



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**DOCUMENTOS SOBRE INCLUSIONES FLUIDAS II:
CARACTERIZACIÓN DE FLUIDOS ASOCIADOS A ELEMENTOS CRÍTICOS
DE LA VETA LEONA EN EL DISTRITO MINERO DE CHANCÓN, VI REGIÓN, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

BASTIÁN ALBERTO MUÑOZ BÓRQUEZ

**PROFESOR GUÍA:
JORGE DANIEL MONCADA DE LA ROSA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CLAUDIA CANNATELLI
VICTOR MAKSAEV JURCHUC**

**SANTIAGO DE CHILE
2017**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Bastían Muñoz B.
FECHA: 14-06-2017
PROF. GUÍA: Daniel Moncada, PhD

“Documentos sobre inclusiones fluidas II: Caracterización de fluidos asociados a elementos críticos de la veta Leona en el distrito minero de Chancón, VI región, Chile”

La globalización junto al constante crecimiento demográfico, ha generado un aumento en la demanda energética a través de nuevas tecnologías capaces de producir, transmitir o conservar energía, como avanzados paneles fotovoltaicos. Para esto, se requiere de una variedad de elementos que incluyen al indio, telurio y selenio (Jaffe et al., 2011). La producción comercial de estos elementos se restringe a la refinación de *commodities* provenientes de pórfidos o epitermales enriquecidos en In-Te-Se.

Esta investigación tiene como objetivo caracterizar los fluidos que formaron la veta Leona perteneciente al distrito de Chancón, ubicado en la Cordillera de la Costa de Chile central. En este estudio se identifican diferencias en la geoquímica de roca total y contenido metálico del fluido con el uso de inclusiones fluidas, la que junto a la petrografía permiten una mejor comprensión del transporte y deposición metálica en vetas de la Cordillera de la Costa. Esta veta muestra una zonación mineral de superficie a profundidad. En superficie se encuentra abundante cuarzo con mineralización de pirita, oro y plata. Mientras que en profundidad se encuentra escaso cuarzo con mineralización de calcopirita, esfalerita, galena y menor pirita. Por otra parte, el análisis geoquímico de roca total en 12 especímenes, reportaron presencia de indio, telurio y selenio en la veta. La interpretación de los datos permite definir tres etapas de mineralización: (1) Etapa pre-mineralización, caracterizada por pirita y calcopirita en cuarzo, (2) Etapa de Au-Ag metales base, caracterizado por pirita, calcopirita, esfalerita, galena y Au-Ag en pirita y calcopirita, (3) Etapa post mineralizada, caracterizada por calcita, clorita y epidota.

La petrografía de inclusiones fluidas mostró Arreglos de Inclusiones Fluidas (FIA's) primarias y secundarias, clasificables como: (a) primarias con inclusiones ricas en líquido coexistiendo con ricas en vapor, en cuarzo euhedral, con temperaturas de homogeneización (T_h) entre 250 y 245° C y salinidades entre 6.0 y 7.6% en peso NaCl eq; (b) secundarias con inclusiones ricas en vapor en cuarzo euhedral; (c) secundarias con inclusiones ricas en líquido en cuarzo zonal, con T_h entre 250 y 249° C y salinidades entre 0.5 y 0.9% en peso NaCl eq; (d) primarias con inclusiones ricas en líquido con mineralización de calcopirita, con T_h entre 240 y 125° C, con salinidades entre 1.6 y 12.6% en peso NaCl eq. Por último, la ablación laser en inclusiones fluidas, mostró enriquecimiento de In, Te, Se, Au, Ag en esfalerita, de lo que se infiere que el transporte metálico habría ocurrido por participación de complejos sulfurados y clorurados.

AGRADECIMIENTOS

Esta memoria fue apoyada por FCFM-UChile concedida a Moncada D., y a Alexis Valenzuela, Oscar Cuevas pertenecientes a la Minera Don Oscar Ltda. Esta, se ha realizado en el marco de los Proyectos Fondap-Conicyt #15090013 “Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA)” y Fondecup EQM140009 (“Microtermometría de Inclusiones Fluidas”).

En primer lugar, agradecer con todo mi corazón a mis papás por todo el amor, dedicación, paciencia y apoyo incondicional que me han dado siempre y en todo sentido. Siendo ellos un pilar fundamental en mi vida. Sin su apoyo jamás hubiese llegado a este anhelado momento. Agradecerle también a mi hermano, que siempre ha estado presente en todas las etapas de mi vida, ofreciéndome siempre buenas ideas y teniéndome siempre mucha paciencia y cariño. A la mami, por todo el amor que por años me dio, por sus valores, enseñarme a salir adelante y jamás rendirme ante nada ni nadie.

En especial agradecerle a Brenda, la persona que más rawr-amo en este mundo. Por todo el infinito amor, paciencia y ayuda que me ha dado tanto en mi vida, como en este largo proceso académico. Sin su apoyo incondicional, consejos y numerosas correcciones, quizás no habría podido llegar a esta importante instancia en mi vida.

Agradecerles a mis amigos, en especial al Enemigo, JP, Matro, Pauli, Esclava y Lore, quienes siempre me han apoyado y aconsejado en todos los difíciles momentos que he pasado. Acompañándome en todas mis peripecias y rabiets que he vivido durante esta larga estadía en la universidad.

También agradecerle a la maravillosa gente de EdV, en especial la Marce, Liss, Dani y Lucho por todo el cariño y paciencia que han tenido todos estos años en lo que he trabajado con ellos.

Darle las gracias a Andrés por su ayuda, apoyo y consejos para poder llevar a cabo esta memoria de la mejor manera posible y agradecerle también a Berni por enseñarme a hacer microtermometría, editar imágenes y encontrar ese escurridizo oro.

Agradecerle a Blanca por sus innumerables consejos y sabias palabras en los momentos más críticos. Además, agradecer a los profesores Víctor y Claudia por sus dedicadas correcciones y orientarme en diversos aspectos de este trabajo.

Agradecerle también a Daniel Moncada, por guiarme en este proyecto, atender mis numerosas dudas, apoyarme y mostrarme el interesante mundo de las inclusiones fluidas, que en Chile aún está muy poco desarrollado.

Finalmente, agradecerle a Julio Díaz por su buena disposición en todo momento para poder usar el equipo del taller de corte y realizar excelentes cortes dobles pulidos.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Hipótesis de Trabajo	2
1.3. Ubicación y accesos	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Elementos críticos Energéticos (<i>ECE's</i>)	4
2.2. Epitermales y solubilidad metálica	5
2.3. Texturas microscópicas diagnósticas en cuarzo y calcita.....	16
2.4. Inclusiones Fluidas.....	17
2.5. Estudios previos.....	21
3. MARCO GEOLÓGICO	23
3.1. Geología Regional	23
3.2. Estratigrafía distrital.....	24
3.3. Intrusivos	24
3.4. Estructuras y lineamientos.....	25
3.5. Mineralización	25
4. METODOLOGÍA	28
4.1. Muestreo y clasificación	28
4.2. Preparación de cortes transparentes rápidos (corte transparente rápido)	29
4.3. Petrografía	29
4.4. Microtermometría	30
4.5. SEM-BSE.....	31
4.6. Raman.....	32
4.7. Ablación Laser ICPMS.....	32
5. RESULTADOS	35
5.1. Evidencia en terreno	35
5.2. Geoquímica.....	38
5.3. Petrografía	41
5.4. Petrografía de inclusiones.....	45
5.5. Microtermometría	50
5.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM-BSE)	52
5.7. Raman.....	53
5.8. Ablación laser ICP-MS	54
6. DISCUSIONES	57
6.1. Geoquímica.....	57
6.2. Petrografía y Paragénesis	59
6.3. Evolución del fluido	65
6.4. Enriquecimiento metálico	70
6.5. Comparación con otros depósitos.....	73
7. CONCLUSIONES	75
8. BIBLIOGRAFÍA	77

ANEXOS	83
Anexo A.....	83
Anexo B.....	84
Anexo C.....	85
Anexo D.....	87
Anexo E.....	92
Anexo F.....	94
Anexo G.....	103
Anexo H.....	104
Anexo I.....	105
Anexo J.....	106
Anexo K.....	108
Anexo L.....	114
Anexo M.....	115
Anexo N.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa de rutas y accesos al distrito de Chancón 3
- Figura 2: Esquema generalizado (no a escala) mostrando la estructura, procesos, alteración, tipos de fluidos, entre otros parámetros en la formación de depósitos epitermales. Los epitermales de baja sulfuración se forman a partir de fluidos a profundidades <1.5 km, Ph neutro – alcalino y en equilibrio con la roca hospedante a profundidades mayores. Los epitermales de alta sulfuración se forman por un ascenso de volátiles en un ambiente epitermal hasta ser absorbidos por aguas meteóricas, el HCl y SO₂ forman una solución altamente ácida que altera la roca desde el conducto del fluido (White y Hedenquist, 1995). (extraído de Comprubí et al., 2003). 6
- Figura 3: Solubilidad de oro en función del pH y estado de oxidación (f_{O_2}). Calculada a una temperatura de 250°C, actividad de azufre a_S de 0.01, concentración molal de ion potasio (K^+) de 5×10^{-3} y concentración molal de ion magnesio Mg^{2+} de 4×10^{-5} . Las líneas verticales representan el equilibrio de Illita-adularia con sílica amorfa y cuarzo. La máxima solubilidad de oro está representada por el círculo amarillo y la solubilidad en ppb se representa en líneas celestes (modificado de Henley and Brown, 1985; Shenberger and Barnes, 1989). 8
- Figura 4: Solubilidad de plata en función del pH y estado de oxidación (f_{O_2}). Calculada a una temperatura de 250°C, actividad de azufre a_S de 0.01, actividad de cloro 0.1. Las áreas de predominio para $AgCl_2$ y $Ag(HS)_2$ están separadas por la línea vertical oscura en función del pH y estado de oxidación. Las líneas segmentadas representan los campos de predominio de distintas especies de sulfuro. La máxima solubilidad de plata está representada por el círculo amarillo y la solubilidad en ppb se representa en líneas celestes (extraído de Gammons y Barnes, 1989). 9
- Figura 5: a) Solubilidad de esfalerita en una solución de H₂S ($P=P_{sat}$; $a_S = 0.1$ en función del pH (modificado de Tagirov y Seward (2010). b) Diagrama de predominancia para los complejos Zn-S-HS en función del pH a $P=P_{sat}$ y $a_S = 0.1$ (extraído de Tagirov and Seward, 2010). 10
- Figura 6: Variación de solubilidad para Au, Ag y Zn en un diagrama log S vs log Cl (Modificado de Henley, 1990). 11
- Figura 7: a) Campos de estabilidad con dominancias de especies Ag-Se-S-Na-Cl-O-H a 300°C, concentración molal de Ag de 10^{-7} , concentración molal de Se de 10^{-8} . Líneas punteadas separa campos con dominancia de especies de S y líneas sólidas separa campos de dominancia de Se. Líneas grises horizontales indican la fugacidad de oxígeno para el buffer de H-M (línea superior) y para el buffer N-NO (línea inferior). Áreas verdes y grises representan las zonas de estabilidad para las fases sólidas de Se-Ag y líquidas de Se nativo (modificado de Akinfiyev and Tagirov, 2006). b) Campos de estabilidad para fases sólidas de plata y selenio en función de la temperatura y presión saturada de H₂O (extraído de Akinfiyev and Tagirov, 2006). 12

