál fue la temperatura de formación de cada evento hidrotermal, especialmente de aquellos responsables de la mineralización económica, de acuerdo a su asociación mineralógica. Así mismo, se determinará cuál fue la presión y profundidad de captura de los eventos hidrotermales A y B..

4.2. Metodología.

Detalles y características del equipo de microtermometría de inclusiones fluidas fue descrito anteriormente en la parte 1.7.2 del Capítulo I.

4.2.1. Petrografía de inclusiones fluidas y selecciones de familias (FIF).

En primer lugar se realizó el estudio de petrografía de inclusiones fluidas en seis muestras del yacimiento dónde se reconocieron los minerales relacionados a la mineralización y a las alteraciones hidrotermales. Anteriormente ya se habían hecho estudios petrográficos y minerográficos de las muestras para establecer la asociaciones de minerales hidrotermales (Cuadro 3.1) y la paragénesis de los minerales (Cuadro 3.3) De esta manera se estudiaron 5 generaciones de vetillas de cuarzo hidrotermal, de las cuales se seleccionaron 3 vetillas para el estudio de microtermometría (A3, A4 y B1).

En esta etapa se seleccionaron sólo aquellas inclusiones que se formaron en o cerca del momento de la génesis del mineral hospedante, es decir, las inclusiones primarias y pseudo secundarias (Sheperd, 1985). De esta forma, se tomaron familias de inclusiones fluidas (FIF), definidas como un grupo petrográficamente asociado y bien discriminado (Goldstein & Reynolds, 1994), donde cada inclusión fue caracterizada por: 1) No. de familia, 2) tamaño, 3) forma, 4) tipo, 5) relación de relleno ($F=L/L+V$), 6) composición y forma del eventual mineral hijo hospedado en la inclusión (Cuadros 3.3 & 6.1 in Shepherd et al, 1985).

Para definir el tipo de inclusión fluida se utilizó la clasificación de Nash (1976) referida al punto 1.6.2.1, la cual se refiere a la composición de la inclusión (Figura 1.5) y las clasifica en líquidas (Tipo I) gaseosas (Tipo II) y aquellas con cristal de halita (Tipo III). Sin embargo, las inclusiones fluidas también fueron clasificadas según su paragénesis en primarias, secundarias o pseudo secundarias (Roedder, 1979)

Una vez seleccionadas las FIF, se pasó a la etapa de microtermometría para el enfriamiento y calentamiento de las inclusiones, donde se midió 1) temperatura de fusión del hielo (T_m), 2) temperatura de homogenización (T_h) a la fase vapor (T_{hv}) o a la fase líquida (T_{hL}).

Siguiendo la recomendación de Goldstein & Reynolds (1994), no se midieron sólo las inclusiones grandes fácilmente visibles, tampoco nos restringimos a recolectar inclusiones pequeñas, ya que la población de los datos de inclusiones en una FIF no debe ser sesgada. Cada población debe tener datos muy consistentes, es decir, debe tener inclusiones de diferentes formas y tamaños. De esta manera, a mayor consistencia de datos entre inclusiones pequeñas y grandes y de diferentes tamaños, se puede requerir de menos datos. Por este motivo, uno debe evaluar cuán consistentes son las poblaciones de las FIF, puesto que la interpretación de cada FIF con alto grado de confianza es tan representativa como la interpretación de muchas FIF equivalentes.

4.2.2. Cálculos termodinámicos y representación de resultados.

Para los cálculos termodinámicos de datos de microtermometría se utilizó el paquete de programas de cómputo FLUIDS v. 01/03, desarrollado para estudios de inclusiones fluidas por Ronald J. Bakker (in Samson, 3003) y disponible en internet. De la misma manera, para los cálculos estadísticos y representación de resultados en gráficos se utilizó el SPSS v.11.

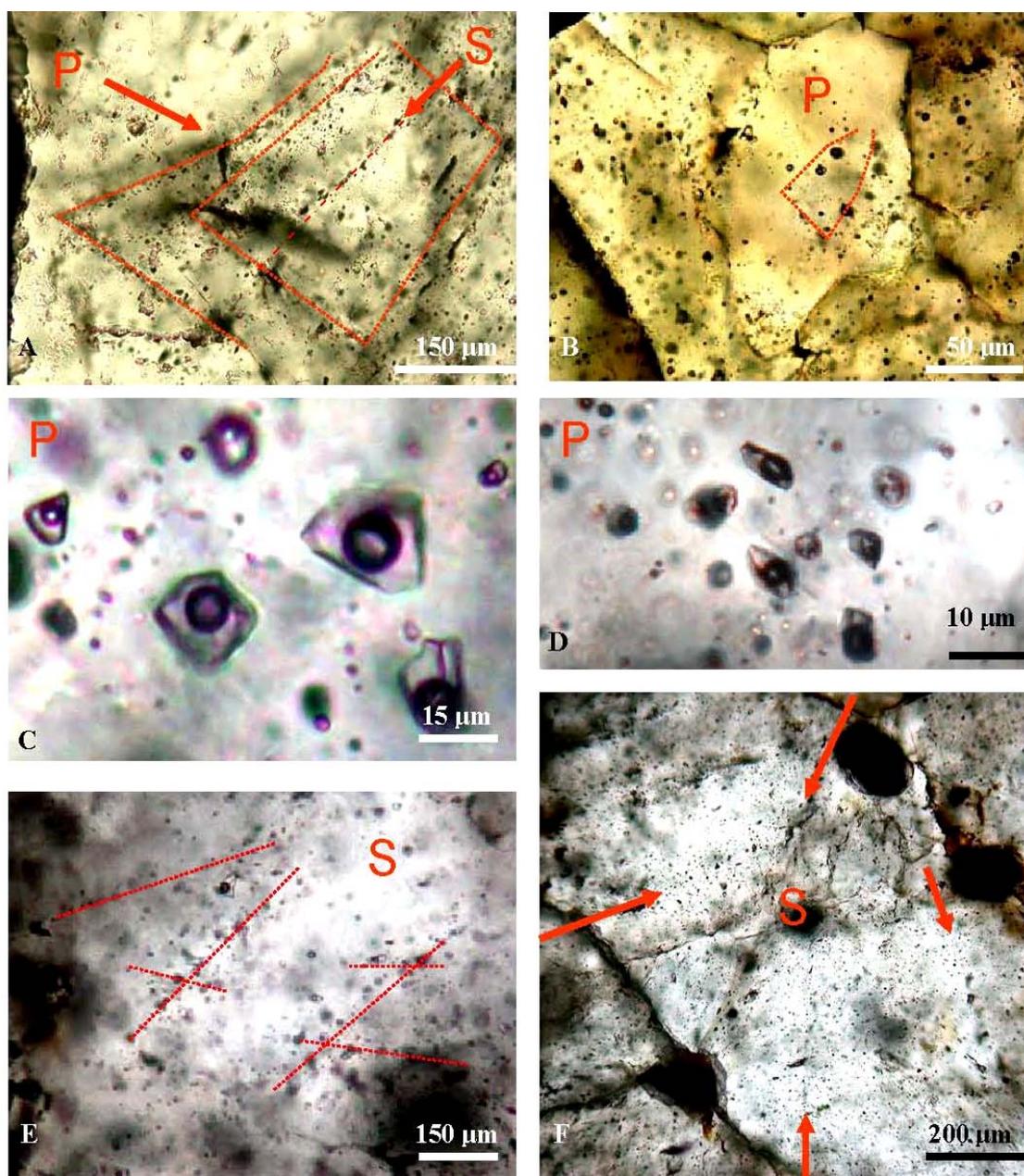


Figura. 4.1 Inclusiones fluidas primarias y secundarias encontradas en el Pórfido de cobre Lara.

A) Inclusiones fluidas primarias (P) formadas en la zona de crecimiento de un cristal de cuarzo son cortadas por inclusiones secundarias (S) en una vetilla tipo A4: cz-clo-cbs-py de la zona de alteración propilítica (Muestra 052). B) Familia de inclusiones fluidas (FIF) primarias en la parte central de un cristal subhedral de cuarzo hidrotremal de una vetilla tipo A3: cuarzo-ortoclasa de la zona de alteración potásica (Muestra 041). C) y D) Familia de inclusiones fluidas (FIF) primarias. (E) Inclusiones fluidas secundarias alineadas en un cristal de cuarzo anhedral que se cruzan entre sí (Muestra 052). F) Cristal subhedral de cuarzo con microfisuras en vetilla tipo A3: cuarzo-ortoclasa con inclusiones secundarias (Muestra 041).

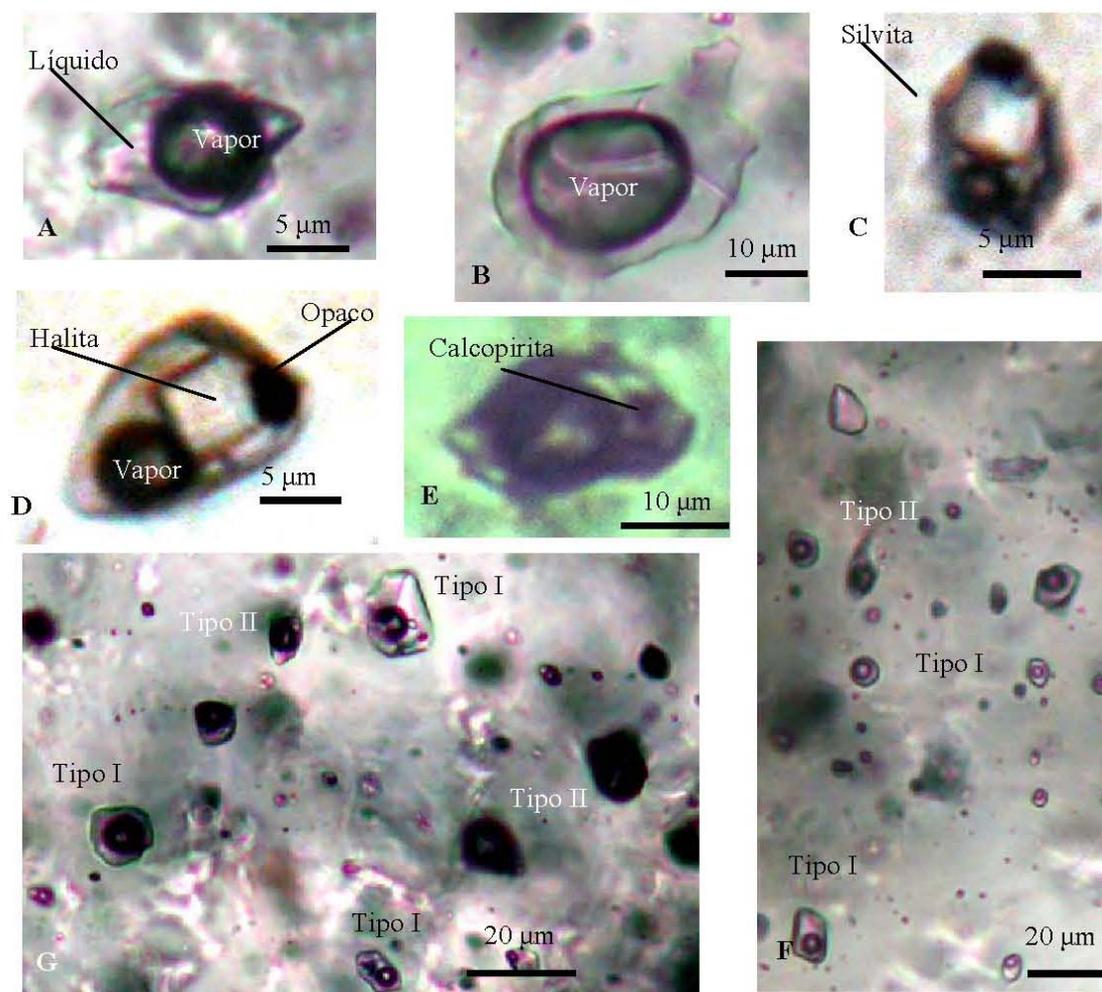


Figura 4.2 Tipos de inclusiones fluidas según su composición. A) y B) Inclusiones fluidas Tipo II que corresponden a una familia de inclusiones fluidas primarias de una vetilla tipo A3: cuarzo-ortoclasa. C) y D) Inclusiones fluidas hipersalinas Tipo III con cristales de halita, silvita y cristales accidentales opacos en vetilla tipo A3: cuarzo-ortoclasa. E) Vetilla Tipo B1: cuarzo-sericita-clorita-limonitas (Muestra 043) con inclusión fluida Tipo I atípica que homogeniza al estado líquido y presenta un cristal de calcopirita. F) Familia de inclusiones fluidas primarias Tipo I y II en una vetilla tipo B1: cuarzo-sericita-limonitas (Muestra 039). G) Inclusiones fluidas Tipo I y II en vetilla tipo A4: cuarzo-clorita-carbonatos-pirita (Muestra 052).

No	Muestra	Alteración hidrotermal			Mineralización		Tipo de cuarzo	Tipo FIF	OBSERVACIONES
		Tipo	Asociación minerales	Etapas	Tipo	Asoc. de minerales			
1	011	Potásica	K-2-1; Bt-3-1; Ch-5-10	C	diseminada	mg-cp	Ígneo	S	cp dentro de fpk y czo; mag junto con cz primario.
2	034	Argílica	S-3-1; A-5-5	B	vetilla B1	cz-ser ±py	Hidrotermal	P	py euhedraledral 20 µm y cp subhedral 10-30 µm en cz hidrotermal.
					diseminada	py	Ígneo	S	py subhedral 50 µm mayormente en fpk que cz. Mineralización diseminada es mayor que en vetilla.
3	035	Cuarzo-Sericita	S-10-1	D	vetilla D1	cz-ser	Hidrotermal	P	Vetilla con sutura.
					diseminada	py-cp	Ígneo	S	py subhedral 15 µm en fpk y cz; cp euhedral 20 µm en cz euhedral 350 µm; goh y hm con cristales euhedral 10 µm en agregados.
4	038	Cuarzo-Sericita	S-7-6; A-5-10	B	vetilla B1	cz-ser	Hidrotermal	P	Vetilla con sutura.
5	039	Filica-Potásica	K-8-1; S-10-1; Q-6-1	B	vetilla B1	cz- -ser ± lims	Hidrotermal	P	Vetilla con sutura; cz subhedral con caras planas; cp euhedral-subhedral 100-200 µm en cz.
					diseminado	cp	Ígneo	S	cp euhedral-subhedral 50-150 µm en cz.
6	040	Cuarzo-Sericita	Ch-7-10; S-10-1; A-8-10	B	vetilla B1	cz-ser-goh	Hidrotermal	P	Vetilla con halo de sericita; cz subhedral concaras planas de 1,5 µm.
7	041	Potásica	K-6-1; Bt-3-7; Ch-3-4	A	vetilla A3	cz-or	Hidrotermal	P	cz anhedral 750 µm; fpk anhedral 1 mm.
8	042	Argílica	S-4-2; A-10-10	B	vetilla B1	cz-ser-lims	Hidrotermal	P	Vetilla con sutura rellena de lims. cz en frag > 250 µm; ser como halo.
9	043	Cuarzo-Sericita	Ch-5-5; S-6-8	B	vetilla B1	cz-ser-clo-lims; mlq-ten-goh	Hidrotermal	P	Vetilla 2 mm con cz anhedral.
					diseminada	lims-cp-py	Ígneo	S	lims anhedral-subhedral en agregados; py subhedral 25 µm con halo de hm 65 µm en cz subhedral de 2,5 mm; cp subhedral 10-25 µm en cz.
10	044	Potásica	K-6-1; S-2-1; A-4-10	C	vetilla C1	cz-or; cz-ser	Hidrotermal	P	cz subhedral 1,5 mm; fpk anhedral 2 mm. También se observa vetilla tipo D1: cz-ser superpuesta ala alteración potásica.
11	046	Potásica	Ch-4-4; K-7-1; A-3-4	A	vetilla A3	cz-or ± cp	Hidrotermal	P	cp subhedral 8 µm en cz subhedral 259 µm.
					diseminada	cp	Ígneo	S	cp anhedral-subhedral 30-40 µm en cz subhedral 500-600 µm.
12	052	Propilitica	Ch-4-10; A-3-10	A	vetilla A4	cz-clo-cbs-py	Hidrotermal	P, S	py I corta vetilla. Py II subhedral 750 µm con cz subhedral 1,75 mm.
					diseminado	py-cp-mg	Ígneo	S	py I subhedral 500 µm en agregados, junto con cp y mag y cz subhedral; cp subhedral 150 µm; mg anhedral-subhedral 500 µm.