Figura 8: a,b: Especiación y solubilidad del Au y Te en vapor y fluido salino para el sistema Au-Te-H ₂ O-S-Cl a 300°C a una presión de vapor de 85.8 bar, concentración molal de Cl ⁻ de 1, concentración molal de S de 0.1, a_{K^+} entre 1 – 0.1, 1 ppm de Au, 10 ppm de Te. La línea gris (Figura 7b) es 0.320 (10-0.5) ppm de oro. Extraído de Grundler et al (2013).....	13
Figura 9: Campos de estabilidad y predominancia para complejos clorurados, hidróxidos e hidroxiclорurados de In(III) a 25°C y 1 bar. Extraído de Wood and Samson (2006).....	14
Figura 10: Superficie de solubilidad de Sb ₂ S _{3(s)} : A. Solución como sulfuro, dependiendo del pH, temperatura y m_{HS^-} ; B. Solución como clorurado (pH = 2), dependiendo de la temperatura y m_{Cl^-} . Extraído de Obolensky et al (2007).....	15
Figura 11: Resumen de texturas halladas en cuarzo y calcita observadas en ambientes de tipo epitermal. Estas, pueden ser usadas como guía para detectar la ocurrencia de ebullición. Modificado de Moncada et al, 2012.	17
Figura 12: Distribución de inclusiones: (P) primarias siguiendo zonas concéntricas, paralelas a las caras de crecimiento; (S) secundarias, cruzan los cristales en cualquier dirección.	20
Figura 13: Tipos de arreglos de inclusiones fluidas dependiendo si estas fueron atrapadas en condiciones de no ebullición, ebullición o evaporación rápida.	20
Figura 14: Mapa geológico del distrito de Chancón, escala 1:30000. Modificado de Munzenmayer (2002).	26
Figura 15: Acercamiento al área de estudio (Veta Leona), mostrando la ubicación de la entrada de las principales labores mineras en esta veta.	27
Figura 16: Metodología de muestreo realizada en la veta Leona	28
Figura 17: Microscopio Olympus BX53 y Linkam THM-600 de la Universidad de Chile.	31
Figura 18: SEM-EDX-CL Quanta 250 de la Universidad de Chile.	31
Figura 19: Raman Jobin Yvon LabRam-HR800 perteneciente a Virginia Tech.	32
Figura 20: LA-ICPMS Agilent 7500ce ICPMS quadrupole mass spectrometer acoplado a un sistema de ablación GeolasPro Eximer 193-nm ArF laser ablation system. Perteneciente a Virginia Tech.	33
Figura 21: Evidencia en terreno: a) Sección transversal de la veta con evidencia de dos brechas hidrotermales (Brecha I y II); b) Muestra superficial mostrando la coexistencia de estas dos brechas, además del halo de alteración presente en la porción de la roca correspondiente a la Brecha I. Cpy: calcopirita; Jas: jaspe; Qtz: cuarzo; Py: pirita.....	36
Figura 22: Evidencia en terreno: a) Muestra en profundidad de la Brecha I y una vetilla con mineralización de calcopirita en cuarzo; d) Brecha hidrotermal (Brecha I) con clastos de roca caja y mineralización de calcopirita en la matriz de brecha. Cpy: calcopirita; Qtz: cuarzo.	37
Figura 23: Contenido medio en la corteza vs análisis en roca total. La recta anaranjada representa una línea 1:1	39
Figura 24: geoquímica de especímenes realizada en las labores mineras en profundidad, al interior de la veta Leona mostrando valores para Au, Ag, In, Te y Se.	40

Figura 25: a) Cuarzo plumoso mostrado a n�oculos cruzados (CP) y n�oculos paralelos (PPL); b) Cuarzo rompecabeza; c) Cuarzo euhedral; d) Sílica amorfa (cuarzo coloforme); e) Cuarzo zonal.....	42
Figura 26: Ejemplo de mineralización de pirita diseminada en cuarzo rompecabeza....	44
Figura 27: a) Evidencia de illita en cuarzo rompecabeza, correspondiente a una muestra superficial con evidencia de evaporación rápida. b) Exolución de calcopirita en esfalerita tipo masiva.	44
Figura 28: Arreglo de Inclusiones Fluidas A (BC03C) en cuarzo euhedral encontrado en un especimen a 715 msnm.	45
Figura 29: Arreglo de Inclusiones Fluidas B) en cuarzo euhedral encontrado en un especimen a 560 msnm.	46
Figura 30: Arreglo de Inclusiones Fluidas C en cuarzo euhedral encontrado en un especimen a 625 msnm.	47
Figura 31: Arreglos de Inclusiones Fluidas D (T1.2) con inclusiones ricas en líquido y presencia de mineralización en esfalerita.	48
Figura 32: FIA´s D encontrados en zonas de crecimiento de esfalerita (A→B). A) Arreglos de Inclusiones Fluidas T3A con mineralización, junto a FIA´s secundarios con necking down. B) Arreglos de Inclusiones Fluidas T3B posteriores, con mineralización.	49
Figura 33: Diagrama T_h vs T_m de los resultados obtenidos de microtermometría en la veta Leona.....	51
Figura 34: SEM-BSE realizado en pirita. a) �rea detectada en pirita con señales de Fe, S y Py. b) �rea detectada en pirita con señales de Fe, Cu, S y Ag. El C detectado corresponde al metalizado.	52
Figura 35: Picos obtenidos en Raman en una inclusión de la muestra BC11-T3. Los picos correspondientes a CO ₂ se encuentran en 1285 y 1387 Qtz: cuarzo, *: no reconocido.	53
Figura 36: Picos obtenidos con ablación láser, correspondientes a inclusiones secundarias en Arreglos de Inclusiones Fluidas en cuarzo zonal [BC11-T3]. IF: Inclusion Fluida; Qtz: cuarzo.	56
Figura 37: Picos obtenidos con ablación láser, correspondientes a inclusiones primarias en Arreglos de Inclusiones Fluidas en esfalerita [T1.2]. IF: Inclusion Fluida; Sph: Esfalerita.	56
Figura 38: Diagrama de cajas y bigotes comparativo realizado por stage para 28 elementos. La línea roja representa la ley de corte de Au de 1 ppm.	58
Figura 39: Texturas clave para determinar la paragénesis en cuarzo: 1. Cuarzo subeuhedral; 2. Sílica amorfa (coloforme); 3. Cuarzo plumoso; 4. Cuarzo rompecabeza.	60
Figura 40: Minerales metálicos de mena y ganga más comunes en la veta. a) Coexistencia de pirita, calcopirita, esfalerita y galena; b) Textura de disolución en galena por esfalerita; Textura de exolución de calcopirita en esfalerita.	61
Figura 41: Paragénesis de la veta Leona. En esta se representa los tres eventos principales de mineralización, siendo el segundo el que presentó mayor volumen de mineralización y presencia de metales preciosos.....	64

Figura 42: Diagrama de cajas y bigotes T_m y T_h ordenados por stages para los 9 Arreglos de Inclusiones Fluidas medidos	66
Figura 43: a) Curvas líquido – vapor para salinidades de 2, 5, 10 y 15% en peso NaCl. Las líneas verticales representan las isocoras calculadas para cada Arreglos de Inclusiones Fluidas, mientras que los círculos enumerados representan la secuencia PT mínimas seguidas por el fluido, la doble flecha indica que no determinaron las condiciones de atrapamiento. Diagrama realizado en base a Wagner y Prub (2002); Duan y Zhang (2006).	68
Figura 44: Diagrama T_h vs T_m mostrando el camino seguido por el fluido durante su evolución, el que se resume a la derecha. Paréntesis indica número de inclusiones.	69
Figura 45: Diagrama resumen en profundidad mostrando las principales texturas, tipos de inclusiones y concentraciones de los elementos explorados de interés. ...	72
Figura 46: Concentraciones de Au, Ag, In y Se obtenidas por LA-ICPMS para cada Arreglos de Inclusiones Fluidas, ordenadas por la paragénesis.	73
Figura 47: Comparación de concentraciones de telurio de otros depósitos y Chancón (Modificado de Kelley y Spry, 2016).....	74
Figura 48: Intervalo de interés seleccionado en AMS, para una inclusión fluida	85
Figura 49: Background signal y sample signal ajustados en AMS para el NIST SRM-610.	86
Figura 50: Panel de opciones en del AMS.....	86
Figura 51: Raman obtenido en arreglo de inclusiones fluidas secundarias en cuarzo zonal	105
Figura 52: Ablación láser correspondiente a una inclusión del arreglo A-T2	115
Figura 53: Ablación láser correspondiente a una inclusión del arreglo B-T1	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precio promedio en dólares (USD) por libra y producción mundial (toneladas) para indio, telurio, selenio y cobre en el 2016 (U.S. Geological Survey, 2017; BGS, 2017).	4
Tabla 2: Características y condiciones usadas en el LA-ICPMS.	33
Tabla 3: Principales elementos detectados por geoquímica de roca total en especímenes de la veta Leona	38
Tabla 4: Resumen de datos de microtermometría e información anexa. La muestra BC13 corresponde a un Arreglo de Inclusiones Fluidas con únicamente inclusiones ricas en vapor. Cal: calcita, Qtz: cuarzo, Sph: esfalerita, Min: mineralización, Prom: promedio, n: número de inclusiones. msnm: metros sobre el nivel del mar.	50
Tabla 5: Porcentaje en peso (% en peso) y molar (% mol) semi-cuantitativo para los elementos detectados en Pirita.	52
Tabla 6: Valores promedio obtenidos en diferentes Arreglos de Inclusiones Fluidas para Au, Ag, In, Te y Se. msnm: metros sobre el nivel del mar, LOD: bajo del límite de detección.....	55
Tabla 7: Valores promedio de Au, Ag, In, Te y Se en minerales de mena y ganga. LOD: bajo del límite de detección.....	55
Tabla 8: Resumen de los valores obtenidos de salinidad (% en peso NaCl eq) y presiones mínimas para cada FIA´s. La presión obtenida en BC03C corresponde a la presión efectiva, mientras que en el resto corresponde a la presión mínima estimada.	68
Tabla 9: Datos de microtermometría de otros estudios (Sernageomin y JICA/MMAJ, 1984).....	83
Tabla 10: Resultados de geoquímica en roca total para 62 elementos	93
Tabla 11: Datos obtenidos en microtermometría.	103
Tabla 12: Tabla resumen de los datos de microtermometría. Muestra BC13 corresponde a un arreglo de inclusiones fluidas con únicamente inclusiones ricas en vapor. Altitud: en metros sobre el nivel del mar, Min: presencia de mineralización presente en las inclusiones, T _n : temperatura de homogenización, T _m : temperatura de último fundido.	104
Tabla 13: Valores de fermi doublet, densidad y presión de CO ₂ en Arreglos de Inclusiones Fluidas secundarias en cuarzo zonal.	105
Tabla 14: Datos (ppm) obtenidos en LA-ICPMS en inclusiones fluidas. NM: No Medido en AMS por alto nivel de ruido, LOD: bajo el límite de detección	107
Tabla 15: Datos obtenidos en LA-ICPMS en minerales. LOD: bajo el límite de detección (tabla 6 de 6).	113
Tabla 16: Relación de aporte (% ppm) del host sobre la inclusión. Sph: esfalerita.	114

1. INTRODUCCIÓN

La globalización junto al constante crecimiento demográfico, ha generado un aumento en la demanda energética a través de nuevas tecnologías disponibles en el mercado a nivel mundial (Talens et al., 2011). El crecimiento de industrias que generan productos capaces de producir, transmitir o conservar energía, como la automotriz eléctrica, paneles solares y turbinas eólicas, entre otras, han hecho que surja, consecuentemente, la necesidad de aumentar la disponibilidad de recursos claves para su desarrollo (Talens et al., 2011). Dentro de ellos destaca el uso de ciertos elementos químicos con propiedades que aumentan la eficiencia de estas nuevas tecnologías, por ejemplo, por su conductividad. Los elementos que permiten esto hoy en día se conocen como *elementos críticos energéticos*, debido a sus niveles de escasez, necesidad y complejidad de localización. Algunos de los elementos de esta índole que destacan en la aplicación tecnológica, son el telurio (Te), selenio (Se) y el indio (In) entre otros (Jaffe et al., 2011). Un ejemplo de ello son las celdas solares CIGS (*Copper-Indium-Gallium-Selenide solar cells*), que tienen una eficiencia energética de hasta un 20.5% (ISE, 2016).

Actualmente estos metales son recuperados como subproducto de la refinación de otros *commodities*. Por ejemplo, el Te y Se son subproductos provenientes de pórfidos cupríferos (John y Taylor, 2016; Goldfarb et al., 2016), mientras que el In, deriva de la producción de Cinc (Goldfarb et al, 2016). A nivel mundial, la producción de estos elementos se encuentra altamente restringida, siendo fundamental encontrar nuevas fuentes para extraer estos elementos. Países como Japón figuran en la refinación de Te y Se, mientras que China se sitúa como el principal refinador de In (U.S. Geological Survey, 2015). Recientemente, se ha reconocido que los epitermales podrían tener una contribución en la producción de elementos críticos energéticos (Goldfarb et al, 2016).

El propósito de esta investigación consiste en evaluar la posible ocurrencia de elementos críticos en el cuerpo mineralizado, profundizando a su vez en las condiciones *PTX* (Presión – Temperatura – Composición) bajo las cuales ocurre la mineralización. Permitiendo una mejor comprensión del transporte y deposición metálica en vetas de la Cordillera de la Costa. La metodología para ello contempló: recolección de especímenes, geoquímica, preparación de cortes transparentes rápidos, petrografía, paragénesis mineral y temporal, microtermometría de inclusiones fluidas, Raman y ablación laser.

La veta corresponde a un sistema epitermal de Au-Ag con metales base como Pb y Zn (Munzenmayer, 2002). Esta, muestra una zonación metálica desde superficie (715 msnm), hasta las labores más profundas (560 msnm) en la veta. Abarcando desde minerales como cuarzo, piritita y plata-oro en superficie, a minerales como clorita, epidota, calcopirita, esfalerita y galena en los sectores explotados más profundos. Estas características sumado al comportamiento del In, Te, Se y otros elementos en epitermales, hacen suponer que puede existir enriquecimiento de estos elementos en Chancón, pudiendo extrapolarse a otros depósitos de tipo epitermal, contribuyendo así a la caracterización de los epitermales que contienen *elementos críticos energéticos* y a su vez, al área de exploración minera.

1.1. Objetivos

Objetivo General

Caracterizar los fluidos que mineralizaron la Veta Leona, a la cual hipotéticamente estarían asociados elementos críticos (In, Te y Se) y otros elementos como Au y Ag.

Objetivos Específicos

Determinar la temporalidad relativa de los eventos que mineralizaron la veta Leona.

Identificar las condiciones termodinámicas *PTX* (Presión – Temperatura – Composición) mínimas del fluido mineralizador en la veta Leona.

Determinar los tipos de volátiles presentes y evaluar la posible ocurrencia de elementos críticos: In, Te y Se en el cuerpo mineralizado a través de análisis geoquímico de especímenes y ablación laser en inclusiones fluidas y minerales hospedantes.

1.2. Hipótesis de Trabajo

La veta Leona, perteneciente al distrito minero de Chancón reúne características que hacen suponer que existe un enriquecimiento en elementos como: In, Te, Se y otros elementos. Chancón es un epitermal de baja sulfuración, emplazado en rocas volcánicas calcoalcalinas de la Formación Lo Valle. En él existe una zonación metálica detectada desde la superficie (Au-Ag) hasta los sectores más profundos en explotación como metales base (Munzenmayer, 2002).

Además, el selenio forma diversos minerales al estar asociado a oro y plata, como los selenuros (Lindgreen, 1933; White y Hedenquist, 1995; Richards, 1995; Kovalenker, 2004; Akinfiyev y Tagirov, 2006). La estabilidad y transporte de este elemento ocurre bajo condiciones afines a plata: temperaturas <300 °C, pH neutro a alcalinas y fugacidad de oxígeno ($\log a_{O_2}$) entre -20 y -30. A su vez, la estabilidad relativa de los complejos bisulfurados de plata $[Ag(HS)_2^-]$ e hidroselenuro $[Ag(HS)_2^-]$ son similares en cuanto a las condiciones bajo las cuales se transportan y precipitan (Akinfiyev & Tagirov, 2006).

Por otro lado, el telurio se asocia con oro y plata formando telururos (Goldfarb et al., 2016). Trabajos experimentales y teóricos han mostrado que dichos telururos se depositan entre los 200° y 300°C a partir de fluidos hidrotermales diluidos (Cook y Ciobanu, 2005; Goldfarb et al., 2016). En condiciones básicas, medianamente reducidas el Te puede ser transportado asociado al complejo de $[Au(HS)_2^-]$.

Por último, el indio generalmente se asocia a la presencia de esfalerita (Alfantazi y Moskalyk, 2003; Wood y Samson, 2006; Dill et al., 2013; Goldfarb et al., 2016), ambos minerales comunes en el distrito de Chancón (Munzenmayer, 2002).

1.3. Ubicación y accesos

El distrito minero de Chancón, que contiene la veta La Leona, se encuentra ubicado en el borde oriental de la cordillera de la costa de Chile, en la VI Región, provincia de Cachapoal, a unos 15 km en dirección NW de la ciudad de Rancagua y 69km al SW de Santiago (Figura 1).

El acceso al distrito de Chancón desde Santiago, se realiza a través de la ruta 5 sur, hasta San Francisco de Mostazal. En este punto se accede por la ruta H-10 en dirección sur, hasta intersectar con la ruta H-188, la cual finaliza en el distrito de Chancón.

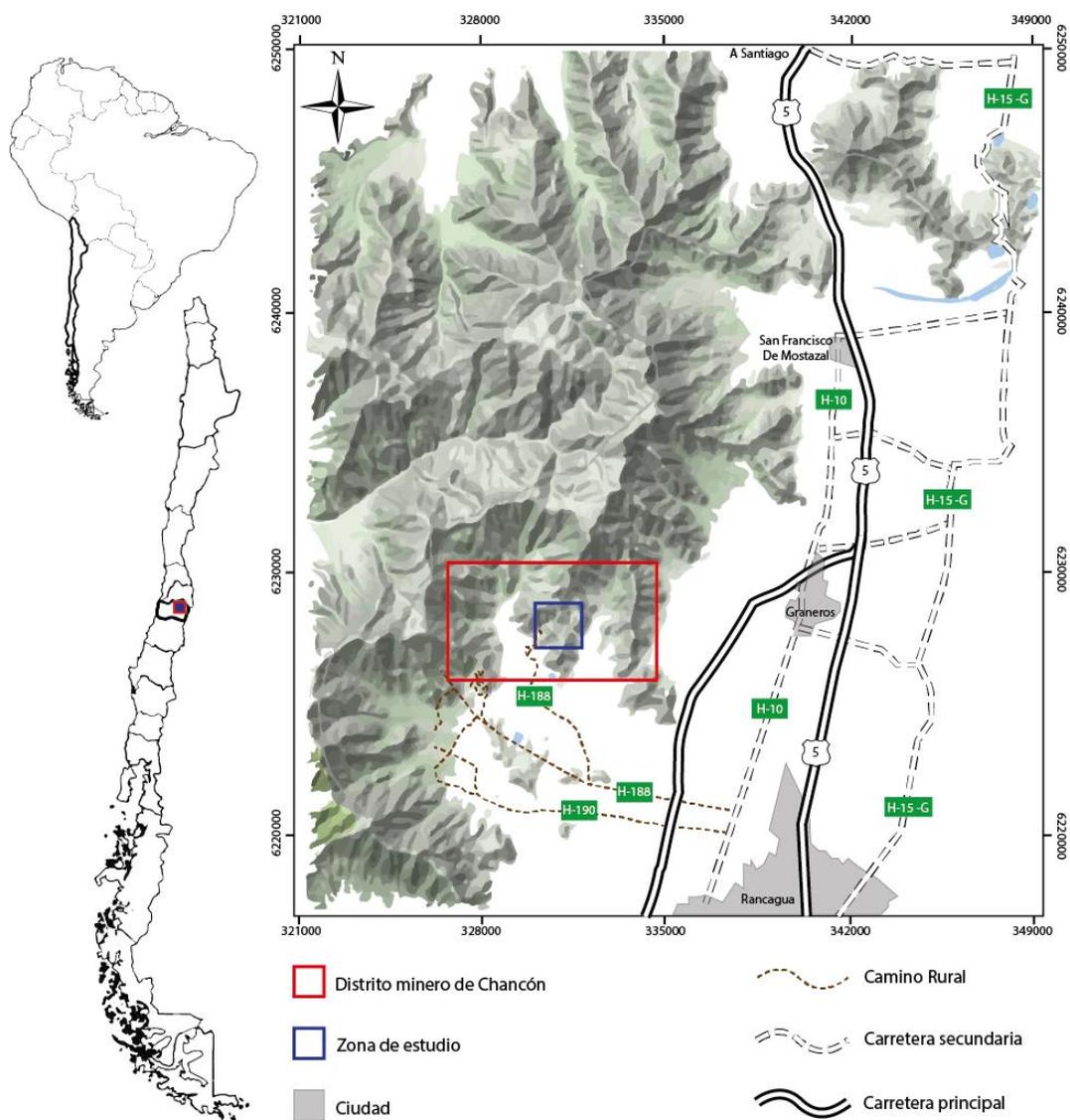


Figura 1: Mapa de rutas y accesos al distrito de Chancón

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Elementos críticos Energéticos (ECE's)

El progreso tecnológico y energético ha generado la necesidad de disponer de elementos para la producción de productos capaces de transformar, transmitir y/o conservar energía, tales como paneles solares, turbinas eólicas, motores eléctricos y otras invenciones. Algunos de estos elementos son conocidos como *elementos críticos energéticos*. Actualmente, a nivel industrial se requiere una cantidad significativa de estos elementos (Jaffe, et al., 2011), por lo que es necesario disponer de nuevas fuentes para el desarrollo de la industria tecnológica.

Un elemento es considerado como crítico energético dependiendo de su escasez, necesidad y localización (Kelley & Spry, 2016). Existen varios elementos que cumplen estas condiciones, lo que dificulta la adopción de nuevas tecnologías energéticas que no dependan de combustibles fósiles. Algunos de estos son Sb, Be, Co, Ga, Ge, In, PGE's, REE's, Pt, Re, Sc, Te, Se, V, entre otros (Jaffe et al., 2011; Melfos and Vondouris, 2012; Kelley and Spry, 2016). Muchos de estos elementos actualmente son producidos como subproductos de la refinación de otros *commodities* más abundantes como el níquel, cobre, aluminio y estaño (Talens et al., 2011; Jaffe et al., 2011), siendo escasa su recuperación a partir de elementos primarios (Goldfarb et al., 2016). Debido a esto, el precio de algunos elementos como el indio, telurio y selenio son elevados con respecto a *commodities* como el cobre (Tabla 1). Datos del 2012 al 2016 (U.S. Geological Survey, 2017) indican que la producción y demanda de estos elementos han tenido una tendencia al aumento, lo que puede indicar un buen potencial económico para estos elementos en el futuro.

Elemento	Precio por libra (1lb = 453.6g)	Producción mundial (toneladas métricas)
Indio	154 USD	655
Telurio	34 USD	167
Selenio	26 USD	2200
Cobre (referencia)	2.2 USD	19400

Tabla 1: Precio promedio en dólares (USD) por libra y producción mundial (toneladas) para indio, telurio, selenio y cobre en el 2016 (U.S. Geological Survey, 2017; BGS, 2017).

El cuán críticos sean estos elementos mencionados depende de diversos factores. El primero, la escasez, es completamente natural y depende de la concentración y distribución en la corteza. El segundo, hace referencia a la necesidad de estos elementos en la industria, en tanto que el tercero, se relaciona con la localización, lo que puede tener asociado un riesgo geopolítico (Jaffe, et al., 2011). La dependencia de estos elementos puede darse de varias formas, sin embargo, no todas representan un riesgo. Por ejemplo, la dependencia por importación puede ser beneficiosa para suplir elementos domésticos a un costo menor. Por otra parte, el riesgo se genera cuando la producción se concentra en un pequeño número de minas, compañías o naciones. Cuando se descubren fuentes

de raros *commodities* y consecuentemente se desarrolla su explotación en países no desarrollados, el resultado es que usualmente aumenta la inestabilidad política y la privación, en lugar de aumentar el estándar de vida de la mayoría de los ciudadanos (Jaffe, et al., 2011).

2.2. Epitermales y solubilidad metálica

Epitermales

Los depósitos epitermales son una fuente importante de metales como Au, Ag, Cu, Zn y otros. Estos depósitos se forman a profundidades <1.5 km de la paleosuperficie (Figura 7), a temperaturas entre los 150-300°C (White y Hedenquist, 1995; Simmons et al., 2005; Bodnar et al., 2014), salinidades entre 0-15% en peso de NaCl eq. para epitermales de baja sulfuración y entre 1-24% en peso de NaCl eq. para epitermales de alta sulfuración (Comprubí et al., 2003; Bodnar et al., 2014). Comúnmente, estos depósitos están asociados a rocas volcánicas que sobreyacen cogenéticamente a rocas intrusivas (Gemmel & Simmons, 2007).