Cuadro 4.1 Resumen de la petrografía de inclusiones fluidas y su relación con los eventos hidrotermales en el Pórfido Lara. El tipo de FIF se refiere a las inclusiones relacionadas a la mineralización donde debería hacerse la microtermometría. FIF: Familia de inclusiones fluidas, P: inclusiones primarias, S: inclusiones secundarias, cbs: carbonatos, cp: calcopirita, clo: cloritas, cz: cuarzo, fpk: feldespatos potásicos, goh: gohetita, hm: hematita, lims: limonitas, mg: magnetita, mlq: malaquita, ser: sericita, ten: tenorita.

4.3. Caracterización de las inclusiones fluidas, temperaturas de homogenización, presión y profundidad de captura en el evento hidrotermal A.

4.3.1. Inclusiones fluidas relacionadas con el evento A1: Alteración potásica.

Las inclusiones fluidas de la zona potásica se estudiaron en vetillas tipo A3: cuarzo-ortoclasa en las muestras 041 y 046. De todas las mediciones realizadas durante la microtermometría sólo se consideraron 66 datos que fueron fiables.

En la muestra 041 se tomaron medidas en inclusiones fluidas primarias (n=36) y secundarias (n=17), sin embargo, en la muestra 046 sólo se encontraron inclusiones secundarias (n=13).

Las inclusiones secundarias de la zona potásica presentaron datos de microtermometría de mucho contraste respecto a las inclusiones primarias. Estos datos se parecen mejor a los encontrados en la zona propilítica cómo se verá más adelante.

a) Tipos de inclusiones fluidas.

Las inclusiones se encuentran en vetillas tipo A3 de cuarzo hidrotermal anhedral y ortoclasa subhedral. Se caracterizan por ser de Tipo III saturadas con cristales hijo de halita (Muestra 041) y pueden tener cristales accidentales opacos, como se muestra en las Figuras 4.2 C y D, no obstante, también se encuentran inclusiones Tipo I y Tipo II (Figura 4.2). Presentan formas regulares, ovoides y tabulares principalmente, donde los tamaños varían entre 2.8 - 22.4 μm con una media de 7.8 μm . La relación del volumen de llenado (líquido/vapor) se encuentra entre el 20% - 80%, con una media del 50%. En las inclusiones hipersalinas el cristal de halita puede ocupar entre el 15% y el 35%. Por otra parte, las inclusiones Tipo II pueden tener una burbuja grande de vapor que ocupa hasta el 90% del volumen. Es necesario recalcar que en esta zona de alteración no se encontraron inclusiones fluidas con CO_2 .

En un sentido amplio, podemos apreciar en la Figura 4.3 el tamaño de las inclusiones fluidas según su origen y composición, donde de manera general podemos notar que las inclusiones primarias Tipo I y II presentan tamaños mayores que las secundarias.

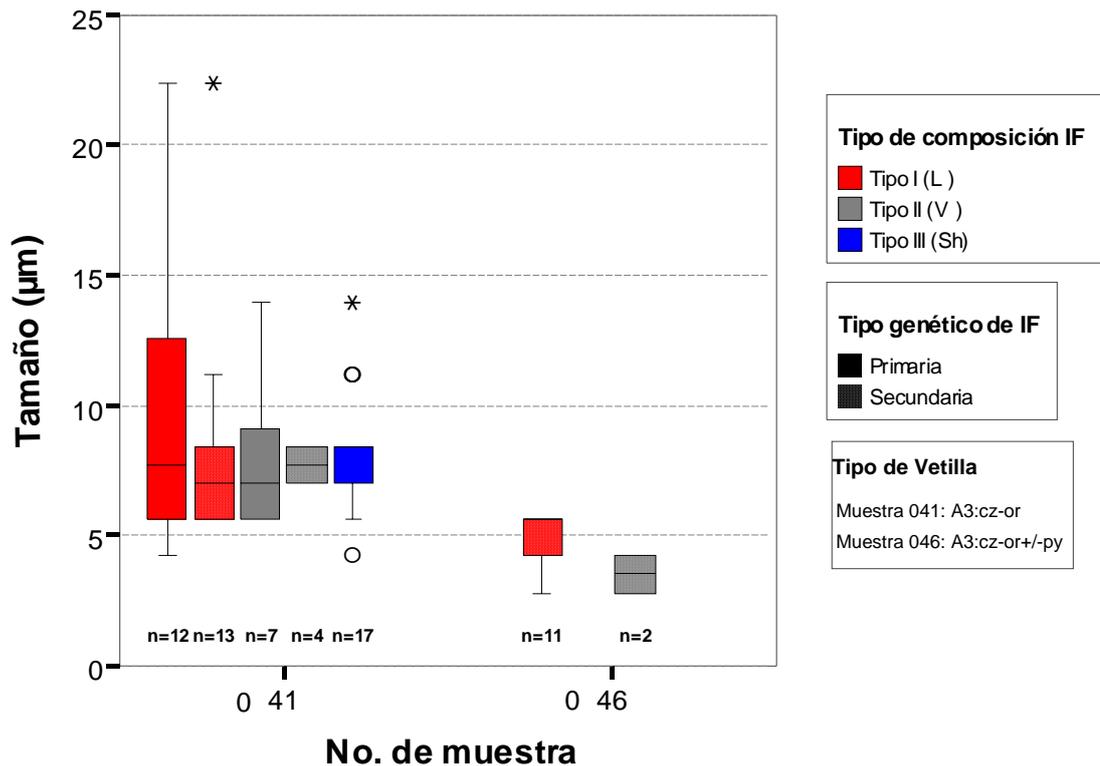


Figura 4.3 Tipos y tamaños de inclusiones fluidas en la zona de alteración potásica. F: inclusión fluida, L: IF líquida, V: IF rica en vapor, Sh: IF hipersalina con cristal hijo (halita). Simbología: cz: cuarzo, or: ortoclasa, py: pirita.

b) Composición del fluido.

La composición del fluido hidrotermal en las inclusiones primarias está dominada por un sistema salino $H_2O-NaCl-KCl$, como lo evidencian los cristales hijos de halita y silvita encontrados en inclusiones hipersalinas Tipo III (Fig 4.2 C y D). La salinidad de estas inclusiones puede variar entre 45 % - 50 % de NaCl. No obstante, las inclusiones Tipo I presentan un rango de salinidades de 16 % - 26 % de NaCl equivalente (por fusión de la halita).

A diferencia de las inclusiones primarias, las inclusiones secundarias presentan salinidades más bajas, entre 3 % y 10 % de NaCl equivalente. Como se verá más adelante, la salinidad de estas inclusiones presentan el mismo rango que aquellas de la zonas de alteración propilitica y filica.

En la Figura 4.4 las salinidades encontradas para los diferentes tipos de inclusiones fluidas en la zona de alteración potásica. Se puede apreciar que las inclusiones secundarias muestran las salinidades más bajas que las inclusiones primarias.

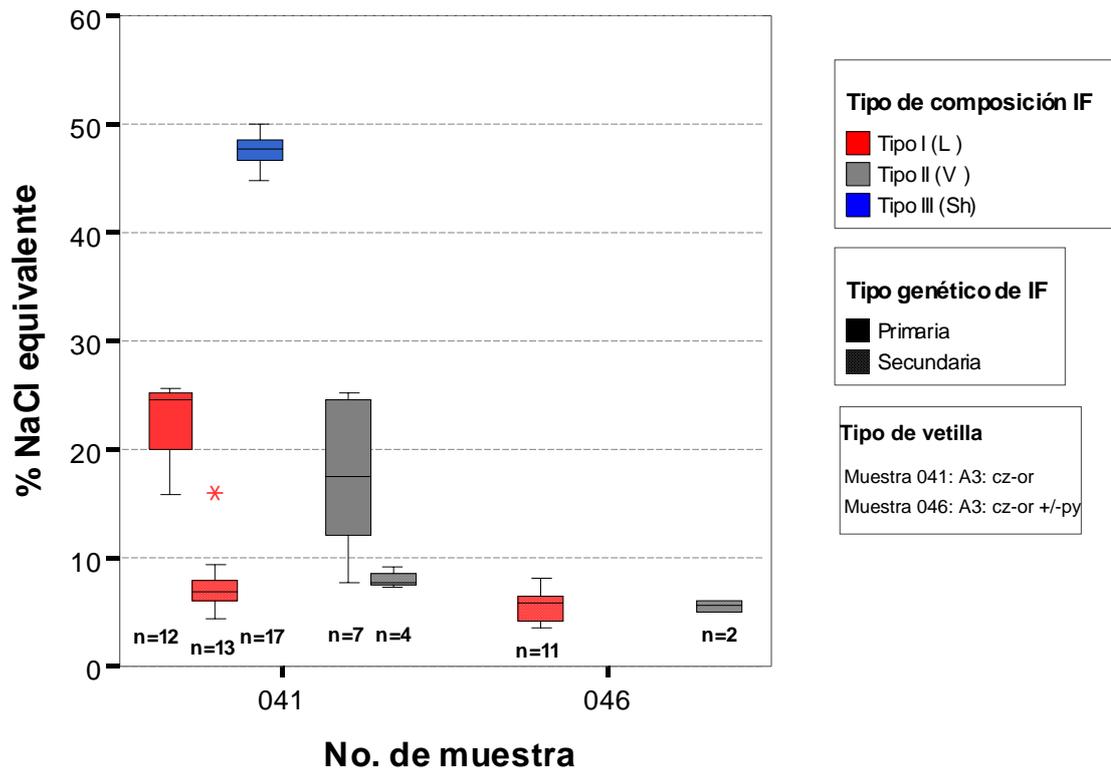


Figura 4.4 Rango de salinidades de los diferentes tipos de inclusiones fluidas en la zona de alteración potásica. F: inclusión fluida, L: IF líquida, V: IF rica en vapor, Sh: IF hipersalina con cristal hijo (halita). Simbología: cz: cuarzo, or: ortoclasa, py: pirita.

La Figura 4.5 nos ilustra las salinidades en histogramas de frecuencias para las diferentes familias de inclusiones fluidas de las muestras 041 y 046.

c) Temperatura de homogenización.

La temperatura de homogenización de las inclusiones primarias fue obtenida de 36 datos de microtermometría en la vetilla tipo A3: cuarzo-ortoclasa (Muestra 041). De estas medidas, 12 inclusiones fluidas homogenizaron a la fase líquida (Tipo I) dando un rango de 420 °C – 490 °C con una media 451 °C. De igual manera, las inclusiones Tipo II (n=7) homogenizaron a la fase de vapor en un rango de 430 °C – 500 °C, dando una media de 462 °C. Así mismo, las familias de inclusiones hipersalinas Tipo III (n=17) homogenizaron al estado líquido (Th_L) y su temperatura de homogenización fue obtenida a partir de la temperatura de disolución de la halita (T_s), donde $T_s > Th_L$. De esta manera, el rango de temperaturas estuvo entre 390 °C – 460 °C y su media fue 425 °C (Figura 4.6).

Como se puede apreciar en la Figura 4.6, existe un rango común de temperaturas de

homogenización entre las inclusiones ricas en líquido Tipo I y ricas en vapor Tipo II, lo que sugiere una zona de ebullición en la muestra 041.

Por otro lado, en las inclusiones secundarias (n=30) se encontraron dos rangos de temperaturas de homogenización, el primero ente 260 - 280°C y el segundo entre 360 y 420°C (Figuras 4.6 y 4.7).

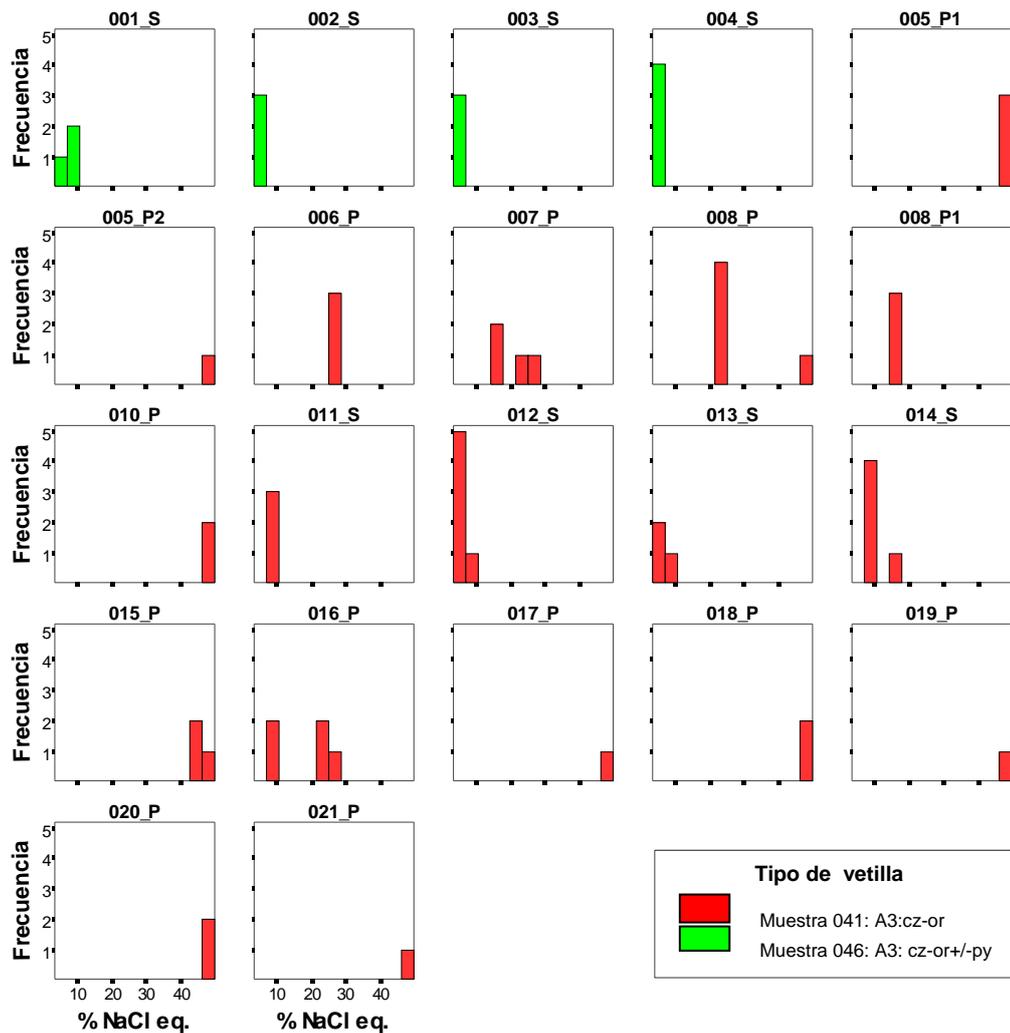


Figura 4.5 Histogramas de frecuencia de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración potásica. 001_S: No. de FIF, P: inclusión fluida primaria, S: inclusión fluida secundaria