Los epitermales se clasifican en alta, media o baja sulfuración, en base a factores como el potencial químico del azufre, lo que determina la estabilidad de distintas asociaciones minerales de sulfuro (Sillitoe y Hedenquist, 2003; Simmons et al., 2005).

Los epitermales de baja sulfuración (Figura 2) son depósitos formados a partir de fluidos de pH neutro y reducidos. Estos presentan minerales de ganga como cuarzo ± calcita ± adularia ± illita, con contenidos variables de Au - Ag, Ag - Au o Ag - Pb - Zn (Simmons, S et al., 2005). Además, estos suelen presentar minerales como arsenopirita - pirrotita, esfalerita rica en hierro – pirita (Giggenbach, 1997; Einaudi et al., 2003; Simmons et al., 2005). Existen depósitos epitermales de baja sulfuración en los cuales hay predominio de metales base, los que presentan enriquecimiento en Te y/o Se (So et al., 1995; Alderton and Fallick, 2000). Por otra parte, los epitermales de alta sulfuración son depósitos formados a partir de fluidos ácidos y oxidados (Figura 7). Estos presentan minerales de ganga como cuarzo + alunita ± pirofilita ± dickita ± kaolinita, con metales de Au ± Ag ± Cu (Simmons et al., 2005). Adicionalmente, estos presentan en algunas ocasiones cantidades variables de esfalerita, telururos y predominancia de enargita - pirita ± luzonita, los cuales son indicativos de un ambiente de alta sulfuración (Giggenbach, 1997; Einaudi et al., 2003; Simmons et al., 2005).

Las menas de origen epitermal se forman a partir de fluidos con una salinidad baja a moderada (<6 en peso % NaCl eq), con <1 mol % CO₂ (Simmons, 1991; Davies et al., 2008; Goldfarb et al., 2016) y temperaturas <300°C (White y Hedenquist, 1995; Simmons et al., 2005; Bodnar et al., 2014). La precipitación metálica en estos depósitos ocurre por cambios físicos que afectan la estabilidad de los complejos iónicos disueltos en el fluido, es decir, procesos que incluyen ebullición, mezcla y enfriamiento, disminuyendo la solubilidad metálica, provocando la precipitación de elementos de mena (Albinson et al.,

2001; Moncada y Bodnar, 2012; Goldfarb et al., 2016). Este horizonte de inestabilidad representa un cambio en la distribución metálica con respecto a la profundidad (Moncada et al., 2012). La afinidad existente entre los cambios físicos que afectan la estabilidad de los complejos iónicos disueltos en el fluido y la mineralización metálica, es consistente con estudios experimentales y teóricos acerca de solubilidad y estabilidad de diversos elementos de interés (Stefánsson and Seward 2004).

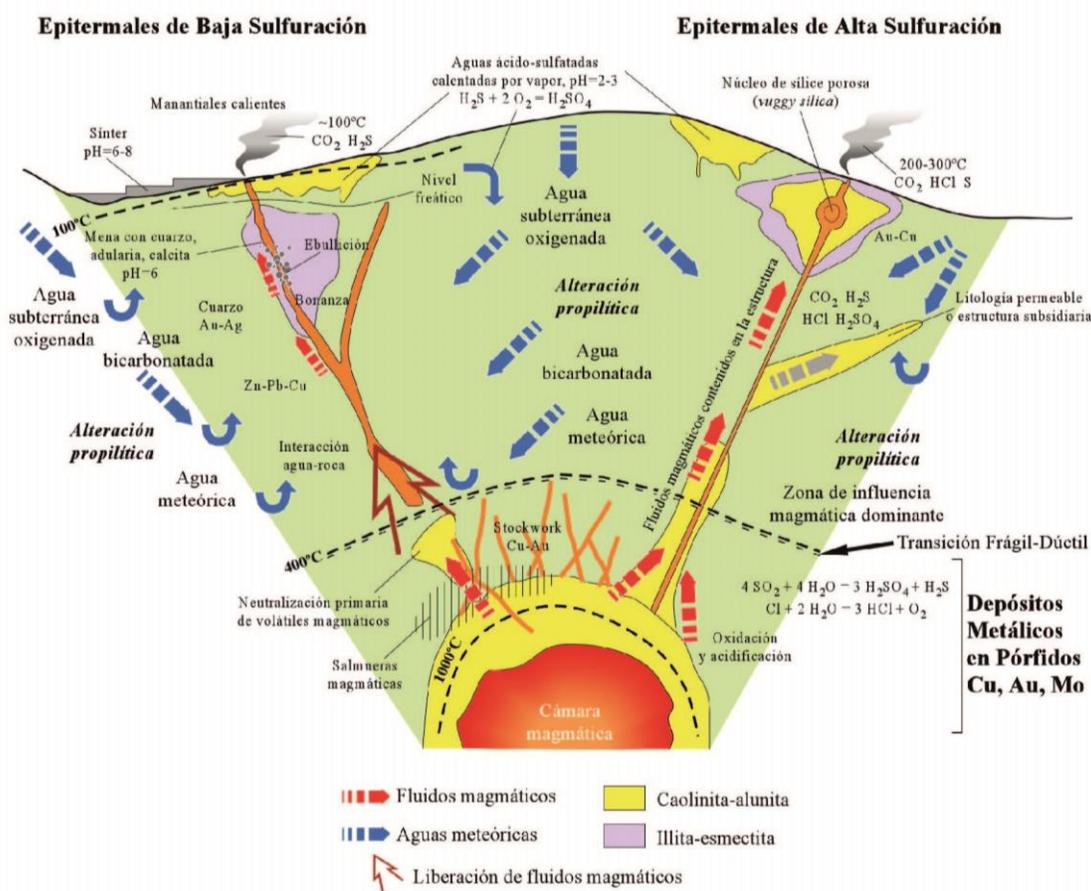


Figura 2: Esquema generalizado (no a escala) mostrando la estructura, procesos, alteración, tipos de fluidos, entre otros parámetros en la formación de depósitos epitermales. Los epitermales de baja sulfuración se forman a partir de fluidos a profundidades <math>< 1.5\text{ km}</math>, Ph neutro – alcalino y en equilibrio con la roca hospedante a profundidades mayores. Los epitermales de alta sulfuración se forman por un ascenso de volátiles en un ambiente epitermal hasta ser absorbidos por aguas meteóricas, el HCl y SO_2 forman una solución altamente ácida que altera la roca desde el conducto del fluido (White y Hedenquist, 1995). (extraído de Comprubí et al., 2003).

Estudios experimentales han mostrado que los metales de mena son transportados en fluidos hidrotermales como complejos iónicos (Wood & Samson, 1998; Kesler, 2005). Muchos metales son cationes, y para estos, los aniones más comunes en estos complejos metálicos son el Cl^- para metales base y HS^- para el Au y otros metales preciosos (Kesler, 2005). Para que estos elementos metálicos precipiten, debe ocurrir una desestabilización del complejo en el cual están siendo transportados en solución.

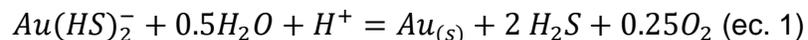
Existen diversos mecanismos para la precipitación metálica, uno de estos es la ebullición, en esta se produce una separación de fases en líquido y vapor, donde el CO₂ y el H₂S son particionados en esta última, causando la deposición metálica desde algunos complejos clorurados y la desestabilización de los complejos bisulfurados (Drumond & Ohmoto, 1985; Kesler, 2005).

Solubilidad metálica

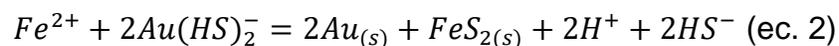
Es importante acotar las condiciones de solubilidad metálica en estos sistemas, ya que es útil para determinar bajo qué condiciones se transportaron y precipitaron ciertos elementos. Las principales propiedades fisicoquímicas del transporte de algunos complejos metálicos sulfurados de Au, Ag, Zn, Se, Te, In y Sb ocurre en fluidos hidrotermales con condiciones cercanas a las encontradas en un epitermal (T° <300°C) a través de diversos estudios experimentales y evidencia en otros depósitos.

El **oro** generalmente se presenta diseminado en cuarzo en forma nativa o asociado a sulfuros como piritita, como es el caso de Chancón (Munzenmayer, 2002). Datos experimentales y teóricos han mostrado que el oro es altamente soluble. Shenberger y Barnes (1989) midieron concentraciones máximas de 7224 mg/Km a 350°C para el Au en solución. Bajo condiciones de pH neutro a levemente alcalino, actividad de sulfuros (a_s) de 0.01 y temperaturas <350°C el complejo dominante es bisulfurado de oro $Au(HS)_2^-$ (Seward, 1973; Belevantsev et al, 1981; Renders y Seward, 1989; Shenberger y Barnes, 1989; Stefánsson y Seward, 2004; Moncada y Bodnar, 2012).

En la Figura 3 un aumento en la fugacidad de oxígeno (f_{O_2}) reduce la solubilidad del complejo sulfurado de oro en varios ordenes de magnitud, siendo esto uno de los mecanismos más eficientes para la precipitación de Au. La ebullición provoca que gases como CH₄ y H₂S escapen con mayor facilidad que CO₂ o SO₂, teniendo como consecuencia un aumento en la f_{O_2} . Además, el escape de CO₂ y H₂S hacen que la solución remanente aumente su pH (neutralización). Esta última relación de precipitación de Au y escape de H₂S como consecuencia de la ebullición, queda representada en la ecuación 1.



El complejo bisulfurado también se asocia a fases específicas de Fe en pirrotita (Po), magnetita (Mt), hematita (Hm) y piritita (Py). Esto explica la relación existente entre la precipitación de oro y formación de piritita juntos. Shenberger y Barnes (1989) y Henley y Brown (1985) cuantifican esta relación de precipitación entre el oro y piritita (Ecuación 2).



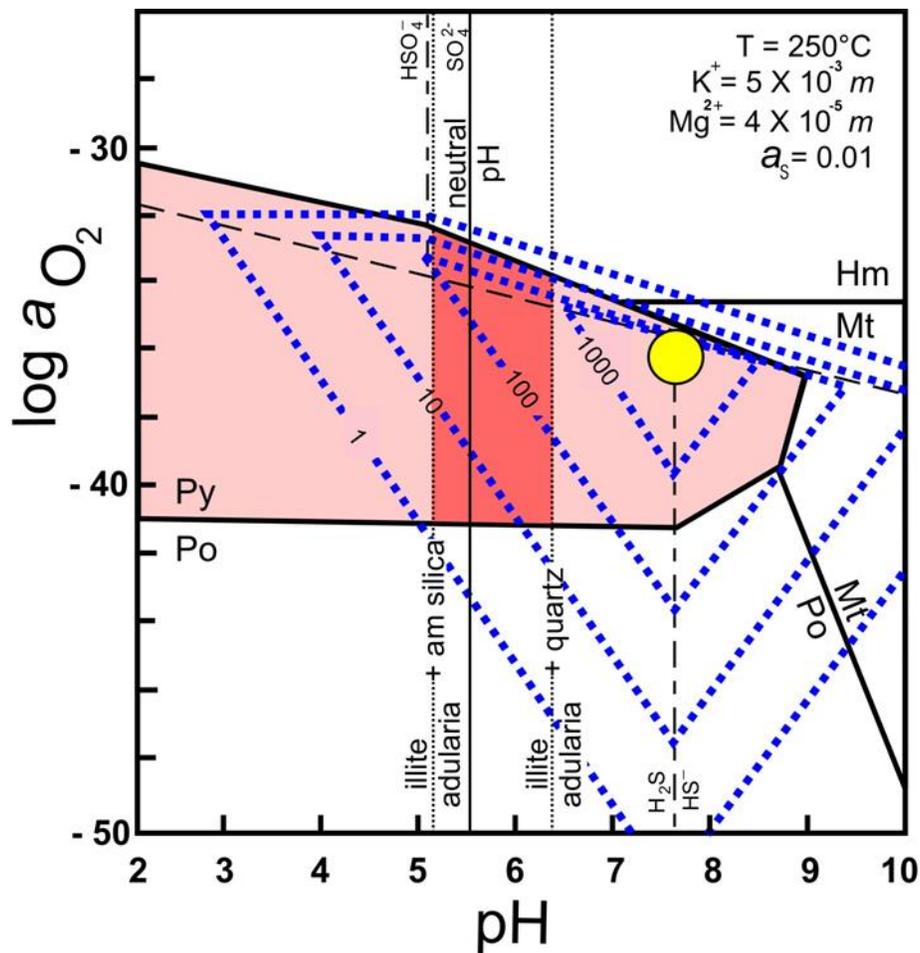


Figura 3: Solubilidad de oro en función del pH y estado de oxidación (f_{O_2}). Calculada a una temperatura de 250°C , actividad de azufre a_s de 0.01, concentración molar de ion potasio (k^+) de 5×10^{-3} y concentración molar de ion magnesio Mg^{2+} de 4×10^{-5} . Las líneas verticales representan el equilibrio de Illita-adularia con sílica amorfa y cuarzo. La máxima solubilidad de oro está representada por el círculo amarillo y la solubilidad en ppb se representa en líneas celestes (modificado de Henley and Brown, 1985; Shenberger and Barnes, 1989).