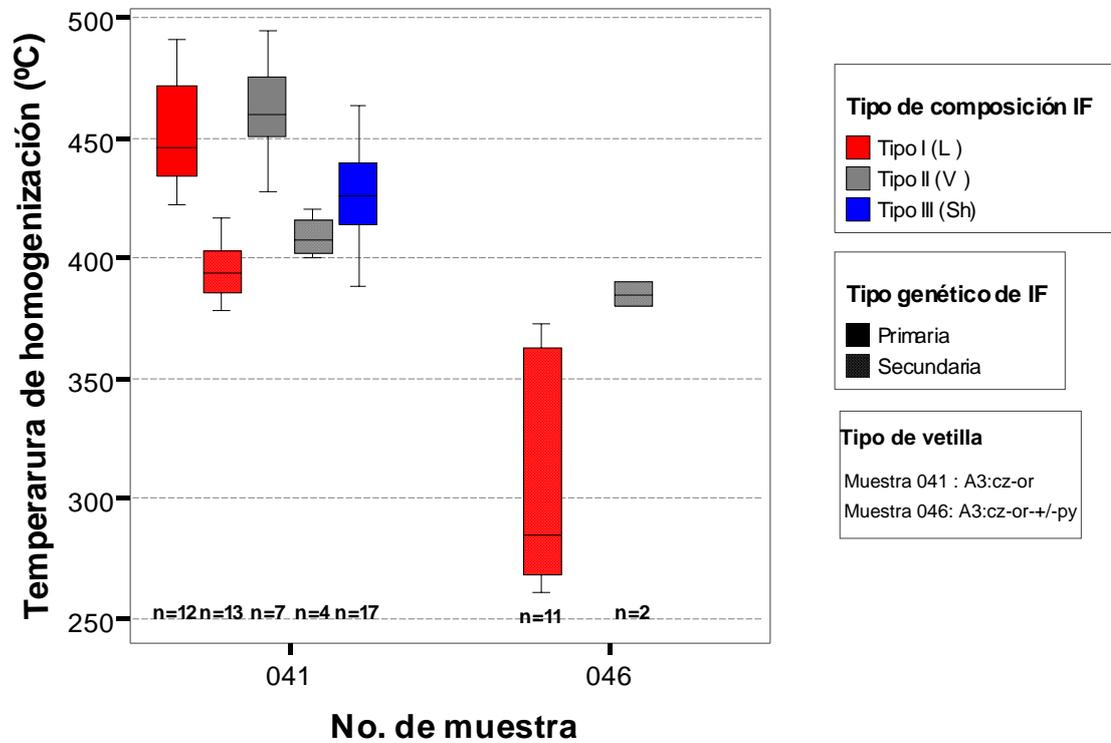


Figura 4.6 Temperaturas de homogenización de los diferentes tipos de inclusiones fluidas en la zona de alteración potásica. IF: inclusión fluida, L: IF líquida, V: IF rica en vapor, Sh: IF hipersalina con cristal hijo (halita). Simbología: cz: cuarzo, or: ortoclasa, py: pirita.

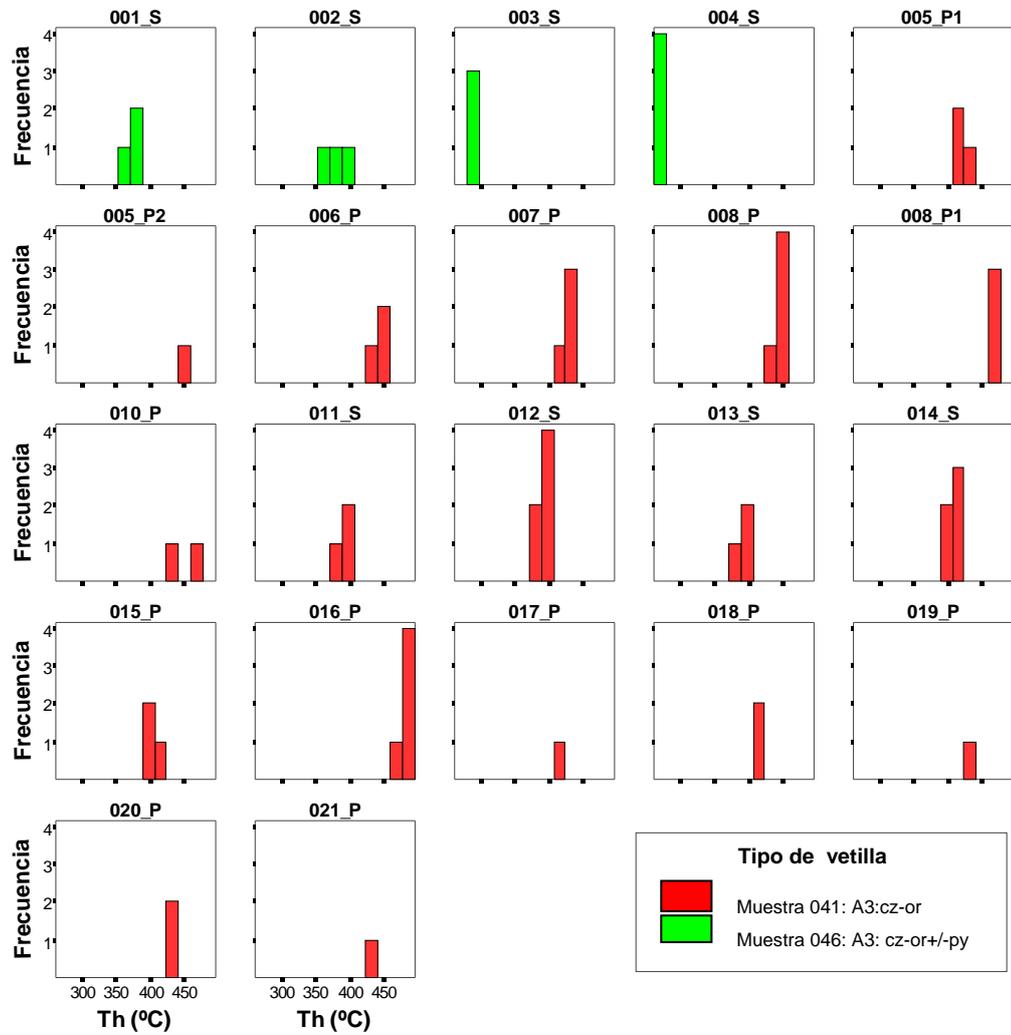


Figura 4.7 Histogramas de frecuencia de temperaturas de homogenización de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración potásica. 001_S: No. de FIF, P: inclusión fluida primaria, S: inclusión fluida secundaria

d) Estimación de la temperatura, presión y profundidad de captura.

En la muestra 041 (Figura 4.8) se ha distinguido coexistencia de inclusiones fluidas primarias ricas en líquido Tipo I y ricas en vapor Tipo II en las FIF: 006_P (n=3) y 008_P (n=4). Las FIF se encuentran en cristales de cuarzo hidrotermal de una misma generación. Ambas FIF tienen un rango común de temperatura de homogenización entre 439 °C y 454 °C con una salinidad entre 23 % y 26 % de NaCl equivalente. Las inclusiones Tipo I tienen un volumen de llenado de líquido de 55 % y las Tipo II de 45%. Estas características sugieren que las inclusiones fueron atrapadas a partir de un fluido en ebullición, donde coexistía la fase líquida + gaseosa. Por lo tanto, la temperatura de homogenización (T_h) es igual a la temperatura de captura (T_c), por lo que no es necesario hacer una corrección por presión.

Con estas consideraciones, podemos afirmar que la temperatura de captura (T_c) del fluido hidrotermal salino H_2O -NaCl-KCl fue a 450 °C. La salinidad (S) tenía 24 % de NaCl equivalente y su densidad (ρ) era $1.18 \text{ g}\cdot\text{cc}^{-1}$.

Si asumimos que la captura de la inclusión sucedió a partir de un sistema salino H_2O -NaCl, y si nos basamos en la inmiscibilidad de los fluidos, entonces podemos calcular la presión de captura (P). Con los datos anteriores (T_c y S) podemos calcularla a partir de las isothermas de ebullición (Figura 1.9, Shepperd et al, 1985), o con el programa BULK (Ronald J. Bakker, 2003 in Samson, 2003). De esta manera, la presión de captura calculada es 430 bares. Bajo estas condiciones la roca es dúctil lo cual evita la presencia de fracturas abiertas, excepto en periodos cortos de grandes esfuerzos (Fourier, 1991 in Hedenquist et al, 1998).

Bajo estas condiciones, el régimen de presión durante la alteración potásica habría sido litostática, donde la profundidad litostática estaría definida por:

$$H = P / \rho \cdot g,$$

Donde:

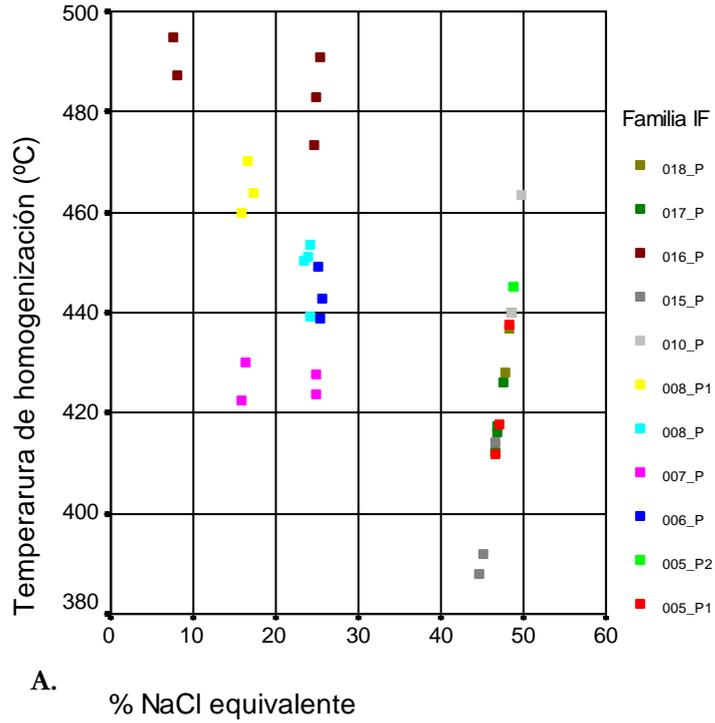
H: Profundidad (metros)

P: (bares)

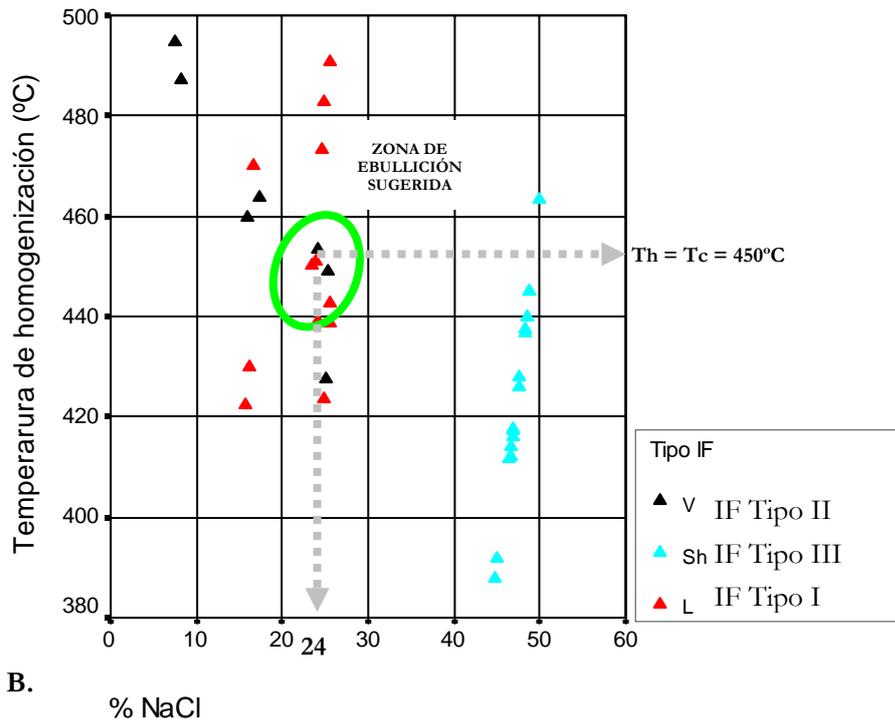
ρ : densidad ($\text{g}\cdot\text{cc}^{-1}$)

g: gravedad ($\text{kp}\cdot\text{cm}^{-2}$)

Por lo tanto, el sistema habría estado sometido a una sobrecarga litostática de 1 623 m ($H = 430 / (2.7 \times 0.0981)$).



A. % NaCl equivalente



B. % NaCl

Figura 4.8 Gráficos de salinidad versus temperatura de homogenización en la zona de alteración potásica. Las familias de de inclusiones fluidas primarias corresponden a cristales de cuarzo hidrotermal de la misma generación en vetilla tipo A3 de la muestra 041. A. Salinidad versus temperatura de homogenización expresado por familias de inclusiones fluidas (FIF). B. Salinidad versus temperatura de homogenización expresado por tipos de inclusiones fluidas.

4.3.2. Inclusiones fluidas relacionadas con el evento A2: Alteración propilítica.

En la zona propilítica se estudiaron las vetillas A4: cuarzo-clorita-carbonatos-pirita de la muestra 052, donde se tomaron 28 datos fiables de microtermometría de inclusiones primarias (n=18) y secundarias (n=10).

a) Tipos de inclusiones fluidas

Las vetillas A4 se caracterizan por presentar inclusiones subsaturadas Tipo I (Figuras 4.2 F y G). Estas inclusiones presentan formas regulares principalmente y ovoides, donde los tamaños varían entre 2.8 - 14 μm con un volumen de llenado de líquido de 60 % – 80 %. (Figura 4.9).

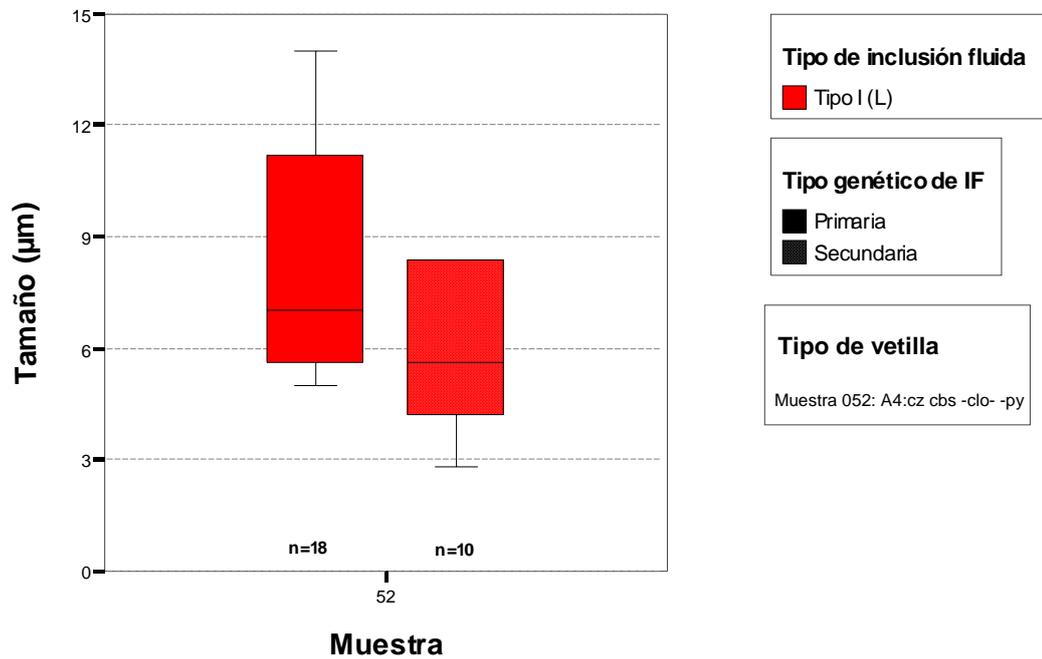


Figura 4.9 **Tamaños de inclusiones primarias y secundarias Tipo I en la zona de alteración propilítica.** IF: inclusión fluida, L: IF líquida. Simbología: cz: cuarzo, clo:clorita, cbs: carbonatos, py: pirita

b) **Composición de fluidos.**

La salinidad encontrada en las inclusiones primarias varía entre 5 % y 10% de NaCl equivalente, mientras que las secundarias presentan un rango menor entre 4 % y 6 %.