Estudios experimentales y teóricos en **plata** han mostrado que esta, puede ser transportada tanto como complejo clorurado (AgCl_2^-), como complejo bisulfurado ($\text{Ag}(\text{HS}_2)$). La forma en que este se transporta depende de las condiciones termodinámicas presentes en el medio. Gammons y Barnes (1989) detectaron que la estabilidad relativa del complejo bisulfurado predomina sobre el clorurado (Figura 4), especialmente en condiciones de Ph neutro a alcalino, oxidación relativa baja, actividad de sulfuros (a_s) de 0.01 y $T < 300^{\circ}\text{C}$. De manera análoga al caso del oro, la solubilidad máxima del complejo ($\text{Ag}(\text{HS}_2)^-$) está representada por el círculo amarillo, donde cualquier cambio físico que desestabilice este complejo, como la ebullición, tendrá como consecuencia la precipitación de plata en el sistema (Moncada y Bodnar, 2012).

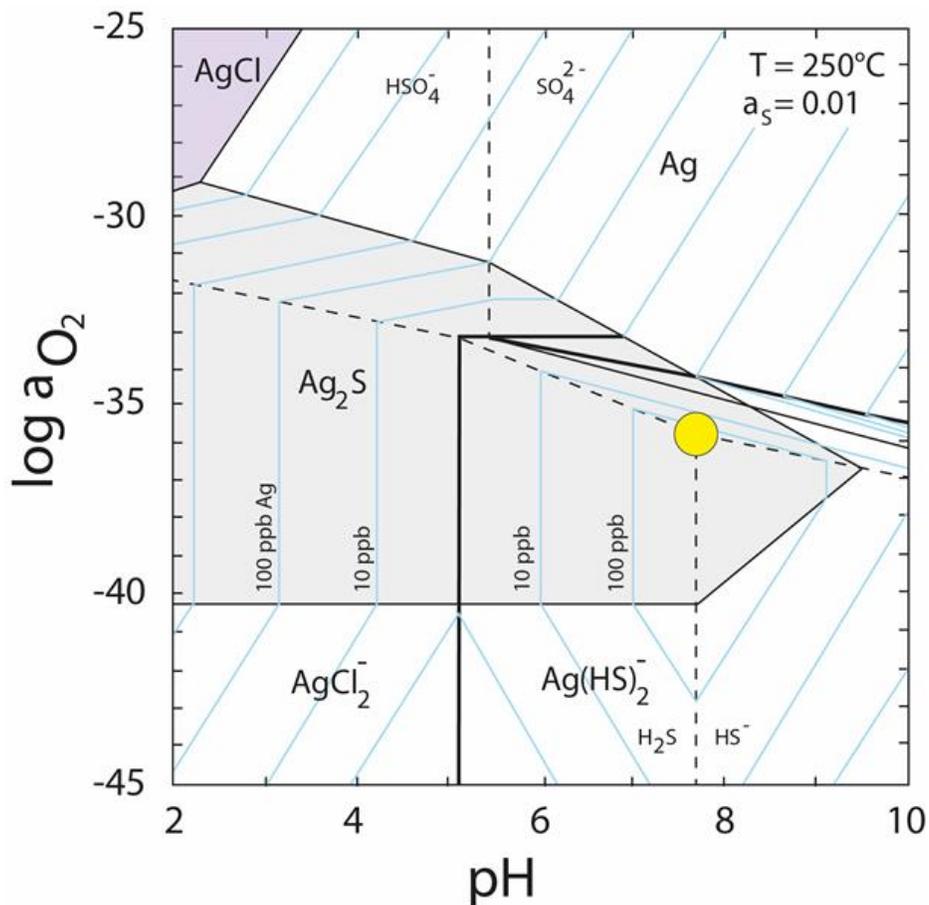


Figura 4: Solubilidad de plata en función del pH y estado de oxidación (f_{O_2}). Calculada a una temperatura de 250°C, actividad de azufre a_s de 0.01, actividad de cloro 0.1. Las áreas de predominio para $AgCl_2^-$ y $Ag(HS)_2^-$ están separadas por la línea vertical oscura en función del pH y estado de oxidación. Las líneas segmentadas representan los campos de predominio de distintas especies de sulfuro. La máxima solubilidad de plata está representada por el círculo amarillo y la solubilidad en ppb se representa en líneas celestes (extraído de Gammons y Barnes, 1989).

La esfalerita (ZnS), es un mineral de mena de **cinc** frecuente en muchos depósitos de tipo epitermal. La ocurrencia de este mineral en ambientes geotermales depende fundamentalmente de la estabilidad y estequiometría de los complejos de cinc sulfurado/hidrosulfurado en el fluido hidrotermal (Tagirov y Seward, 2010). Y en general, todos los complejos sulfurados requieren de la ocurrencia de azufre reducido S⁻² para formar complejos iónicos con metales.

Tagirov y Seward (2010) indican que en soluciones con $t > 100$ °C, dominan los complejos Zn(HS)₂ y Zn(HS)₃⁻, siendo mayormente dominante el complejo Zn(HS)₂ a medida que aumenta la temperatura. A 300° C y a_s de 0.1, predomina el complejo Zn(HS)₂ en un rango de $3 < \text{pH} < 7$ (Figura 5a). La solubilidad de la esfalerita en fluidos hidrotermales incrementa con la temperatura sobre todo rango de pH, sin embargo, el efecto más pronunciado de la solubilidad se observa para soluciones ácidas, donde el

complejo $Zn(HS)_2$ predomina entre en el rango de pH 3 al 5 (Figura 5b), mientras que para pH entre 7 y 10 la solubilidad más alta se da para el complejo $Zn(HS)_3^-$.

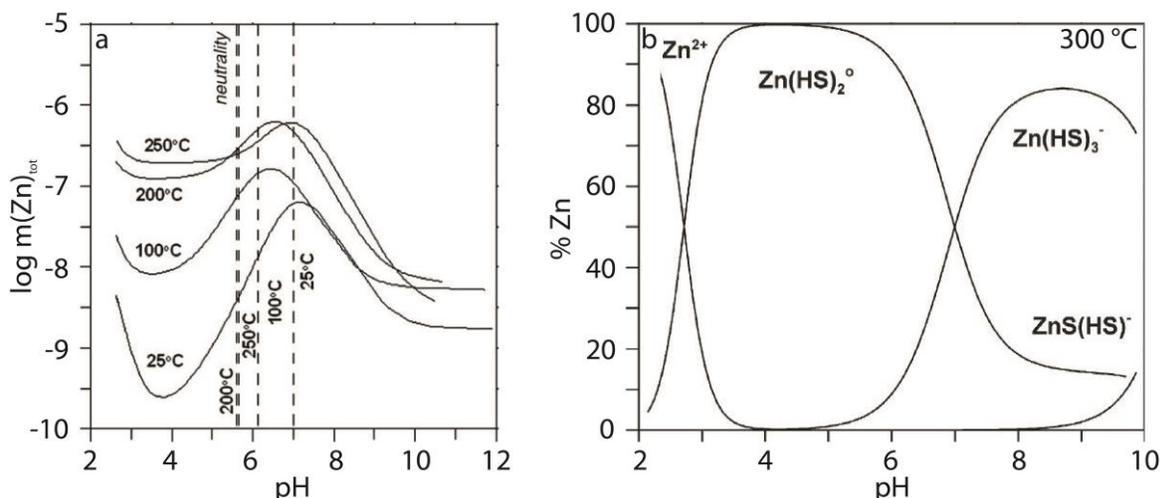


Figura 5: a) Solubilidad de esfalerita en una solución de H_2S ($P=P_{sat}$; $a_s = 0.1$ en función del pH (modificado de Tagirov y Seward (2010). b) Diagrama de predominancia para los complejos Zn-S-HS en función del pH a $P=P_{sat}$ y $a_s = 0.1$ (extraído de Tagirov and Seward, 2010).

En fluidos de origen epitermal, con un contenido de cloruros <0.05 m, los complejos sulfurados/hidrosulfurados de cinc se vuelven importantes, incluso dominantes en la química de transporte y deposición de otras menas (Tagirov y Seward, 2010). En condiciones neutro - alcalinas, la separación de fases y ebullición pueden iniciar una estabilización del complejo $Zn(HS)_2$. Esta estabilización puede dar lugar a una removilización local de Zn, posterior a la precipitación de mena, como una deposición de fluidos hidrotermales fríos y desvolatilizados (Tagirov y Seward, 2010).

Henley (1990) estimó que los fluidos hidrotermales a temperaturas de 250°C y baja salinidad, los metales son transportados preferentemente como complejos sulfurados, mientras que, bajo las mismas condiciones de temperatura, pero a salinidades mayores, la presencia del complejo clorurado en el transporte metálico aumenta considerablemente. La Figura 6 indica que soluciones pobres en Cl^- no pueden transportar o depositar metales base como complejos clorurados dando origen a epitermales ricos en Au, mientras que soluciones con mayor contenido de Cl^- transportan metales base dando origen a epitermales polimetálicos con Zn, Pb, Cu, Ag, Au, dominados por metales base.

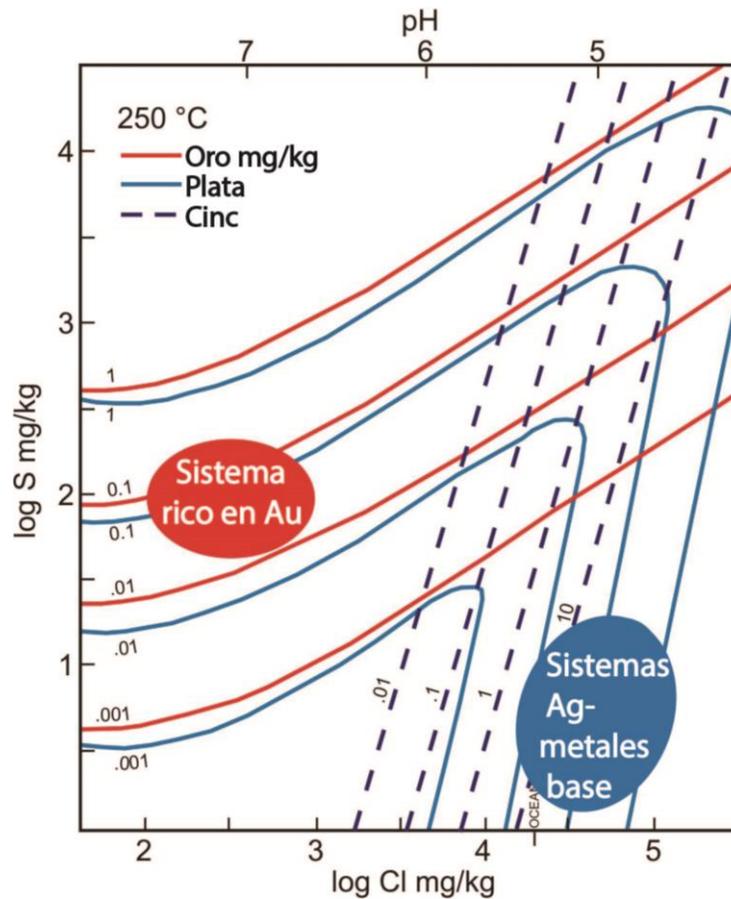
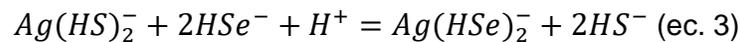


Figura 6: Variación de solubilidad para Au, Ag y Zn en un diagrama log S vs log Cl (Modificado de Henley, 1990).