El rango de salinidades de la zona propilítica es muy semejante a aquel encontrado en las inclusiones secundarias de la zona potásica (Figura 4.4). Esta semejanza nos permite proponer que las inclusiones secundarias de la zona potásica fueron contemporáneas con las inclusiones de la zona propilítica, por lo cual la composición del fluido hidrotermal correspondería a un sistema salino H₂O-NaCl-KCl diluido (Figs. 4.10 y 4.11).

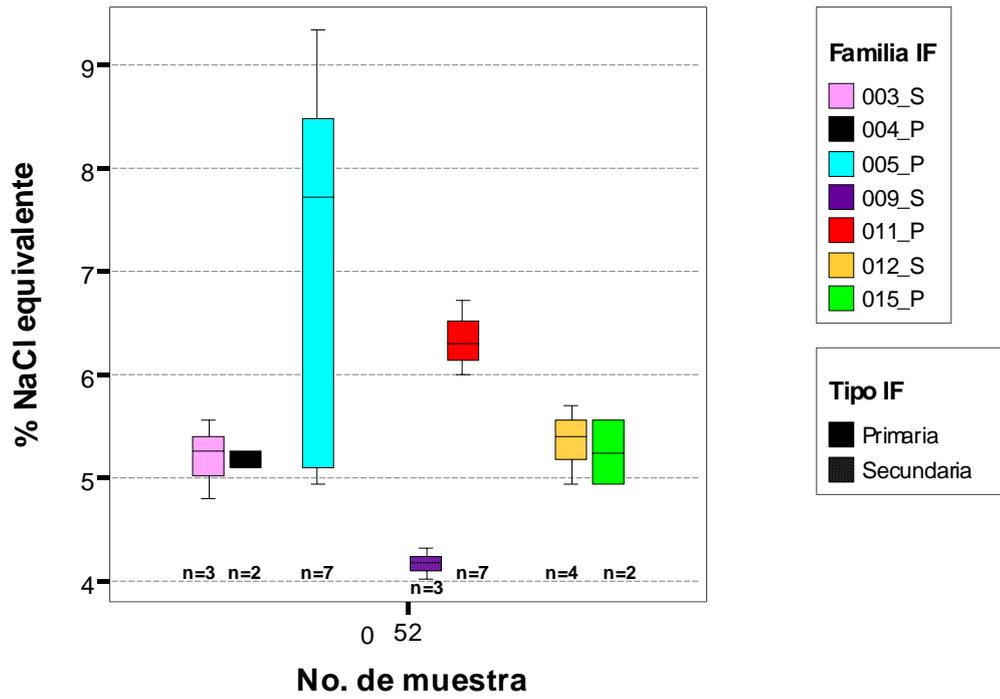


Figura 4.10 Rango de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración propilítica. Los colores representan las FIF Tipo I fiables encontradas en la vetilla tipo A4 cuarzo-clorita-carbonato-pirita (Muestra 052). 003_S: No. FIF, P: inclusión fluida primaria, S: inclusión fluida secundaria.

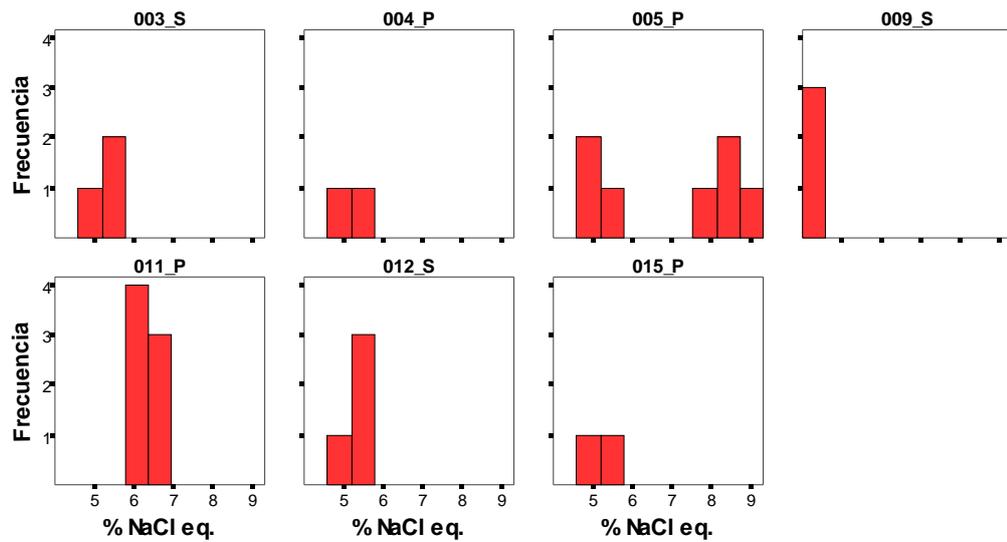


Figura 4.11 Histogramas de frecuencia de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración propilítica. FIF Tipo I en la vetilla tipo A4: cuarzo-clorita-carbonato-pirita (Muestra 052). 003_S: No. FIF, P: inclusión fluida primaria, S: inclusión fluida secundaria

c) Temperatura de homogenización.

La temperatura de homogenización de las inclusiones primarias tiene un rango de 355 °C a 375 °C con una media de 360 °C. De la misma manera, la temperatura de homogenización de las inclusiones secundarias es inferior que la de las primarias, encontrándose entre 240 °C y 290 °C con una media de 267 °C (Figura 4.12).

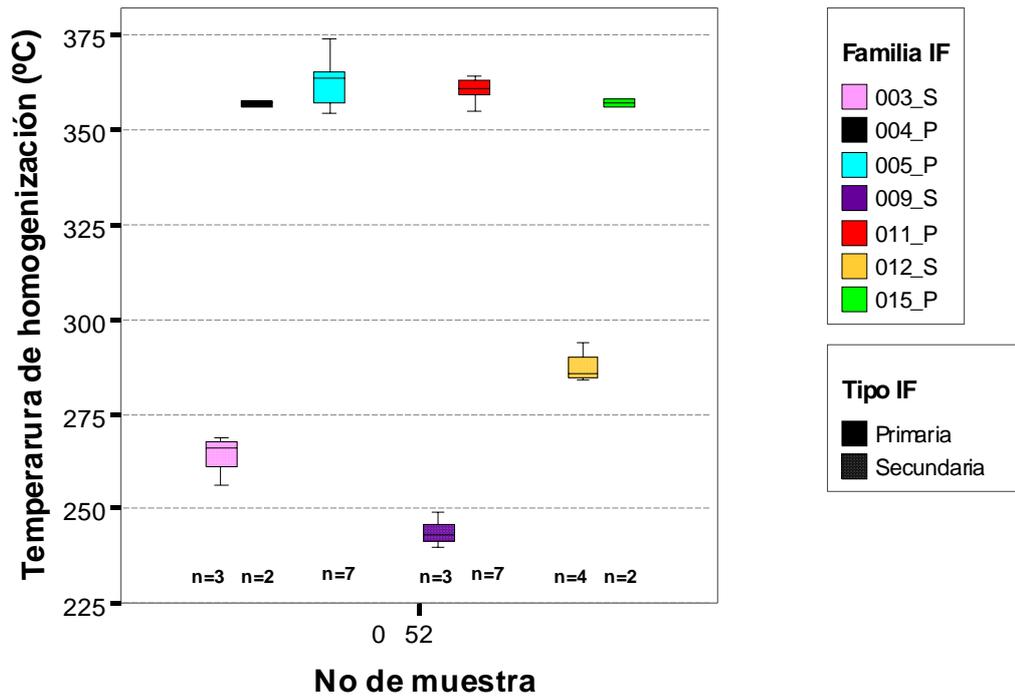


Figura 4.12 Temperaturas de homogenización de las inclusiones fluidas en la zona de alteración propilítica. Los colores representan las familia de inclusiones fluidas Tipo I fiables encontradas en la vetilla tipo A4 cuarzo-clorita-carbonato-pirita (Muestra 052). 003_S: No. FIF, IF: inclusión fluida, L: IF líquida.

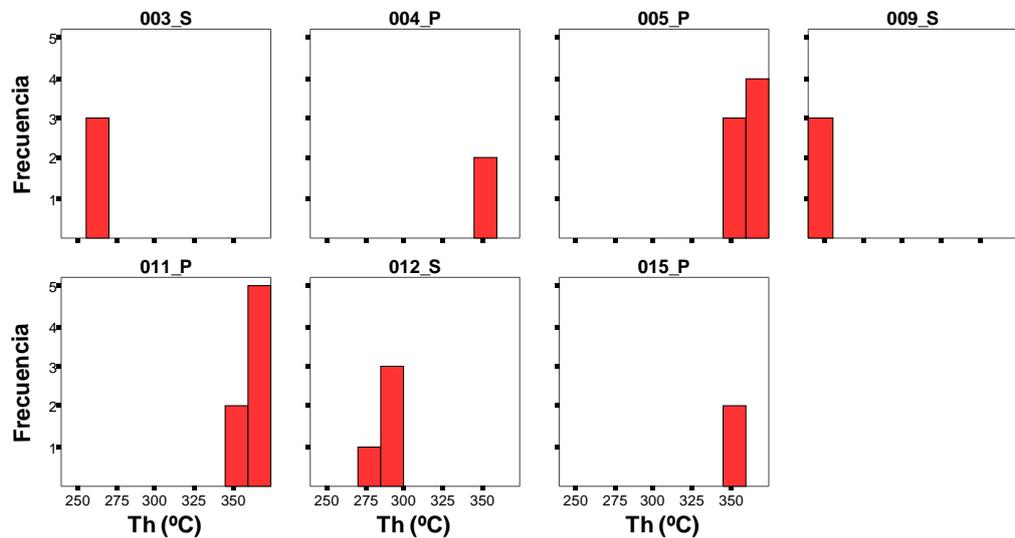


Figura 4.13 Histogramas de frecuencia de temperaturas de homogenización de las inclusiones fluidas en la zona de alteración propilítica. Familia de inclusiones fluidas (FIF) Tipo I en la vetilla tipo A4: cuarzo-clorita-carbonato-pirita (Muestra 052). 003_S: No. de FIF P: inclusión fluida primaria, S: inclusión fluida secundaria

4.4. Caracterización de las inclusiones fluidas, temperaturas de homogenización, presión y profundidad de captura en el evento hidrotermal B: Alteración cuarzo-sericita.

Este evento hidrotermal está relacionado a la intrusión de la cuarzo monzonita. Se encuentra superponiendo su halo de alteración cuarzo-sericita sobre la alteración potásica del primer evento debido a la incorporación de fluidos meteóricos en el sistema.

En esta zona de alteración se estudiaron las vetillas tipo B1: cuarzo-sericita+/-clorita+limonitas en las muestras 039, 040 y 043 las cuales cortan la cuarzo monzonita y cuarzo diorita. Se realizaron 65 mediciones de microtermometría, de las cuales 54 corresponden a inclusiones primarias y 11 a secundarias (Figura 4.14).

4.4.1. Tipos de inclusiones fluidas.

Las inclusiones fluidas se caracterizan por ser subsaturadas de Tipo I, Tipo II. También se han encontrado inclusiones Tipo I con cristales accidentales de calcopirita y opacos. Las inclusiones tienen formas irregulares, ovoides, tabulares y principalmente regulares. Los tamaños varían entre 2 y 28 μm . La relación del volumen de llenado (líquido/vapor) se encuentra entre 30 % y 90%, donde las inclusiones Tipo II ricas en vapor pueden ocupar hasta el 70 % de la inclusión (Figura 4.14). Sólo se encontró una IF Tipo III con crista de halita en la FIF 001_P de la muestra 040 (n=3). Al igual que en la zona de alteración potásica, no se constataron inclusiones fluidas con CO_2 , aunque se sospecha su presencia.

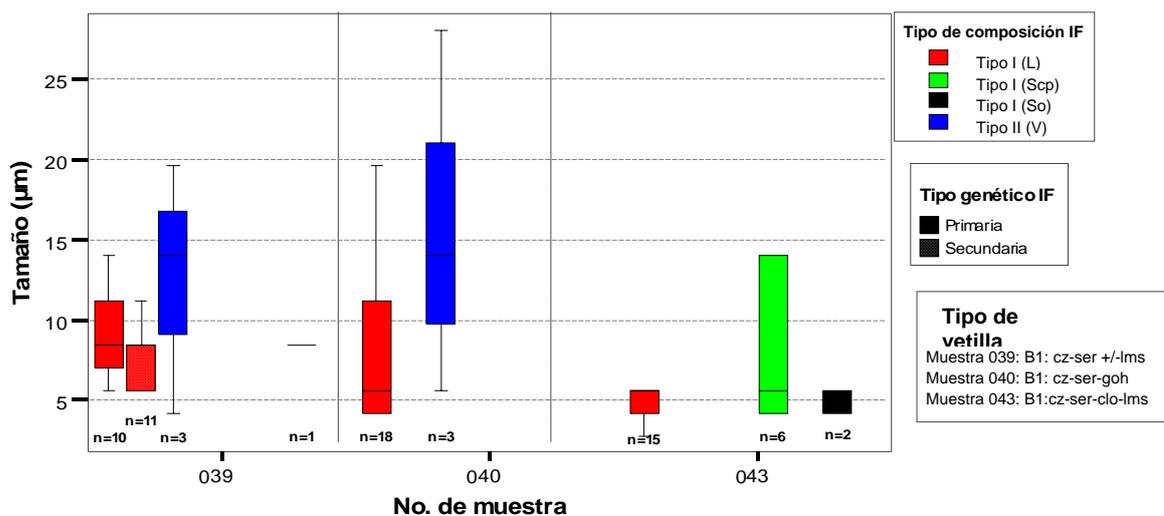


Figura 4.14 Tipos y tamaños de inclusiones fluidas en la zona de alteración cuarzo-sericita.. IF: inclusión fluida, L: IF líquida, V: IF rica en vapor, Scp: IF con cristal accidental de calcopirita, So: IF con cristal accidental opaco. Simbología: cbs: carbonatos, cz: cuarzo, lo: clorita, goh: gohetita, lms: limonitas, ser: sericita.

4.4.2. Composición de fluidos.

La salinidad de las inclusiones primarias Tipo I (n=48) presenta dos rangos bien definidos. El primero (n=6) varía entre 22 y 26% de NaCl equivalente (Figura 4.15) y corresponde a las FIF No. 001_P (se considera la inclusión Tipo III con cristal de halita con 25% de NaCl equivalente) y 003_P de las muestras 039 y 040 respectivamente (Fig 4.16). El segundo rango de salinidad está entre 4 y 10% de NaCl equivalente (n=42).

Sin embargo en la FIF No. 003_P (n=4) hubo dos inclusiones Tipo II con 60% de fase gaseosa que presentaron una salinidad del 20% NaCl equivalente (Figs.4.15 y 4.16).

Las inclusiones secundarias (n=11) tienen un rango de salinidad muy semejante al de las inclusiones primarias y se encuentran entre 5 y 10%.