En depósitos epitermales, el **selenio** se presenta en forma de selenuro, formando diversos minerales con oro y plata (Lindgreen, 1933; White & Hedenquist, 1995; Richards, 1995; Kovalenker, 2004; Akinfiyev & Tagirov, 2006). Datos experimentales y teóricos realizados por Akinfiyev y Tagirov (2006), han mostrado que la estabilidad relativa del complejo bisulfuro de plata $[Ag(HS)_2^-]$ y del complejo hidroselenuro $[Ag(HSe)_2^-]$ son similares en condiciones estándar de presión y temperatura. Este resultado puede predecir que tienen un comportamiento similar a mayores temperaturas. La formación del complejo hidroselenuro queda descrita en la Ecuación 3.



Akinfiyev y Tagirov (2006) indican que incluso la presencia en trazas (10^{-8} mol/kg) de Se en solución, es suficiente para sobresaturar las fases de este elemento, incluso en casos en que el contenido de este es cinco veces menor que el contenido de azufre, generando como consecuencia que la fase sólida Ag_2Se_{cr} (naumannita) se vuelva poco soluble. A su vez, su campo de estabilidad aumenta conforme la temperatura cae. Esta particularidad le confiere al selenio un rol como precipitante a medida que la temperatura disminuye (Figura 7b). El campo de estabilidad del selenio nativo aparece en zonas

ácidas, mientras que en zonas alcalinas la solución se vuelve sobresaturada con neumannita (Figura 7a)

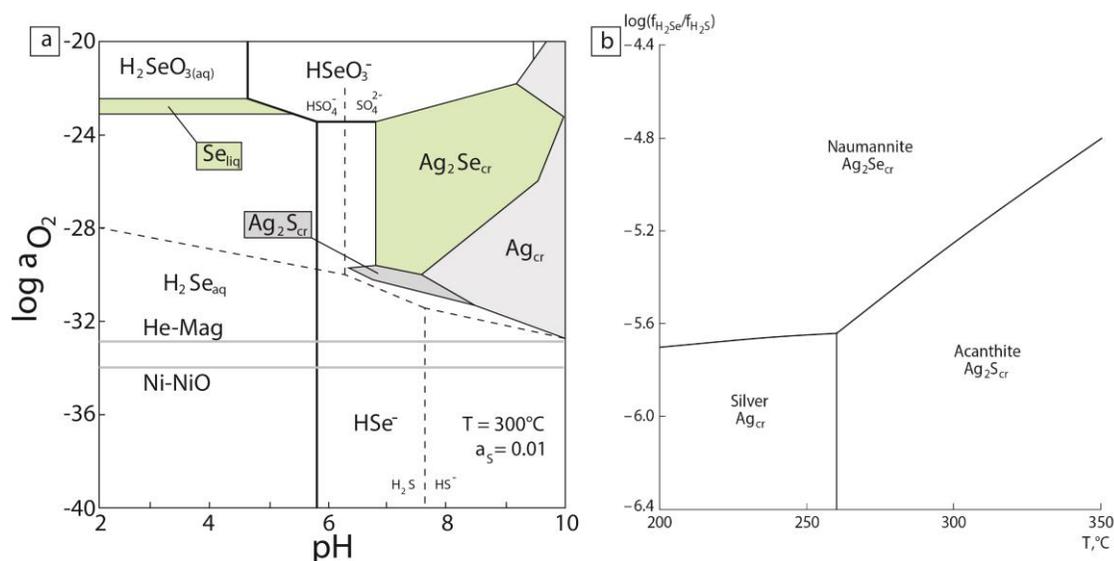


Figura 7: a) Campos de estabilidad con dominancias de especies Ag-Se-S-Na-Cl-O-H a $300^\circ C$, concentración molar de Ag de 10^{-7} , concentración molar de Se de 10^{-8} . Líneas punteadas separa campos con dominancia de especies de S y líneas sólidas separa campos de dominancia de Se. Líneas grises horizontales indican la fugacidad de oxígeno para el buffer de H-M (línea superior) y para el buffer N-NO (línea inferior). Áreas verdes y grises representan las zonas de estabilidad para las fases sólidas de Se-Ag y líquidas de Se nativo (modificado de Akinfiev and Tagirov, 2006). b) Campos de estabilidad para fases sólidas de plata y selenio en función de la temperatura y presión saturada de H_2O (extraído de Akinfiev and Tagirov, 2006).

El **telurio** se presenta en una abundante variedad de minerales en depósitos epitermales, siendo usualmente asociado a oro y plata formando telururos (Goldfarb et al., 2016). En epitermales de baja a intermedia sulfuración asociados a rocas volcánicas calcoalcalinas, suelen presentarse minerales de telurio (Cook y Ciobanu, 2005; Goldfarb et al., 2016). Datos experimentales y teóricos han mostrado que los telururos se depositan a temperaturas entre los 200° y $300^\circ C$ a partir de soluciones hidrotermales diluidas (Cook et al., 2009; Makshev et al, 2007; Goldfarb et al., 2016).

Grundler et al (2013) señala que la asociación Au-Te y altas razones Te:Au en muchas menas hidrotermales indica la capacidad del fluido hidrotermal para transportar cantidades significativas de Te. Los campos de estabilidad para distintas especies de Te (Figura 13b) son dominados por especies oxidadas de Te(IV). En condiciones básicas, medianamente reducido, soluciones ricas en Au ($> 300ppb$; transportado como $Au(HS)_2^-$) pueden transportar sobre 100ppb de Te (Figura 8a,b).

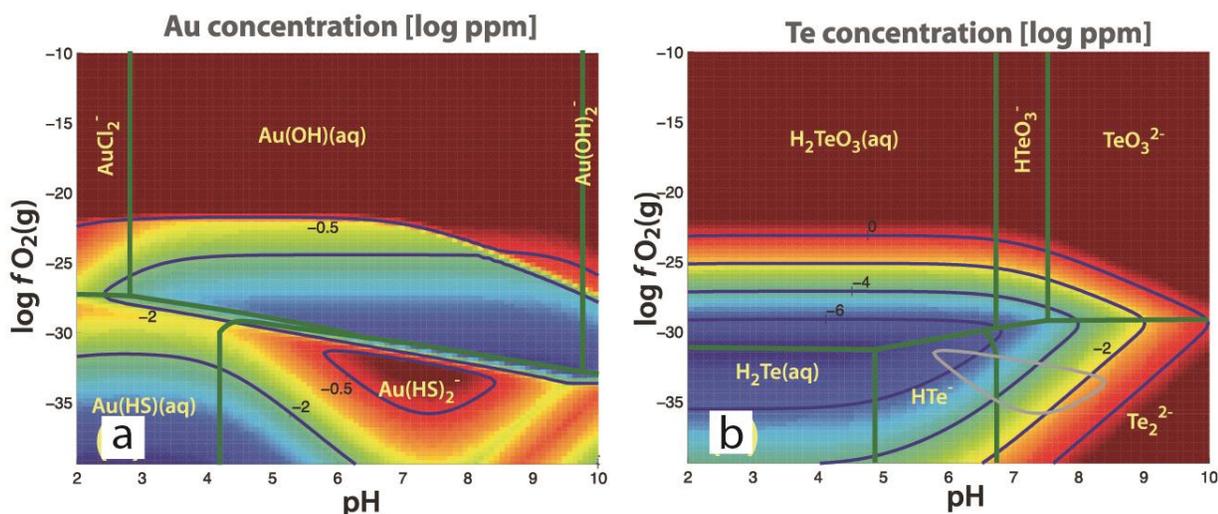
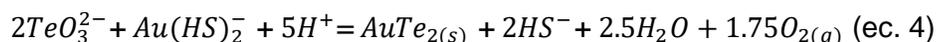


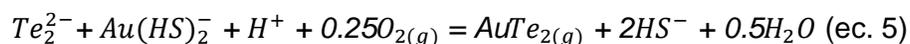
Figura 8: a,b: Especiación y solubilidad del Au y Te en vapor y fluido salino para el sistema Au-Te-H₂O-S-Cl a 300°C a una presión de vapor de 85.8 bar, concentración molar de Cl⁻ de 1, concentración molar de S de 0.1, a_{K^+} entre 1 – 0.1, 1 ppm de Au, 10 ppm de Te. La línea gris (Figura 7b) es 0.320 (10-0.5) ppm de oro. Extraído de Grundler et al (2013).

Grundler et al (2013), plantea la posibilidad que los fluidos ricos en Te representan fluidos magmáticos oxidados (SO₂) por la capacidad del fluido de transportar altos niveles de Te y Au. La reducción de estos fluidos (Ejemplo: mezcla de fluidos o interacción fluido-roca) puede causar la reducción de Te(IV), lo cual conlleva a la precipitación de algunos telururos de oro. Esto último se muestra en la ecuación 4.



Este mecanismo puede ser altamente eficiente debido a la baja solubilidad de los telururos. El Te(IV) se comporta como un oxidante fuerte, promoviendo una mayor interacción fluido – roca.

Por otro lado, bajo las condiciones reductoras y altamente básicas, el Te puede ser transportado en un complejo polyteluro como Te_2^{2-} (Brugger, et al., 2012; Grundler, et al., 2013). En este caso, la precipitación de (Ag)-Au-telururos es la siguiente reacción de oxidación (ec. 5):



El **indio** generalmente se asocia con esfalerita, y en menor medida con calcopirita y otros minerales (Alfantazi A. y Moskalyk R., 2003; Wood y Samson, 2006; Dill et al., 2013; Goldfarb et al., 2016). La extracción de indio ha estado limitada a ser recuperado como subproducto de grandes depósitos ricos en zinc (Goldfarb et al., 2016). Datos registrados de microtermometría realizada en esfalerita en otros depósitos, como el epitermal de Pingüino en el Macizo del Deseado, en la Patagonia Argentina, muestra valores de salinidad moderada (4-9 en peso% NaCl equiv) y temperaturas de homogeneización entre 250° y 315°C (Jovic et al., 2011; Goldfarb et al., 2016). Asimismo, el epitermal Au – Ag de San Roque, en la provincia de Rio Negro, Argentina, muestra que inclusiones contenidas en esfalerita tienen una salinidad moderada (4.5 – 6.5 en peso% NaCl equiv.) y temperaturas de homogeneización entre 210° y 250°C (Dill et al., 2013; Goldfarb et al., 2016).

El ion In^{3+} es el más estable y es capaz de formar complejos clorurados como InCl^{2+} , InCl_2^+ , InCl_3^0 y InCl_4^- a 25°C, aunque estos cuatro complejos son relativamente inestables, el cuarto complejo y (InCl_4^-) es estable en condiciones de altas de cloro (8 M) y temperaturas de alrededor de 350° C (Wood y Samson, 2006). Por otro lado, los bisulfurados forman fuertes complejos con In^{3+} , aunque esto no implica necesariamente que los complejos bisulfurados sean predominantes en el transporte de indio en soluciones hidrotermales (Wood y Samson, 2006). La Figura 9 corresponde a un diagrama que muestra las áreas de predominancia y estabilidad del indio como clorurado, hidróxido e hidroxiclorado en condiciones de 25° C y 1 bar.

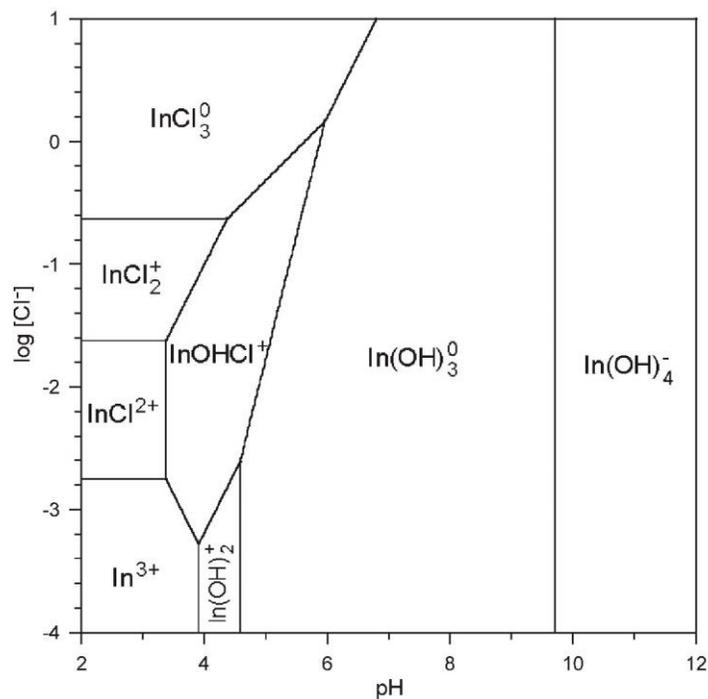
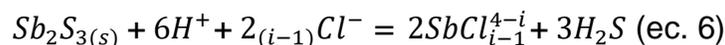


Figura 9: Campos de estabilidad y predominancia para complejos clorurados, hidróxidos e hidroxiclorurados de In(III) a 25°C y 1 bar. Extraído de Wood and Samson (2006).