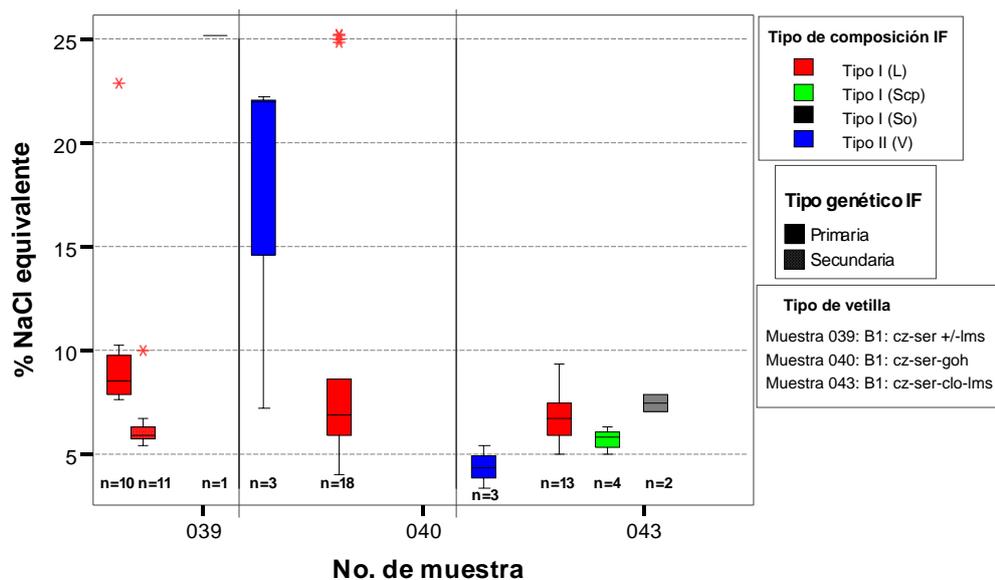


Figura 4.15 Rango de salinidades de los Tipos I y II de inclusiones fluidas en la zona de alteración cuarzo-sericita. IF: inclusión fluida, L: IF líquida, V: IF rica en vapor, Scp: IF con cristal accidental de calcopirita, So: IF con cristal accidental opaco. Simbología: Cz: cuarzo, lo: clorita, goh: gohetita, lms: limonitas, ser: sericita.

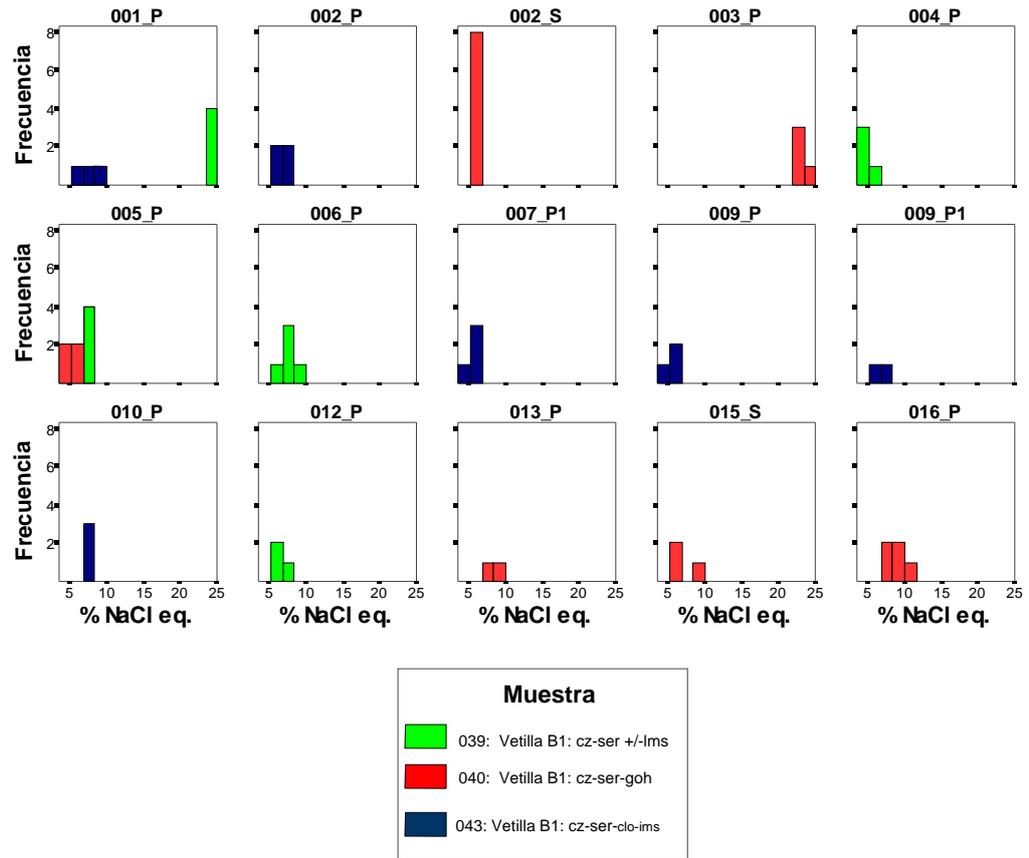


Figura 4.16 Histogramas de frecuencia de salinidades de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración cuarzo-sericita. 001: No. FIF; P, P1: inclusión fluida primaria; S: inclusión fluida secundaria. Simbología: cz: cuarzo, lo: clorita, goh: gohetita, lms: limonitas, ser: sericita.

4.4.3. Temperatura de homogenización.

Se determinó la temperatura de homogenización de 54 inclusiones primarias, donde se muestran tres rangos bien definidos. El primer rango (n=19) tiene una variación entre 300 y 350°C, el segundo (n=31) se encuentra entre 360 y 420°C. Estos intervalos tienen una salinidad de 4 a 10% de NaCl equivalente. El tercer intervalo (n=4) tiene un rango de temperaturas de homogenización entre 440 a 470°C con una variación de salinidades de 22 a 26% NaCl equivalente. No obstante, la temperatura de homogenización media de las 55 inclusiones primarias corresponde a 368°C. con una salinidad de 7% NaCl equivalente (Figura 4.17).

En la Fig 4.18 se muestra la temperatura de homogenización de las inclusiones secundarias (n=11), la cual se encuentra entre 270 y 300°C.

La Figura 4.19 muestra las temperaturas de homogenización por familias de inclusiones fluidas de las muestras 039, 040 y 043.

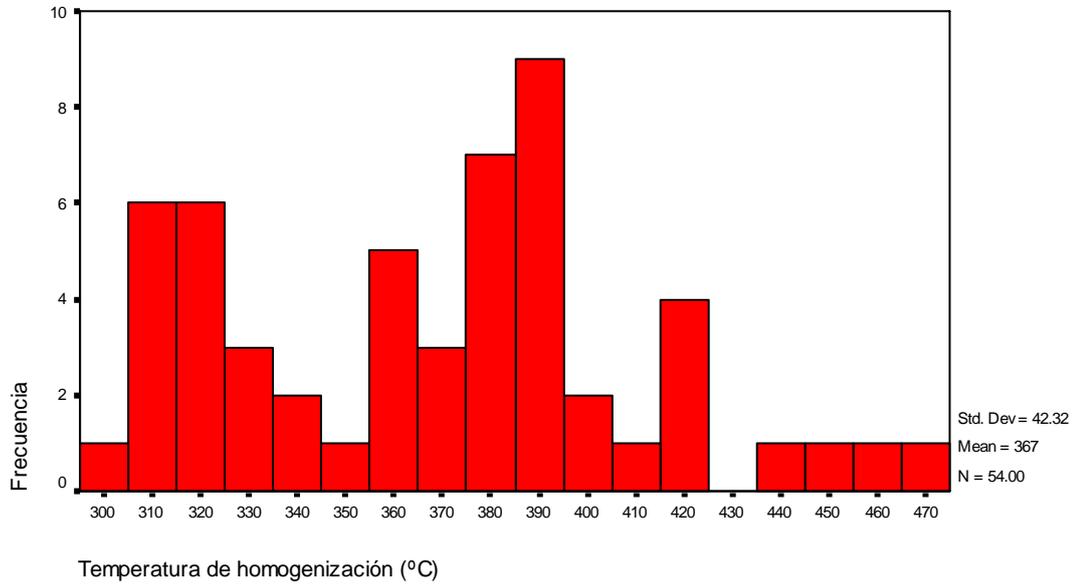


Figura 4.17 Histograma de frecuencias de temperaturas de homogenización de inclusiones primarias de la zona de alteración cuarzo-sericita.

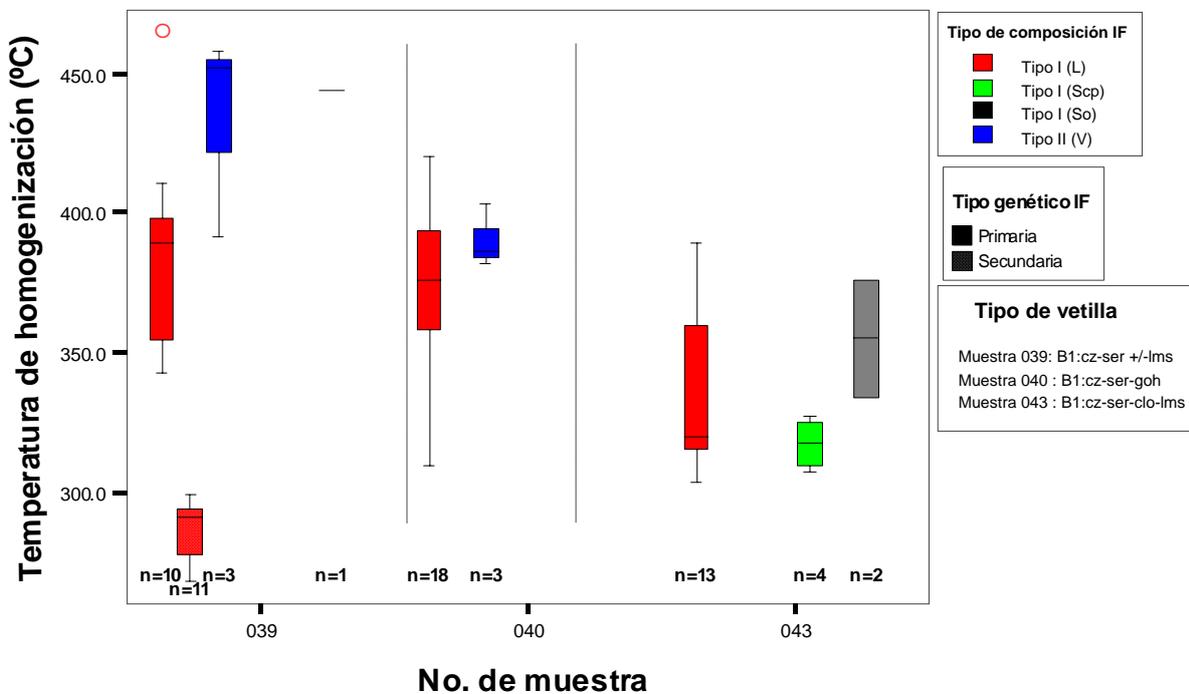


Figura 4.18 Temperaturas de homogenización de los diferentes tipos de inclusiones fluidas en la zona de alteración cuarzo-sericita. IF: inclusión fluida, L: IF líquida, V: IF rica en vapor, Scp: IF con cristal accidental de calcopirita, So: IF con cristal accidental opaco. Cz: cuarzo, clo: clorita, goh: gohetita, lms: limonitas, ser: sericita.

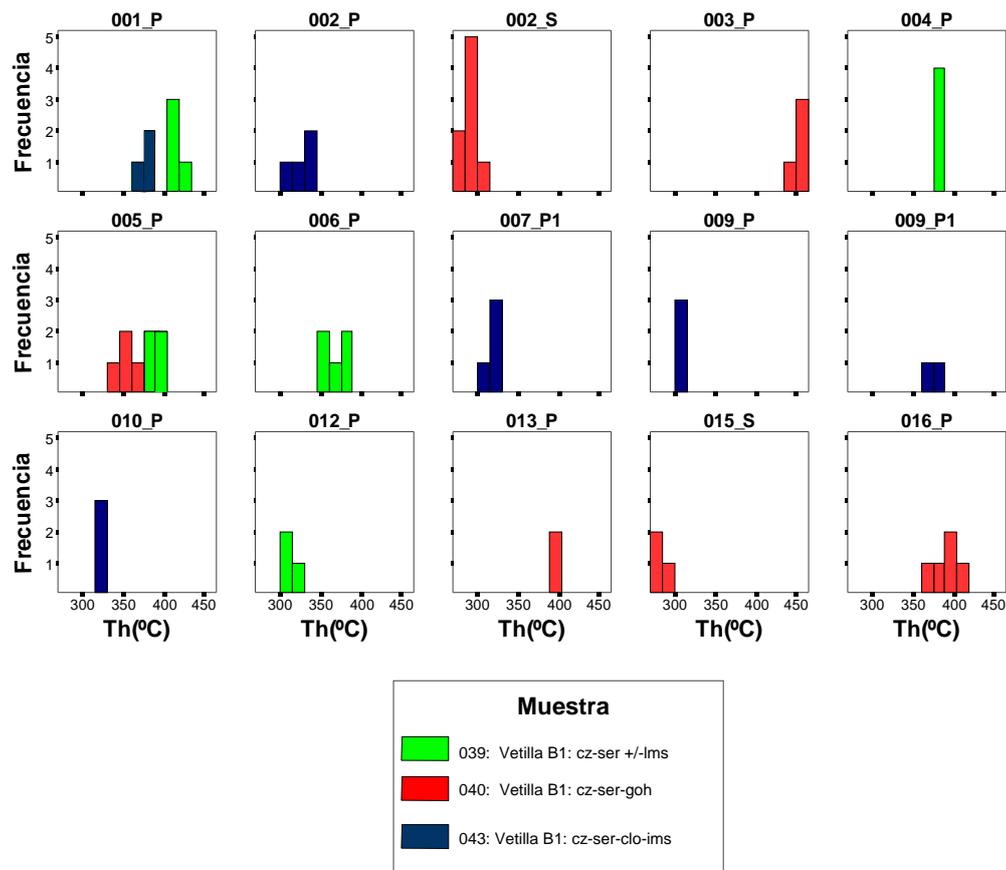


Figura 4.19 Histogramas de frecuencia de temperaturas de homogenización de las familias de inclusiones fluidas (FIF) encontradas en la zona de alteración cuarzo-sericita. 001_P: No. FIF; P, P1: inclusión fluida primaria; S: inclusión fluida secundaria.

4.4.4. Estimación de la temperatura, presión y profundidad de captura.

En la muestra 040 se puede notar la coexistencia de inclusiones fluidas Tipo I y Tipo II que corresponden a las FIF No. 004_P (n=4) y 005_P (n=5) como se aprecia en la Figura 4.20. Estas familias tienen en común un rango de temperatura de homogenización entre 370 y 400°C, lo que sugiere que fueron atrapadas a partir de un fluido en ebullición. Las inclusiones Tipo I tienen un rango de salinidad entre 4 y 8% de NaCl equivalente y un volumen de llenado de líquido de 60 a 70%. De esta manera, tenemos que la temperatura de homogenización (Th) de estas inclusiones sería igual a la temperatura de captura (Tc), y por ende no sería necesario hacer una corrección por presión.