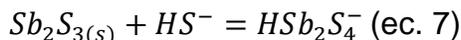
El **antimonio** se presenta en minerales como stibnita, tetraedrita, famatinita y sulfosales de plata. La stibnita es un mineral accesorio en algunos depósitos epitermales de baja y alta sulfuración (Goldfarb et al., 2016). El antimonio substituye principalmente en pirita y otros minerales sulfurados coexistentes (Ewers y Keays, 1977; Baker et al., 2006; Goldfarb et al., 2016).

Datos experimentales y simulaciones computacionales realizadas por Obolensky et al (2007) determinaron que la disolución de stibnita en soluciones cloruradas está descrito por la siguiente ecuación de equilibrio (Ecuación 6).



En este caso, el sistema Sb-Cl-H₂S-H₂O describe de manera satisfactoria el proceso de formación de depósitos hidrotermales de antimonio a temperaturas entre 25 y 250° C (Obolensky et al, 2007).

En estos sistemas, los complejos sulfurados de antimonio juegan un rol menor en las soluciones. Sin embargo, a temperaturas entre 50 y 150°C, y pH entre 5 y 7, los complejos sulfurados de antimonio se vuelven un componente predominante (Ecuación 7)



En la Figura 10 se muestra el comportamiento de la solubilidad del $Sb_2S_3(s)$ en fluidos sulfurados (Figura 10A) y fluidos clorurados (Figura 10B) bajo diferentes condiciones de temperatura y pH.

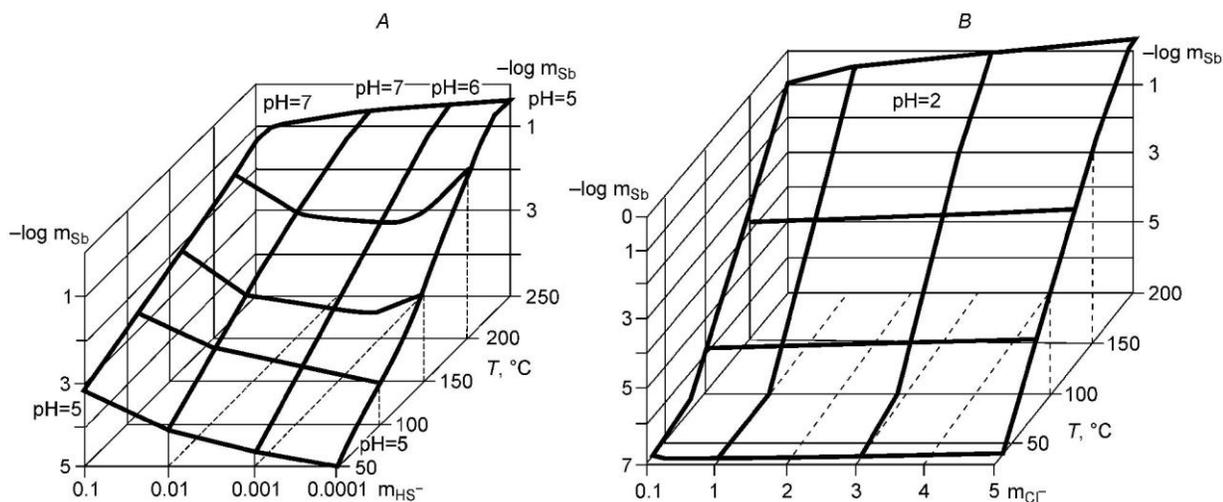


Figura 10: Superficie de solubilidad de $Sb_2S_3(s)$: A. Solución como sulfuro, dependiendo del pH, temperatura y m_{HS^-} ; B. Solución como clorurado (pH = 2), dependiendo de la temperatura y m_{Cl^-} . Extraído de Obolensky et al (2007).

2.3. Texturas microscópicas diagnósticas en cuarzo y calcita

Los yacimientos epitermales típicamente presentan texturas de relleno de espacios abiertos, tales como: estructura de peineta (“diente de perro”), crustificación, cocada, bandeamiento simétrico, oquedades tapizadas por cristales (drusas), texturas coloformes. Estas y otras texturas descritas más adelante en este punto, corresponden a estructuras microscópicas específicas que sirven como parámetro para identificar algunas de las condiciones físicas asociadas con mineralización (Adam, 1920; Bodnar et al., 1985; Sanderand Black, 1988; Dong et al., 1995; Simmons y Christenson, 1994; Henley y Hughes, 2000; Moncada et al., 2012). En la Figura 11, se resumen las principales texturas encontradas en cuarzo y calcita, clasificándose según las condiciones en las que precipitaron (ebullición – no ebullición).

Las texturas correspondientes a ebullición más comunes halladas en estos sistemas epitermales son: cuarzo rompezabizas (Figura 11A), la que se caracteriza por estar formada por agregados de mosaicos microcristalinos a cristalinos de cuarzo y se interpreta como un resultado de recristalización de sílica amorfa (Dong et al., 1995). A su vez, el cuarzo plumoso (Figura 11B) corresponde a una textura de recristalización de sílice desarrollado de agregados fibrosos de calcedonia (Dong et al., 1995; Moncada et al., 2012). Esta textura precipita como consecuencia de una sobresaturación de sílice producto de un rápido enfriamiento y baja en la presión, seguido de una precipitación de sílica (Henley y Hugues, 2000; Moncada et al., 2012). En cuanto al cuarzo coloforme (Figura 11E), corresponde a sílice con un hábito botroidal formada en bandas continuas, esta textura se genera cuando ocurre un violento decrecimiento de la presión y la temperatura, como en la formación de fracturas (Henley y Hugues, 2000). Finalmente, la calcita hojosa (Figura 11F) corresponde a una textura en calcita que es consecuencia de un rápido crecimiento de calcita asociado a una pérdida de CO₂ en la fase gaseosa durante la ebullición (Simmons y Christenson, 1994; Moncada et al., 2012). Por otro lado, algunas de las texturas más comunes en ambientes sin ebullición son la calcita rómbica (Figura 11N) y el cuarzo zonal (Figura 11P).

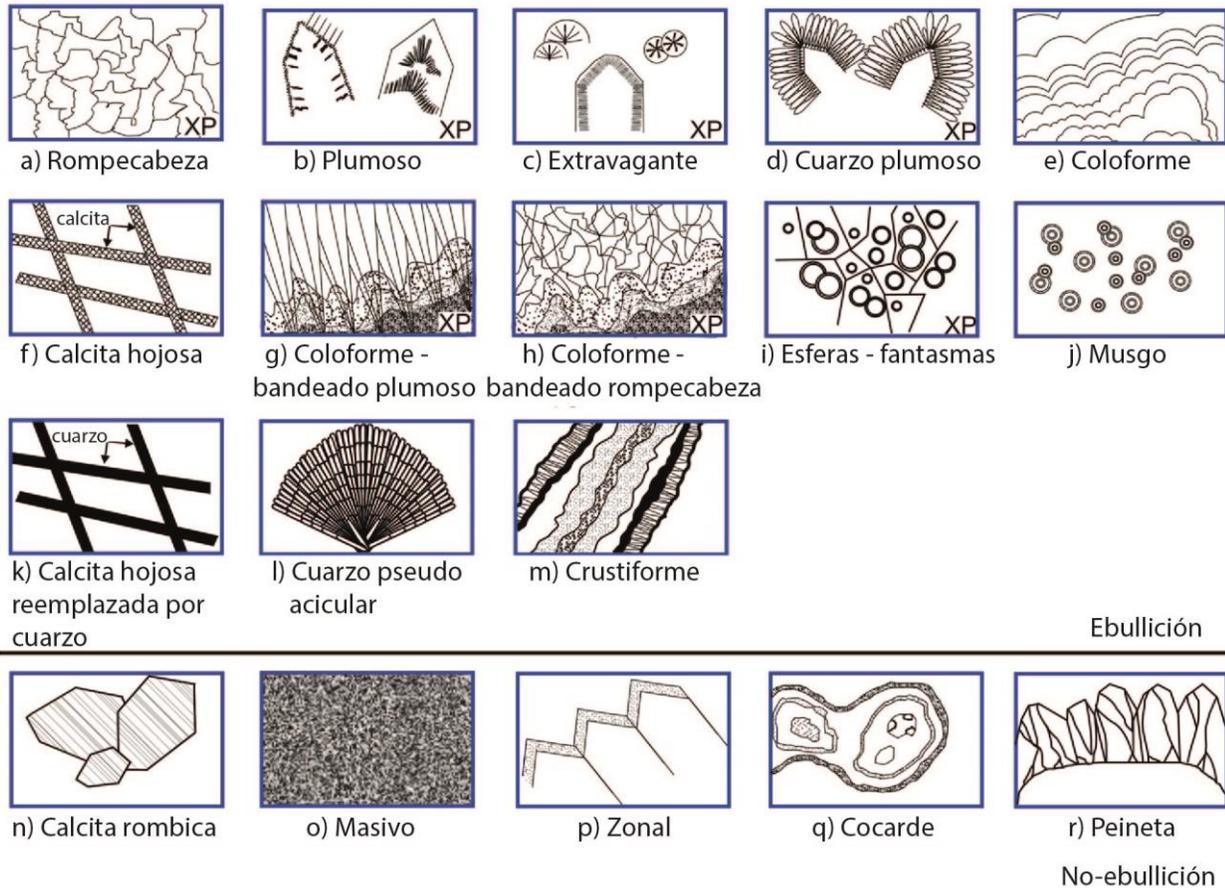


Figura 11: Resumen de texturas halladas en cuarzo y calcita observadas en ambientes de tipo epidermal. Estas, pueden ser usadas como guía para detectar la ocurrencia de ebullición. Modificado de Moncada et al, 2012.

2.4. Inclusiones Fluidas

La filosofía conduce a un estudio de inclusiones fluidas

Un estudio que utilice las inclusiones como herramienta principal, requiere mucha metodología científica. Es necesario un acercamiento filosófico al momento de decidir si utilizar esta herramienta, ya que, en variadas ocasiones, la interrogante que se desea responder puede que no esté presente ni en las inclusiones ni en la roca que las contiene.

Para estudiarlas y obtener información válida referente a condiciones originales de atrapamiento, se ha definido que se requieren establecer tres hipótesis fundamentales "Reglas de Roedder" antes de emprender el estudio (Roedder, 1984):

Primero, se indica que la inclusión atrapa una fase homogénea. Luego, se asume que nada es añadido o removido de la inclusión posterior a su atrapamiento. Por último,

se postula que el volumen de la inclusión permanece constante después del atrapamiento, por lo que representa un sistema isócoro.

Un buen uso de las inclusiones fluidas se realiza siguiendo paciente y meticulosamente un procedimiento lógico de 6 pasos (Goldstein & Reynolds, 1994). Estos se detallan a continuación.

El primer paso en todo estudio que use esta herramienta, es la existencia de una interrogante, en el presente estudio, la interrogante que se responde es bajo qué condiciones *PTX* se encontraba el fluido mineralizador de la veta Leona. Cualquier persona que se encuentre en la posición de recolectar información de inclusiones fluidas, debe determinar por qué el estudio es realizado, prestando especial atención a cada aspecto específico de la pregunta realizada. Este primer paso de responder preguntas específicas es fundamental en el método científico. Se debe considerar abandonar esta herramienta si la información que se busca no está presente en la roca (Goldstein & Reynolds, 1994).