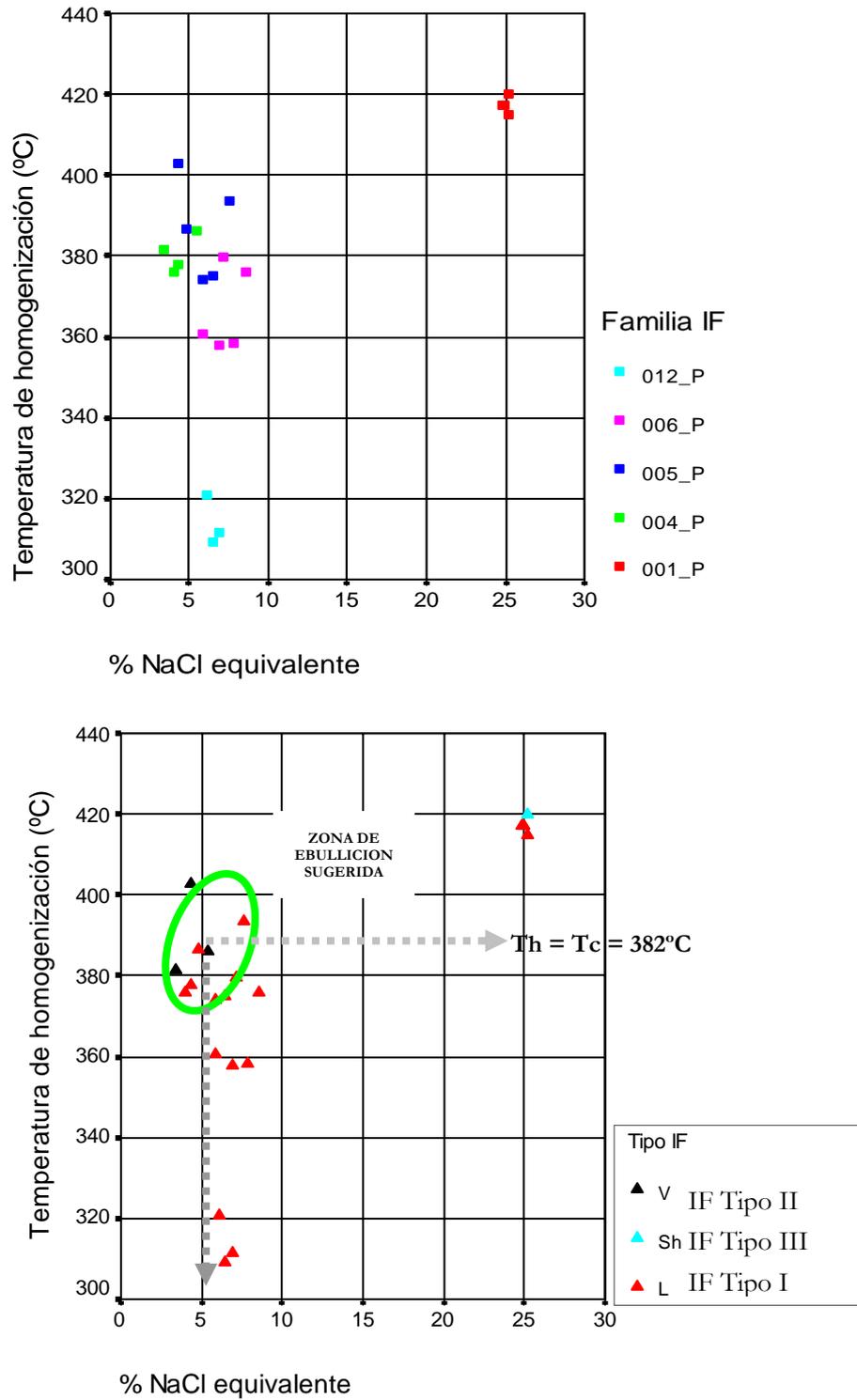


Figura 4.20 Gráficos de salinidad versus temperatura de homogenización en la zona de alteración cuarzo sericita. Las familias de de inclusiones fluidas primarias corresponden a cristales de cuarzo hidrotermal de la misma generación en vetilla tipo B1 de la muestra 040. A. Salinidad versus temperatura de homogenización expresado por familias de inclusiones fluidas (FIF). B. Salinidad versus temperatura de homogenización expresado por tipos de inclusiones fluidas.

Esto sugiere que para las muestras de la zona de alteración cuarzo-sericita la temperatura de captura del fluido hidrotermal fue del orden de 382°C con una salinidad de 5% de NaCl equivalente y una densidad de líquido de 1.034 g.cc⁻¹ (Figura 4.20).

Al igual que en el evento hidrotermal A, podemos asumir que en un sistema salino H₂O-NaCl, ocurrió una ebullición de una solución de 5% de NaCl a 382°C. De esta manera, a partir de las isotermas de ebullición (Figura 1.9, Shepperd et al, 1985), o con el programa BULK (Ronald J. Bakker, 2003 in Samson, 2003) obtenemos una presión de captura de 226 bares.

Bajo estas condiciones, no podemos garantizar un régimen único hidrostático, ya que en el evento B no hemos evidenciado grandes fracturas abiertas en comunicación inmediata con los fluidos de superficie. El estilo estructural del evento B supone una fracturación episódica y a pequeña escala, favorecida por la sobrepresión de fluidos y condicionada por eventos tectónicos locales. Es así que en cada episodio podría disminuir la presión sin llegar a una descarga total (régimen hidrostático) necesariamente. Por consiguiente, podríamos encontrarnos en una transición: dúctil-frágil

En consecuencia, a una presión de captura de 226 bares en un régimen transicional le correspondería una profundidad máxima de 2 304 m ($H_H=226/0.0981\text{kp.cm}^{-2}$) en condiciones hidrostáticas. No obstante, esta profundidad probablemente pudo haber sido inferior y podría aproximarse a 850 m ($H_L=226/(2.7\times 0.0981\text{ kp.cm}^{-2})$) en condiciones litostáticas. Por lo tanto, podríamos considerar que la profundidad de captura se encontraba en el rango 2300 – 850 m.

Resumen.

La microtermometría de inclusiones fluidas de la vetilla tipo A3: cuarzo-ortoclasa nos indica que el evento hidrotermal A presenta temperaturas de homogenización mayores que 450 °C y salinidades con un valor máximo de 50% de NaCl. Bajo estas condiciones se desarrolló la alteración potásica, con presiones litostáticas de captura de 430 bares, las cuales representan que el sistema inicialmente tenía una sobrecarga de alrededor de 1 600 m. Posteriormente, el sistema sufre una caída de la temperatura (hasta 250°C) y de la salinidad (hasta 5% NaCl eq.) donde se desarrolló la alteración propilítica, como lo demuestran las inclusiones secundarias en la vetilla tipo A3 relacionadas con las inclusiones primarias y secundarias en la vetilla tipo A4: cuarzo-clorita-carbonatos-pirita (Figura 4.21).

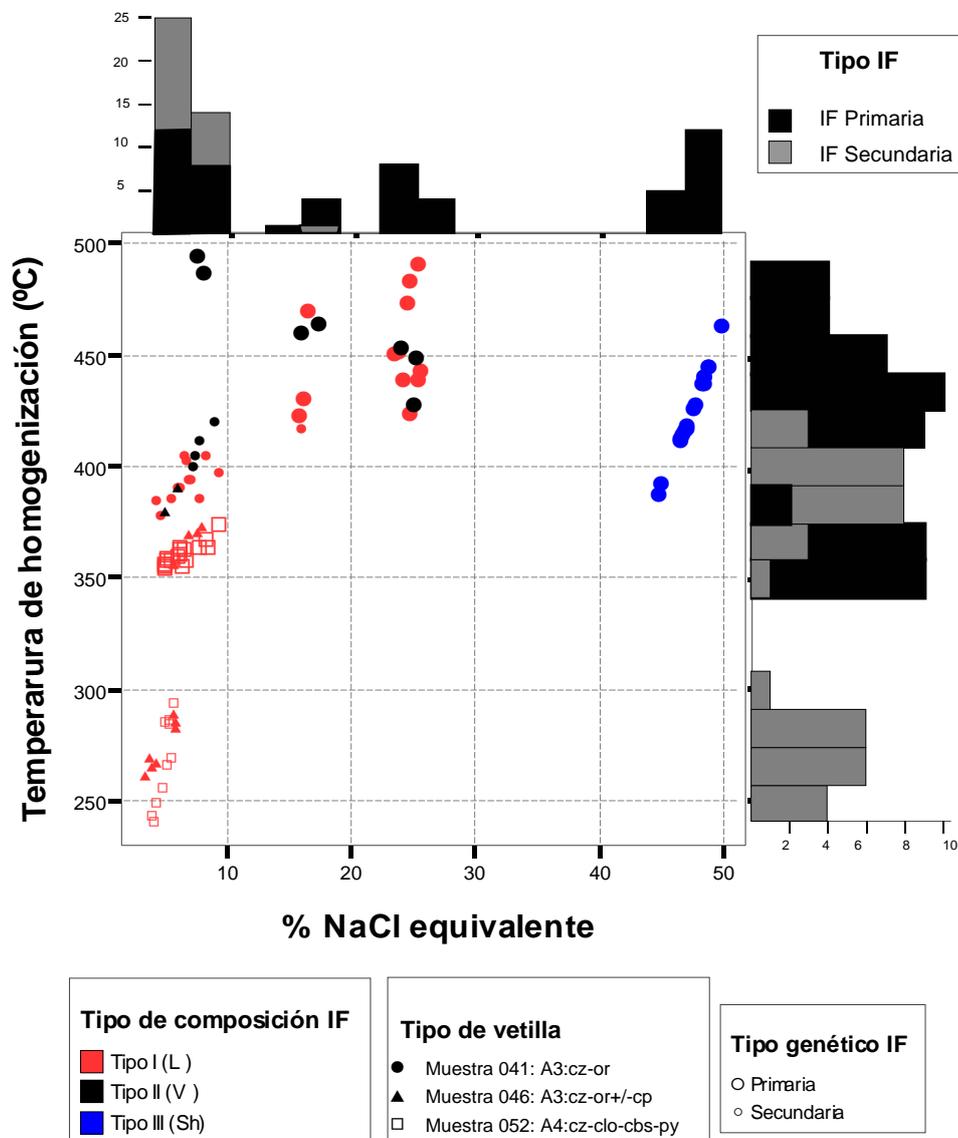


Figura 4.21 Gráfico de salinidad versus temperatura de homogenización que muestra la evolución de los fluidos hidrotermales durante el evento hidrotermal A. IF: inclusión fluida, L: IF líquida, V: IF rica en vapor, Sh: IF hipersalina con cristal de halita. Simbología: cz: cuarzo, clo: clorita, or: ortoclasa; py: pirita.

Durante la evolución del sistema porfirítico, las vetillas tipo B1: cuarzo-sericita±cloritas±limonitas nos indican que las temperaturas de homogenización descendieron desde 470 °C hasta 270 °C, así como las salinidades, desde 26% a 5% de NaCl equivalente (Figura 4.22). Sin embargo, fluidos con una temperatura de captura a 382°C y salinidad de 5 % de NaCl eq. en una zona que sugiere ebullición nos indican una presión de captura fue de 226 bares. Bajo este régimen dúctil-frágil, la profundidad máxima se encontraría a 2 300 m bajo condiciones hidrostáticas, pero probablemente es inferior y podría aproximarse a 850 m en condiciones litostáticas (Cuadro 4.2). En esta etapa se formaron las vetillas Tipo B1 y B2.

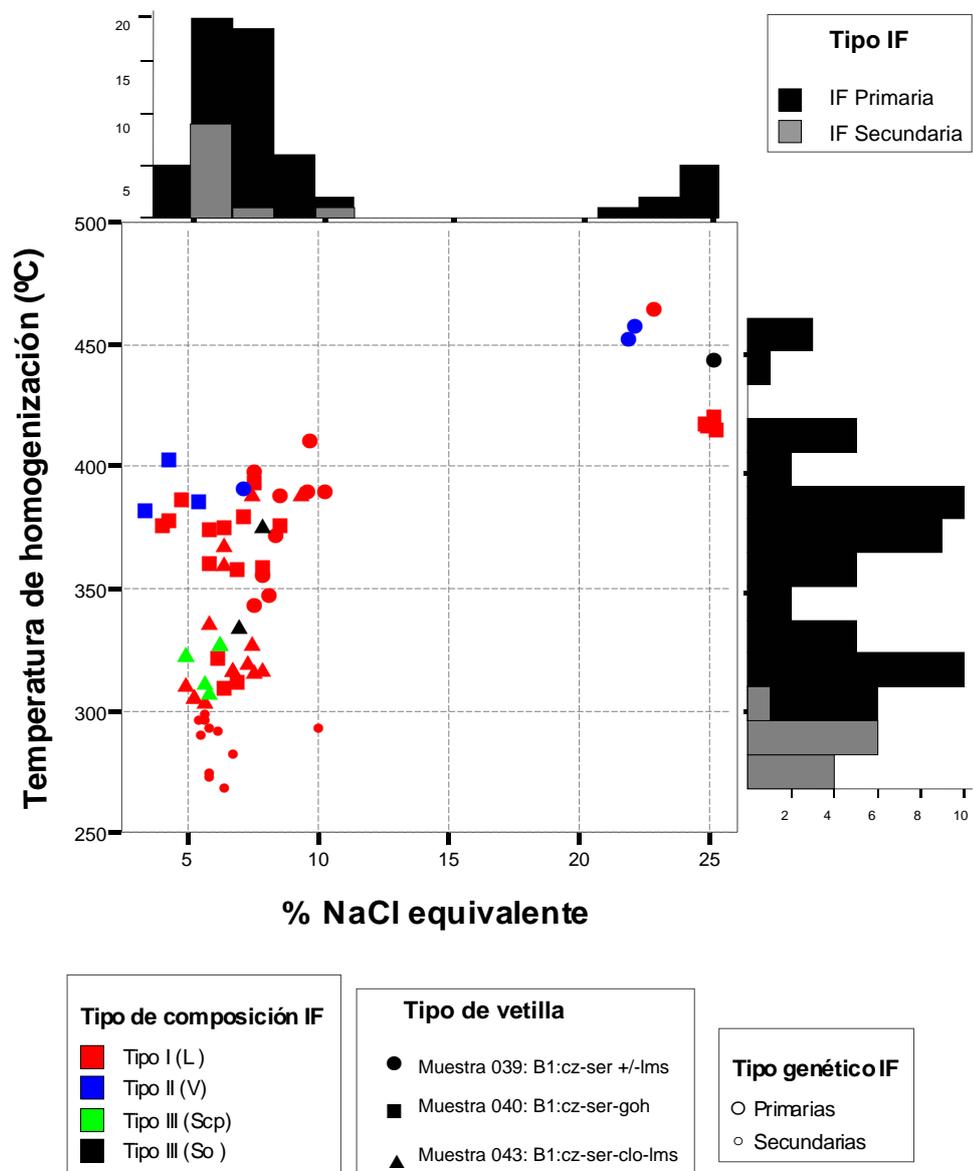


Figura 4.22 Gráfico de salinidad versus temperatura de homogenización que muestra la evolución de los fluidos hidrotermales durante el evento hidrotermal B. IF: inclusión fluida, L: IF líquida, V: IF rica en vapor, Sh: IF hipersalina con cristal de halita. Cz: cuarzo, clo: clorita, goh: gohetita, lms: limonitas, ser: sericita.

EVENTO HIDROTHERMAL	N	Tipo IF	Tipo de composición IF	Th (°C)	%NaCl eq.	Tc (°C)	Pc (bar) estimada	Profundidad estimada	
								H _L (m)	H _H (m)
A1 Potásica	12	P	I	420-490	16-26	450	430	1 623	-
	7		II	430-500	7-25				
	17		III	390-460	45-50				
	17	S	I	360-420	3-16				
	7		I	260-280	2-5				
	6		II	380-420	4-9				
A2 Propilítica	18	P	I	355-375	5-10	-	-	-	-
	10	S	I	240-290	4-6				
B Cuarzo-Sericita	2	P	I	420-470	23-26	382	226	853	2 304
	26		I	360-420	3-11				
	19		I	300-350	4-8				
	2		II	450-460	22				
	4		II	380-405	2-7				
	1		III	420	25				
	11	S	I	270-300	5-10				

Cuadro 4.2 Cuadro resumen que muestra la microtermometría y las condiciones de captura de las inclusiones fluidas en los eventos hidrotermales A y B del Pórfido de cobre Lara. N: número de inclusiones, IF: inclusión fluida, P: primaria, S: secundaria, Th: temperatura de homogenización Tc: temperatura de captura, Pc: presión de captura, H_L: profundidad bajo condiciones litostáticas, H_H: profundidad bajo condiciones hidrostáticas.

CAPÍTULO V

INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

5.1. Evolución de los fluidos hidrotermales y mineralización.

Después del emplazamiento de la Superunidad Tiabaya hace 78-80 Ma (Mukasa, 1985), representada por la cuarzo diorita del Batolito de la Costa, se emplazaron los intrusivos cuarzo monzoníticos, graníticos y pórfidos dacíticos. Estos emplazamientos fueron importantes para el desarrollo de los eventos hidrotermales y mineralización en el Pórfido de cobre Lara. Posteriormente, el yacimiento es atravesado por una serie de diques andesíticos y dacíticos postmineralización.

Durante el emplazamiento de la cuarzo monzonita, controlado por un sistema de fallas transcurrentes N-S, se formaron las vetillas tipo A1: biotita-magnetita-calcopirita y A2: cuarzo-pirita-calcopirita con halo de biotita a temperaturas mayores que 460°C. El progreso del fallamiento N-S produjo un cambio en la circulación de fluidos hidrotermales, ocasionando un desequilibrio de presiones que los hizo entrar en ebullición. La ebullición se produjo entre 440 y 460 °C y dio origen a los primeros fluidos hipersalinos (50% de NaCl) y salinos (25% NaCl eq). La composición de los fluidos estaba formado por un sistema salino H₂O-NaCl-KCl. Durante este episodio se formaron las vetillas tipo A3: cuarzo-ortoclasa, que cortaron las vetillas A1 y A2 y rellenaron fracturas del intrusivo precursor cuarzo diorita. Estas manifestaciones corresponden a la alteración potásica del evento hidrotermal A y se dieron en un medio dúctil bajo un régimen litostático. Las presiones fueron de 430 bares y el sistema se encontraba a una profundidad estimada de 1600 m.

La dilución por efectos de aguas meteóricas ocasionó el enfriamiento del sistema, donde las temperaturas descendieron desde 425 hasta 250°C. La salinidad de los fluidos fue neutralizada, disminuyendo hasta 5% NaCl eq. debido a la interacción de los fluidos hidrotermales con el intrusivo precursor. Durante esta etapa se desarrolló la alteración propilítica, donde se forman vetillas tipo A4: cuarzo-clorita-carbonatos-pirita que rellenaron las fracturas del intrusivo precursor y las plagioclasas se alteran a albita. Este episodio estuvo controlado por un sistema de fallas NE-SO.

Las fallas sinistral N-S se reactivaron en la Quebrada Aijaracancha y apareció el sistema E-O. La intrusión de un pórfido dacítico en profundidad, observado localmente en la muestra 042 (Cuadro 3.1) y en la Mina Socos, al Este del yacimiento, incorpora más energía al sistema. El progreso del fallamiento sinistral N-S formó un corredor estructural en la Quebrada Aijaracancha. Este fallamiento es muy importante, ya que generó fracturas SE donde circularon las soluciones hidrotermales. A continuación se desarrolla el evento B, con fluidos hidrotermales de altas temperaturas: 420 a 470 °C y salinidades de 20 a 26% NaCl eq. Parece evidente que en este evento coexistieron dos tipos de soluciones hidrotermales: una solución neutral de herencia del evento A (250°C @ 5% NaCl eq) y otra más salina debido a la intrusión dacítica. Sin embargo, después del evento térmico continua la dilución por la incorporación de aguas meteóricas en el sistema y nuevos desequilibrios de presiones provocan una segunda ebullición a 380°C y a una salinidad de 5% NaCl eq. Este fenómeno es sugerido debido a la coexistencia de inclusiones primarias Tipo I y II en un cristal de cuarzo hidrotermal (muestra 040) con un rango de temperaturas de homogenización en común. Durante esta etapa se formaron las vetillas con sutura tipo B1: cuarzo-sericita-calcopirita-pirita y tipo B2: cuarzo-pirita con halo de sericita. Bajo estas condiciones, las presiones alcanzaron 226 bares, en un ambiente transicional: dúctil-frágil, donde la profundidad máxima pudo situarse a 2 300 m en condiciones hidrostáticas. Sin embargo, es más probable que esta profundidad haya sido menor y se haya aproximado a 850 m en condiciones litostáticas. Lo que varía al parecer no es la densidad del medio sino la creación de espacios abiertos debido a la fracturación de la cuarzo diorita y cuarzo monzonita, la cual formó estructuras stockwork donde se depositó la calcopirita y pirita junto con cuarzo y sericita. Esta fracturación permitió una expansión del fluido y por lo tanto una pérdida parcial de la presión litostática, que la aproximó a la que habría en condiciones hidrostáticas. Esto supone que las presiones reales hayan sido más próximas a los 850 que a los 2300 m. Posteriormente, debido al enfriamiento del sistema y a la migración de los fluidos hidrotermales, las temperaturas descendieron entre 300 y 270°C con salinidades de 10% NaCl eq.

La datación de 77.48 Ma en sericita por el método Ar^{40}/Ar^{39} (Rivera F, 2006) en el Pórfido de cobre Puquio, sugiere una edad similar del evento hidrotermal B del Pórfido de cobre Lara, debido a que ambos yacimientos se encuentran en la franja metalogénica de pórfidos de Cu-Mo del Cretácico superior.

De esta manera, la microtermometría nos indica que la temperatura disminuyó desde 500 a 250°C a partir de un evento magmático hidrotermal potásico (< 80 Ma) a una alteración cuarzo-sericita (~77.5 Ma). Estos dos episodios evolucionaron de un medio dúctil a presión litostática hacia un medio transicional: dúctil – frágil por pérdida de presión que lo aproxima un poco a

condiciones hidrostáticas. Situaciones similares, donde se han desarrollado comportamientos dúctiles a frágiles han sido sugeridos para otros pórfidos (Gustafson & Hunt, 1975; Burnham, 1979 in Hedenquist et al, 1998). El cambio en el estilo de mineralización también se ve acompañado por el cambio de líquidos hipersalinos que coexisten con vapor a un sistema hidrotermal de salinidad mas bajo (<10 % NaCl eq).

Después de los eventos hidrotermales A y B, alrededor de los 77.5 Ma, ocurre el colapso del sistema hidrotermal. Una ilustración gráfica de la evolución de los fluidos en los eventos hidrotermales A y B en el Distrito Lara se muestra en la Figura 5.1. Se puede notar la caída de temperaturas y salinidades por efecto de dilución de los fluidos debido a la mezcla de fluidos magmáticos con aguas meteóricas.

A continuación, un evento de alteración supérgena condicionado por fluidos meteóricos da origen a la argilización (montmorilonita-hayloisita±illita±caolinita) y al enriquecimiento secundario de calcosita en el yacimiento.

Seguidamente, un último evento magmático granítico dio origen a los eventos hidrotermales C y D con alteración potásica y cuarzo sericita respectivamente. Estos eventos no aportaron mineralización al yacimiento y son considerados como estériles. Sólo se observan trazas de calcopirita y pirita en vetillas C1 de cuarzo, las cuales son cortadas por vetillas D1 de cuarzo-sericita con sutura sin relleno, debido a una circulación de soluciones hidrotermales pobres en metales.

Después del emplazamiento de diques andesíticos y dacíticos que cortaron los granitoides anteriores sucedió un evento piroclástico de tobas e ignimbritas que cubrió el yacimiento entre los 23.2 y 18.7 Ma,

Al final el Pórfido de cobre Lara fue erosionado. Este hecho es evidenciado por los fallamientos sinistralos locales N-S con componente normal que actuaron en el Mioceno, después del evento volcánico del Grupo Nazca. Este fallamiento indica que el bloque Oeste del yacimiento se levantó y posteriormente fue erosionado. Prueba de este hecho se aprecia en el campo, donde sólo los bloques Este y Sur conservan las unidades volcánicas miocénicas del Grupo Nazca en una topografía más baja (1 500 - 1 700 msnm), mientras que el centro del yacimiento la altura es mayor que 1 800 msnm (Figura 2.6)

Una comparación del tonelaje e inclusiones fluidas del Pórfido de cobre Lara con otros pórfidos de cobre en los Andes chilenos podemos apreciar en el Cuadro 5.1. Aquí se distingue que los

yacimientos más jóvenes son los que tienen mayor tonelaje. También podemos notar que estos yacimientos presentan inclusiones hipersalinas Tipo III (35 - 67% NaCl eq.) en la etapa de alteración potásica o tardimagmática, salvo el caso de El Salvador. De manera general, podemos apreciar que en la alteración transicional los yacimientos presentan inclusiones con salinidades más bajas, no obstante también se han encontrado inclusiones salinas hasta de 45% NaCl eq. en los pórfidos de cobre chilenos. Aun no existen estudios de inclusiones fluidas caracterizadas por tipos de vetillas en la franja metalogenética de pórfidos de Cu-Mo del Paleoceno-Eoceno del sur del Perú para establecer una comparación con los yacimientos anteriores.

Si hacemos una comparación de las salinidades de las inclusiones fluidas Tipo I del evento hidrotermal de mineralización económica entre la edad de mineralización y el tonelaje de los pórfidos de cobre chilenos con Lara (Figura 5.2), podemos notar que sólo los yacimientos del Paleoceno-Eoceno (El Salvador y La Escondida) tienen una mayor salinidad (40 - 19% NaCl eq.) que el Pórfido de cobre Lara del cretácico superior (11% NaCl eq.). Sin embargo, no se ha podido distinguir lo mismo con Los Pelambres de edad miocénica, el cual tiene la misma salinidad que Lara.

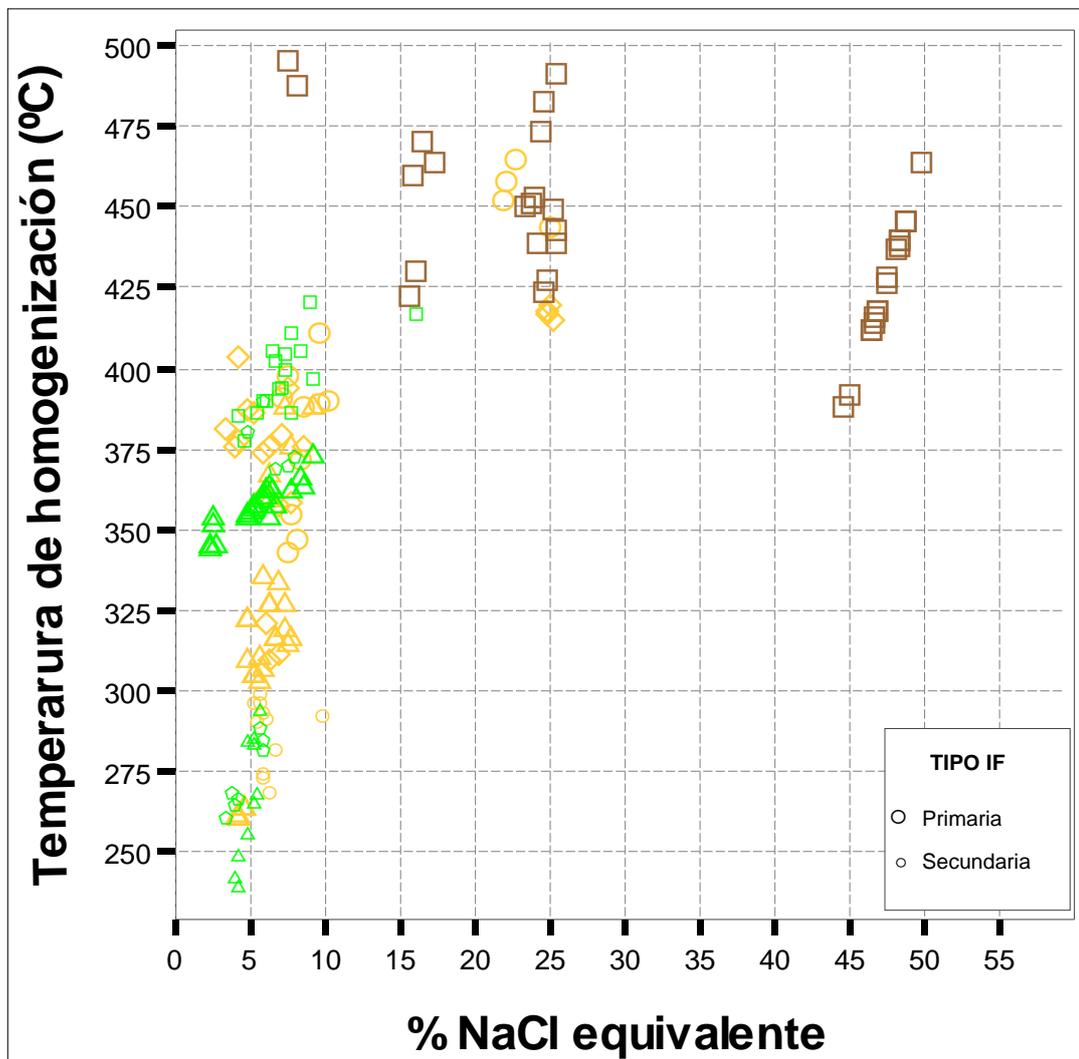
Observaciones de campo en el pórfido de cobre indican que Lara es un sistema que ha sido erosionado. La alteración potásica esta expuesta parcialmente y su zona de enriquecimiento (20 m) no ha sido bien desarrollada. Lo mismo sucede con el pórfido de cobre Puquio más al NO, donde su potencial económico muestra un sistema altamente erosionado con una zona de enriquecimiento (80 m) poco desarrollada (Rivera, 2006). Estos yacimientos del Cretácico superior se caracterizan por ser de pequeño tonelaje (aprox. 20 Mt en el caso de Lara) debido a que han sido profundamente erosionados, exhumando en consecuencia su alteración potásica. La mineralización en las zonas de enriquecimiento secundario no están bien desarrolladas y la mayor parte de la mineralización se encontraría principalmente en la zona primaria de baja ley.

No obstante, los pórfidos de cobre del Paleocenos-Eoceno del sur del Perú (Cuajone, Quellaveco y Toquepala) y Chile (El Salvador y La Escondida) muestran mayores tonelajes que los del Cretácico superior. Esto se debe principalmente al poco grado de erosión que han sido sujetos y a sucesivos eventos de enriquecimiento secundario, donde los máximos espesores alcanzaron hasta 400 m (Cuadro 5.2).

5.2. Resumen de eventos geológicos.

A partir de las observaciones de campo y del estudio de las inclusiones fluidas podemos hacer una relación de los principales eventos geológicos interpretados en el Distrito Lara:

- Intrusión de la Superunidad Tiabaya a 80 Ma
- Intrusión cuarzomonzonítica.
- Evento hidrotermal A: potásico y propilítico.
- Formación de vetillas Tipo A1, A2, A3 y A4 con mineralización de magnetita-calcopirita pirita.
- Intrusión del pórfido dacítico.
- Evento hidrotermal B: cuarzo-sericita a 77.48 Ma.
- Formación de vetillas Tipo B1 y B2 con mineralización de pirita y calcopirita.
- Colapso del sistema hidrotermal
- Evento supérgeno: Alteración argílica.
- Formación de zona de lixiviación y enriquecimiento secundario con mineralización de calcosita.
- Intrusión granítica.
- Evento hidrotermal C: potásico con vetillas C1: cuarzo con trazas de magnetita-calcopirita-pirita
- Evento hidrotermal D: vetillas D1 de cuarzo-sericita con vetillas.
- Emplazamiento de diques de andesita y dacita post mineralización.
- Evento piroclástico de tobas e ignimbritas entre 23.2 y 18.7 Ma.
- Levantamiento del bloque Oeste del yacimiento.
- Erosión del yacimiento que dejó la superficie actual del pórfido de cobre Lara a 1700 msnm y formó las quebradas Ayjaracancha, Socos y Jayacyana.



Tipos de vetilla

- Muestra 039: B1: cz-ser+/-lms
- △ Muestra 043: B1: cz-ser-clo-lms
- ◊ Muestra 046: A3: cz-or
- △ Muestra 052: A4: cz-clo-cbs-py
- ◇ Muestra 040: B1: cz-ser-goh
- Muestra 041: A3: cz-or

Evento hidrotermal

- Evento B: Alteración cuarzo-sericita
- Evento A2: Alteración propilítica
- Evento A1: Alteración potásica

Figura 5.1 Evolución de los fluidos en los eventos hidrotermales A y B en el Pórfido de cobre Lara. Simbología: cz: cuarzo, clo: clorita, goh: gohetita, lms: limonitas, or: ortoclasa, py: piritita, ser: sericita.

YACIMIENTO	EDAD Ma	RECURSOS Mt	ETAPA DE ALTERACIÓN TARDIMAGMÁTICA						ETAPA DE ALTERACIÓN TRANSICIONAL						REFERENCIAS
			VETILLA	ASOC MINERAL	ASOC SULFUROS	TIPO IF	TH (°C)	%NaCl eq	VETILLA	ASOC MINERAL	ASOC SULFUROS	TIPO IF	TH (°C)	%NaCl eq	
Lara	80~77.5	20	Tipo A3	Cz-or--mgt- cpy-py	Cpy-py	I	420-490	16-26	Tipo B1	Cz-ser-py- cpy	Py-cpy	I	300-470	3-11	Este estudio.
						II	430-500	7-25				II	380-405	2-7	
						III	390-460	45-50				III	420	25	
El Salvador	41.3	974	Tipo A	Cz-fpk-anh- sulfuros±bt	Cpy-bn-mo	I	360 a >600	35-40	Tipo B	Cz-znh- sulfuros-fpk	Mo-cpy- bn	I	360 a >600	35-40	Watanabe & Hedenquist, 2001; Gustafson & Quiroga, 1995
						II	-	Baja				II	-	baja	
						III	-	-				III	-	baja	
La Escondida	33.7	2 262	Tipo A3	cz-or	mgt-bn-cpy	II	320-560	<7	Tipo B2	Cz-ser	cpy-py- mo	I	270-380	3-19	Padilla , 2003
						III	500-560	60-67				II	-	-	
Los Pelambres	9.85	4 193	Tipo 4	Cz-fpk-anh- sulfuros	Cpy-bnnh- sulfurospy	I	365-595	2-3	czo-mo	Cz-mo-fpk- ser	Mo-cpy- py	I	388-454	~11	Alkinson, et al 1996; Skewes & Akinson, 1985
						III	260-352	36-46				III	430-439	46	

Cuadro 5.1 Comparación de tipos de inclusiones fluidas del Pórfido de cobre Lara con otros yacimientos porfiríticos de los Andes chilenos. Simbología: anh: anhidrita, cz: cuarzo, bn: bornita, cpy: calcopirita, clo: clorita, fpk: feldespato potásico, goh: gohetita, lms: limonitas, mgt: magnetita, mo: molibdenita, or: ortosa, ser: sericita.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La alteración potásica esta caracterizada por presentar tres tipos de inclusiones fluidas primarias: ricas en líquido (Tipo I), ricas en vapor (Tipo II) e hipersalinas con cristal de halita (Tipo III), siendo las más abundantes las Tipo III y II. Esta alteración presenta los rangos más altos de temperaturas de homogenización (390 -500 °C) y salinidades (25 -50 % NaCl).

Las inclusiones primarias Tipo I son características en la alteración propilítica y presentan bajas temperaturas de homogenización: 240 -380°C. Sus salinidades también son bajas y varían entre: 5 -10 % NaCl eq. Este episodio se ve reflejado en las inclusiones secundarias que afectan la alteración potásica.

La alteración cuarzo-sericita presenta inclusiones primarias Tipo I y II con temperaturas de homogenización entre 300 y 470 °C y salinidades que varían entre 4 -26 % NaCl eq. Las inclusiones Tipo II son las más comunes.

Se encontraron dos zonas que sugieren ebullición. La primera con una temperatura de captura de 450°C y una salinidad de 24% NaCl bajo un régimen dúctil en condiciones litostáticas, donde se formaron las vetillas tipo A3: cuarzo-ortoclasa a presiones de captura de 430 bares a una profundidad estimada de 1 600 m. La segunda zona de ebullición ocurrió en un régimen transicional: dúctil-frágil con una temperatura de captura de 380°C y una salinidad de 5% NaCl eq. Esta temperatura representa la formación de pirita y calcopirita en vetillas Tipo B1: cuarzo-sericita-calcopirita-pirita y tipo B2: cuarzo-pirita con halo de sericita, donde la zona se encontraba bajo presiones de captura de 226 bares entre un rango de profundidades de 2 300 - 850 m.

La mineralización económica del Pórfido de cobre Lara se encuentra en los eventos hidrotermales A y B y la evolución de los fluidos hidrotermales sucedió entre 80 y 77.5 Ma. Estos eventos están relacionados principalmente a la intrusión de la cuarzo monzonita y posteriormente al pórfido dacítico, responsable de dar más energía al sistema. Los fluidos magmáticos evolucionaron desde altas temperaturas y salinidades (500 y 50% NaCl) hasta su dilución con aguas meteóricas, llegando a 270°C y 5% NaCl eq.

Existe una zona de enriquecimiento secundario de calcocita con 14 a 28 m de espesor entre 60 y 80 m de profundidad. Esta zona tiene una reserva de 20 millones de toneladas con leyes de cobre mayores que 0.5% .

A partir de muestras de superficie se pueden hacer estudios de inclusiones fluidas para caracterizar zonas de alteración hidrotermal, estudiar la evolución de los fluidos hidrotermales y estimar paleosuperficies. No obstante, es necesario realizar más estudios de inclusiones fluidas en vetillas Tipo A3, B1 y B2 de los taladros más profundos del yacimiento para comparar sus resultados con aquellos de muestras de superficie.

En la franja metalogénica de los pórfidos Cu-Mo del Cretácico superior, el estudio de inclusiones fluidas ha demostrado que el evento hidrotermal de mineralización económica en Lara tiene una menor salinidad (11% NaCl eq.) que la de los pórfidos de El Salvador y La Escondida del Paleoceno-Eoceno en Chile (19 - 40% NaCl eq.), los cuales tienen un mayor tonelaje.

Desde el punto de vista metalogénico regional, podemos afirmar que los pórfidos de cobre del Cretácico superior tienen menor tonelaje que aquellos del Paleoceno-Eoceno en el sur del Perú (Cuajone, Quellaveco y Toquepala) y Chile (El Salvador y la Escondida). Esto se debe a que los depósitos más antiguos presentan profundos niveles de erosión, exhumación de la alteración potásica y poco desarrollo de la zona de enriquecimiento secundario. En consecuencia, la mayor parte de la mineralización se encuentra en la zona primaria de baja ley.

No obstante, el presente estudio pone de manifiesto que incluso en un estudio somero de IF y con pocas muestras se puede obtener información útil para orientar los trabajos de exploración. Esta información puede obtenerse con una notable economía de medios, si se compara por ejemplo con los costes de una campaña de sondeos. Aunque los resultados en esta fase se sitúan más bien a nivel de inferencia, si se comparan con los que se obtendrían de un estudio completo, sin embargo su rapidez y bajo coste los convierten en una interesante herramienta de exploración. En este caso se ha puesto de manifiesto la complejidad del sistema, su evolución, la sucesión de episodios hidrotermales y su relación con la mineralización, así como la presencia de eventos de alteración potásica relictos, en zonas posteriormente afectadas por la alteración fílica a las que confiere un mayor interés potencial.

Se recomienda una cartografía más detallada, en la zona de estudio y alrededores, de vetillas y sus relaciones temporales de corte, zonas de alteración y de los cuerpos intrusivos relacionados con la mineralización para complementar estos estudios y encontrar nuevas áreas de interés.

REFERENCIAS.

- ACOSTA J., 2006. Características metalogénicas de los yacimientos asociados a los arcos magmáticos mesozoicos del sur del Perú. Latitudes 16°-14°. Informe interno INGEMMET.
- CAMUS, F. 2003. Geología de los sistemas porfiríticos en los Andes de Chile. SERNAGEOMIN, p. 59-68, 129-144.
- CANDIOTTI DE LOS RIOS H. 1995. Geología y análisis de datos cuantitativos del yacimiento de pórfido de cobre Quellaveco. SGP. Volumen Jubilar Alberto Benavides. Pp 33-46
- CASTILLO J., BARREDA J. & CHURCHETL A. 1993. Hojas: 29-n, 29-ñ. Geología de los Cuadrángulos de Laramate y Santa Ana. INGEMMET, Bol. No. 45.
- CLARK A.H., 1990. Geologic and geochronologic constraints on the metallogenic evolution of the Andes of southeastern Peru. SEG.1990; v. 85; no. 7; p. 1520-1583.
- FLUID INC. 1991. Instruction manual. 33 pg.
- FLUID INC. 1991. Temperature calibration standards by syn flinc. 15 pg.
- FOURNIER, R.O. 1999. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. *Economic Geology*, 94, 1193–1211.
- GUILBERT J.M & PARK C.F. Jr., 1976. The geology of ore deposits. Freeman. Pp170-197
- GUSTAFSON, L. B., & HUNT (1975), The Porphyry Copper Deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, V. 70, N° 5, pp. 857-912.
- GARRIDO M. & DOMINGUEZ E. 1997. Geología, alteración hidrotermal e inclusiones fluidas del yacimiento del tipo cobre porfídico La Voluntad, Provincia Neuquén, Argentina. *Revista Geológica de Chile*, Vol 24, No. 1. p. 98-108. 1997.
- GOLDSTEIN, TJ REYNOLDS. 1994 - SEPM Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals RH .
- HEDENQUIST J. (1987). «Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the circum-Pacific Basin». En Horn editor, Transactions of the Fourth Circum-Pacific Energy & Mineral Resources Conference, Singapore. American Association of Petroleum Geologists, pp. 513-524.
- HEDENQUIST J., ARRIBAS JR., & REYNOLDS J. 1998. Evolution of an Intrusion-Centered Hydrothermal System: Far Southeast-Lepanto Porphyry and Epithermal Cu-Au Deposits, Philippines. *Economic Geology*, V. 93, N° 4, pp 373-404.

- INJOQUE J., ARANDA A. 2005. Metalogenia de la Costa - visión actualizada. Sociedad Geológica del Perú. Volumen Especial, n. 6: "Alberto Giesecke Matto", pp. 149-166.
- KIHIEN, A. 1995. Geología, génesis de la mineralización – alteración y evolución de los fluidos hidrotermales en el pórfido de cobre Quellaveco. SGP. Volumen Alberto Benavides. Pp 159-178. $(Mn_{+2}, Fe_{+2})SiO_3H_2O(?)$
- LOWELL, J. D., AND GUILBERT, J. M., 1970, Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits: *Econ. Geol.*, v. 65. p. 373-408.
- NEBOCAT J., HENSTRIDGE D., PLENGE R. 1999. The discovery and geologic setting of the Lara porphyry copper deposit, southern coastal Perú. *Bol. SGP* No. 89, 1999.
- NOBLE, D., MCKEE, E., MÉGARD, F. 1979. Early Tertiary "Incaic" tectonism, uplift and volcanic activity, Andes of Central Peru. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 90, n. 10, pp. 903-907, October 1979.
- MAKSAEV V. 2004. PORFIDOS CUPRIFEROS. Universidad De Chile. Facultad De Ciencias Físicas y Matemáticas - Departamento de Geología. Casilla 13518 – Correo 21 – Fax 6963050–Santiago de Chile.
<http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/PORFIDOS%20CUPRIFEROS.pdf>
<http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/INCLUSIONES%20FLUIDAS.pdf>
- MEYER, C. & HEMLEY, J. J., 1967. Wall rock alteration: In: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Barnes, H. L. (Ed) 166-235. Holt, Rinehart and Winston, Nueva York.
- MUKASA, S., TILTON, G. 1985. Zircon U-Pb ages of super-units in the coastal batholith, Perú. Pitcher, Wallace Spencer; Atherton, Michael P.; Cobbing, Edwin John; Beckinsale, Robert D., *Magmatism at a plate edge, the peruvian Andes*. . New York: John Wiley & Sons, 1985, pp. 203-207.
- NASH, J.T., 1976. Fluid inclusión petrology-data from porphyry copper deposits and applications to exploration. U.S.G.S. Professional Paper 907D, 16 p.
- PADILLA-GARZA, R. 2003. Description and Evolution of the Escondida Porphyry Copper Deposit, Antofagasta Region, Northern Chile. A Dissertation Submitted to the Faculty of the Department Of Geosciences In Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of PhD. In the Graduate College The University Of Arizona.
- PANTELEYEV, A. (1995): Subvolcanic Cu-Au-Ag (As-Sb); in *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*, Lefebure, D.V. and Ray, G.E., Editors, B.C. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, Open File 1995-20, pages 79-82.

- PIRAJNO F. 1992. Hidrotermal Mineral Deposits. Principles and Fundamental Concepts for the exploration Geologist. Springer-Verlag. 709 p.
- PITCHER, W.S. 1985. A multiple and composite batholith. In Magmatism at a plate edge. The peruvian Andes. In Magmatism at a plate edge. Edited by W. S. Pitcher, M.P. Atherton, E.J. Cobbing, R.D. Beckinsale. John Wiley and Sons Inc. New York. Pp 243-249.
- POTTER. R.W., 1977. Pressure correction for fluid inclusions homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl – H₂O. U.S. Geological Survey Journ. Res. 5, p. 603-607.
- QUANG, C.X., CLARK A.H. LEE J.K. & HAWKES N. 2005. Response of supergenes processes to episodic cenozoic uplift, pediment erosion, ignimbrite eruption in the porphyry copper province of southern Perú. SEG, v. 100, 2005, pp. 87-114.
- REYNOLDS, T.J., AND BEANE, R.E., 1985. Evolution of hydrothermal fluid characteristics at the Santa Rita, New Mexico, porphyry copper deposit. Economic Geology, Agosto 1985.
- RIVERA F. 2006. Caracterización genética y potencial económico del sistema pórfido de Cu-Mo Puquio. Tesis para optar el título profesional de ingeniero geólogo. UNMSM(en prensa).
- ROEDDER, E., 1984. Fluid Inclusions. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, Vol. 12, 644 p. Samson, A. Anderson, D. Marshall (eds): Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation Mineralogical Association of Canada 2003, Short Course Series, vol. 32, 374 pp.
- SAMSON, A. ANDERSON, D. MARSHALL (eds). 2003: Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, vol. 32, 374 pp.
- SEEDORF E., DILLES J., PROFFETT., EINAUDI M., ZURCHER L., STAVAS W., JOHNSON D. & BARTON M. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. In SEG Inc. Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005, pp 251-298.
- SHEPPARD, T., & GUSTAFSON, L. B., 1976. Oxygen and hydrogen isotopes in the porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. Economic Geology, v. 71, pp. 1549-1559.
- SHEPPERD, T., RANKIN, A.H., & ALDERTON, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusions studies, Blakie, Glasgow, 235 p.
- SKEWES, M.A., & ATKINSON, W. Jr. (1985): Petrology of the early formed hydrothermal veins within the central potassic alteration zone of los Pelambres porphyry copper deposit, Chile. Rev. Geol. de Chile No.25/26 p.39-56 10 Abb., 5 Tab. Santiago .

- SILLITOE, R.H, 1995. Exploration of porphyry copper lithocaps. PANCRIM'95, pp. 527-532.
- SILLITOE, R.H. 2003. Iron oxide-cooper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita* (2003) 38: 787-81.
- SILLITOE R. H. & PERELLÓ J. 2005. Andean copper province: Tectonogmagmatic, deposit types, metallogeny, exploration and discovery. In SEG Inc. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. 2005, pp 845-890.
- TITLEY, S.R., ed., 1982, *Advances in geology of the porphyry copper deposits, southwestern North America*: Tucson, University of Arizona Press, 560 p.
- TOSDAL, R.M. & RICHARDS, J.P., 2001. Magmatic and Structural Controls on the Development of Porphyry Cu \pm Mo \pm Au Deposits. In: Richards, J.P. and Tosdal, R.M. (eds.) *Structural Controls on Ore Genesis*. Society of Economic Geologists, *Reviews in Economic Geology*, V. 14, p.157-181.
- VELASCO, F. 2004. Introducción al estudio de las inclusiones fluidas. Curso latinoamericano de metalogenia UNESCO-SEG 2004 CRICYT, Mendoza, Argentina del 17 al 28 de agosto de 2004
- WATANABE, Y., & HEDENQUIST, J.W., 2001. Mineralogic and Stable Isotope Zonation at the Surface over the El Salvador Porphyry Copper Deposit, Chile. *Economic Geology*, Vol. 96, 2001, pp. 1775–1797