El siguiente paso consiste en realizar una selección de muestras apropiadas que demarquen una zona de estudio adecuada que permita responder las preguntas formuladas. Aquí es importante tener conocimiento del contexto geológico presente, pues sin un marco de interpretación, muchos de los datos obtenidos de inclusiones fluidas pueden ser inapropiados (Goldstein & Reynolds, 1994).

El tercer paso en el desarrollo de este tipo de estudios consiste en determinar el contexto paragenético del mineral de interés en el cual se encuentren las inclusiones (Goldstein & Reynolds, 1994).

El cuarto paso consiste en caracterizar el fluido contenido en las inclusiones. En esta etapa, el "inclusionista" debe determinar cuidadosamente el origen de las inclusiones fluidas y establecer, cómo se relacionan con el contexto paragenético. El investigador debe registrar las inclusiones que tengan las mismas proporciones de líquido y vapor, identificando las zonas de fracturas y micro-fracturas, y en qué contexto afectan. La información recopilada puede ser considerada válida al tomar en cuenta las reglas de Roedder: 1. Las inclusiones atraparon una fase homogénea, 2. el volumen de las inclusiones no ha cambiado desde su atrapamiento (sistema isócoro) y 3. la composición de la inclusión no ha sido alterada (Roedder, 1984). Finalmente, la determinación de la composición puede realizarse utilizando técnicas no destructivas (Goldstein & Reynolds, 1994).

El siguiente paso, una vez que se han identificado qué inclusiones son de utilidad, es realizar la microtermometría. Con diversas mediciones, se puede determinar la temperatura de homogeneización y salinidad de estas. Se debe tener la precaución de medir y comparar las inclusiones que estén dentro de un mismo Arreglo de Inclusiones Fluidas, por lo que, un buen inclusionista no puede prestar atención a sólo una inclusión, sino a un grupo consistente (Goldstein & Reynolds, 1994).

Finalmente, si eventualmente se requiere, se pueden aplicar otras herramientas analíticas más específicas que permitan evaluar de mejor manera la composición de las inclusiones fluidas de manera individual o grupalmente (Goldstein & Reynolds, 1994).

Caracterización de inclusiones

Las inclusiones fluidas pueden ser atrapadas en diversos minerales formados en ambientes epitermales, tales como el cuarzo, calcita, esfalerita y fluorita. En general, estas son útiles para obtener datos termométricos, siendo especialmente provechosas aquellas localizadas en cuarzo, ya que provee mejores datos de Arreglos de Inclusiones Fluidas (FIA's) interpretables (Bodnar et al., 1985), debido a sus características de estabilidad y resistencia. Si se está trabajando en otros materiales, se debe poner especial atención a la existencia de recristalización, ya que esto puede influir en la preservación de las inclusiones estudiadas.

Las inclusiones fluidas se clasifican principalmente según su génesis. Para esto, existen parámetros texturales que permiten determinar la temporalidad de las inclusiones a través de petrografía. Según Roedder (1984) estas se pueden clasificar como inclusiones primarias o secundarias, considerando en todo momento las fases presentes a interior de estas.

Las **Inclusiones primarias** se caracterizan por la distribución paralela de las inclusiones al crecimiento mineral (Figura 12P). Esta zonación puede ser identificada ya sea al observar las caras del cristal, observar variaciones composicionales en el cristal o identificar cambios de coloración (Roedder, 1984; Goldstein & Reynolds, 1994).

Las **Inclusiones secundarias** se forman de manera posterior a la formación del cristal. Suelen encontrarse en grupos muy numerosos y dispuestos planarmente asociados a microfisuras que cortan bordes de cristales (Roedder, 1984; Goldstein & Reynolds, 1994). Pueden encontrarse numerosos arreglos de este tipo de inclusiones superpuestas entre ellas (Figura 12S).

La clasificación de inclusiones en cuanto a las fases presentes, se realiza a temperatura ambiente. Las inclusiones fluidas pueden ser 1) ricas en líquido, siendo el líquido la fase predominante ante el vapor, 2) ricas en líquido, coexistiendo con inclusiones ricas en vapor (evidencia de ebullición) y 3) ricas en vapor (evidencia de transformación en vapor). El resumen gráfico de esta clasificación se muestra en la Figura 13.

Una guía útil para verificar que se están clasificando correctamente inclusiones primarias, es que, en zonas o planos de crecimiento con razones consistente de líquido y vapor (Bodnar et al., 1985).

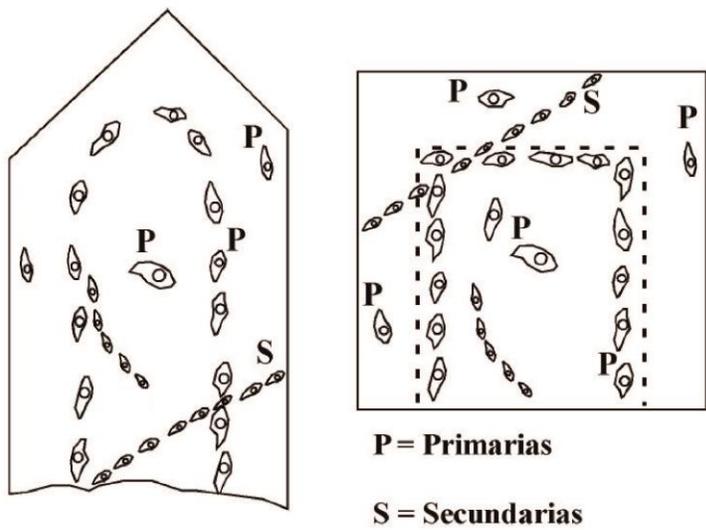


Figura 12: Distribución de inclusiones: (P) primarias siguiendo zonas concéntricas, paralelas a las caras de crecimiento; (S) secundarias, cruzan los cristales en cualquier dirección.

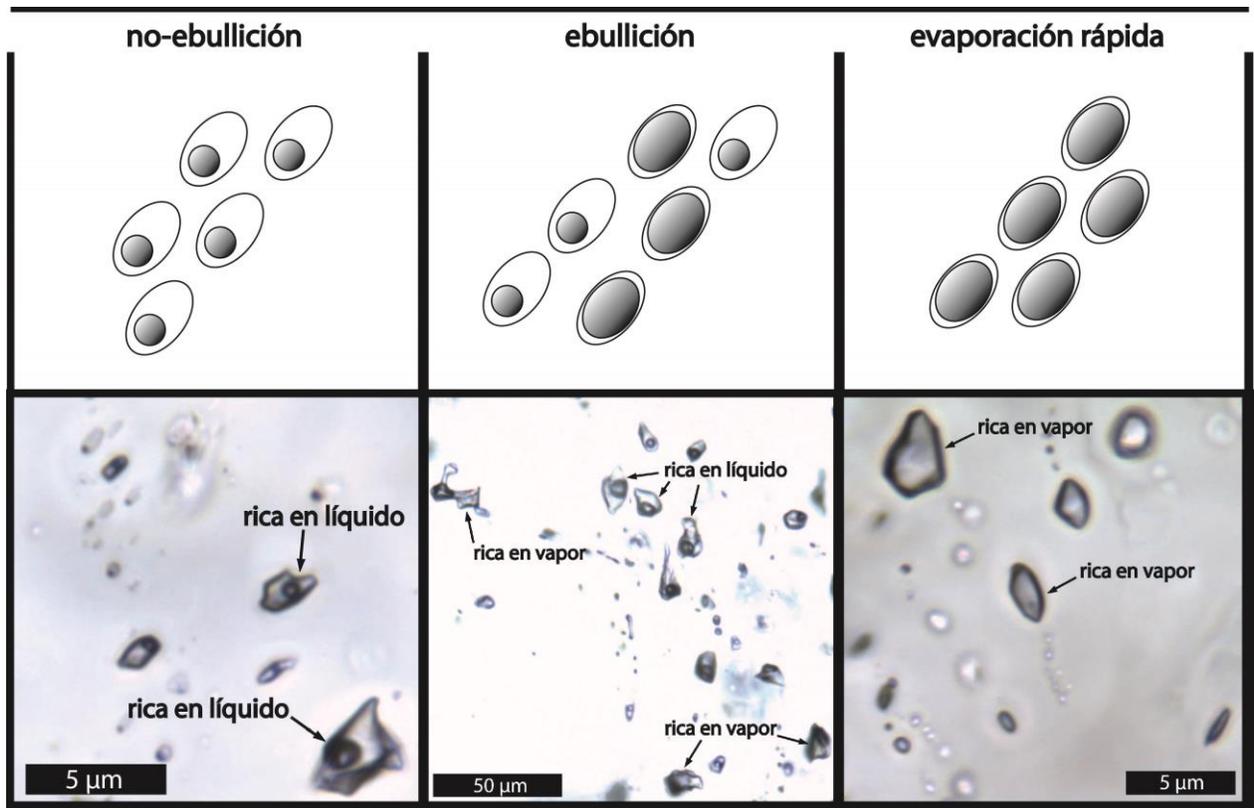


Figura 13: Tipos de arreglos de inclusiones fluidas dependiendo si estas fueron atrapadas en condiciones de no ebullición, ebullición o evaporación rápida.

Una característica común reportada en ambientes epidermales es la ocurrencia de Arreglos de Inclusiones Fluidas atrapados en minerales que precipitaron a partir de fluidos en ebullición. Esta evidencia representa que existieron características favorables para la precipitación metálica (ejemplo: metales preciosos) en sistemas epidermales (Buchanan, 1979; Roedder, 1984; Bodnar et al., 1985; Brown, 1986; Simmons y Christenson, 1994; Andre-Mayer et al., 2002; Etoh et al., 2002; Moncada et al., 2012).

La ebullición puede ser consecuencia de un fracturamiento hidráulico, teniendo como consecuencia una caída abrupta en la presión, provocando ebullición o transformación en vapor. Cuando esto ocurre la temperatura decrece debido a la gran pérdida de calor producto de la vaporización del agua. Como resultado, la sílice que originalmente estaba insaturada, logra sobresaturarse, precipitando como sílice amorfa en textura coloforme (Figura 11E). Con el tiempo, esta sílica amorfa puede recristalizar produciendo texturas como la rompecabeza (Figura 11A) (Moncada y Bodnar, 2012; Moncada et al., 2012).

La coexistencia de inclusiones ricas en líquido y vapor en Arreglos de Inclusiones Fluidas (FIA's), es una de las evidencias que avalan el atrapamiento de un fluido en condiciones de evaporación (*boiling*), mientras que la existencia sólo de inclusiones ricas en vapor, es evidencia del atrapamiento de un fluido en condiciones de transformación rápida en vapor (*flashing*). Estas son las evidencias cruciales para establecer la existencia de condiciones de ebullición en un epidermal. (Bodnar et al., 1985).

2.5. Estudios previos

En el distrito de Chancón se han realizado diversos estudios geológicos con el propósito de caracterizar y acotar áreas de exploración y explotación. De estos, los más representativos fueron hechos entre 1982 y 2005.

Sernageomin y JICA/MMAJ (1982), realizan un estudio detallado a escala 1:10000 del distrito minero de Chancón, del cual concluyen que existen dos sistemas principales de vetas, con un manto mayor a 70° y potencias superiores a 1 m. Las conclusiones del trabajo apuntan a la existencia de cierta relación entre la cantidad de afloramientos de intrusivos dacíticos y mineralización. Adicionalmente, los autores identifican que, en profundidad, la ley de cobre aumenta en tanto que la de oro, disminuye.

Una segunda investigación de estas instituciones (Sernageomin y JICA/MMAJ, 1984) sobre Chancón, complementan las indagaciones anteriores hechas sobre el distrito a través de la determinación de la relación entre las estructuras y la mineralización presente. En este estudio se detecta que existe una zonación vertical de tipo polimetálica, donde el oro sería un componente importante en niveles someros y el cobre en niveles profundos. Además, realiza estudios de microtermometría en inclusiones fluidas en diferentes vetas. Detectando temperaturas entre 380 y 161 °C en la veta El Inglés, entre 305 y 145 °C en la veta Campana, entre 380 y 146 °C en la veta La Julia,

entre 316 y 137 °C en la veta Leona, entre 295 y 128 °C en la veta Anita y de 305°C en la veta N. Fortuna. El detalle de estos datos se muestra en el Anexo A.

Por otra parte, Díaz (1986), caracteriza geológicamente el área correspondiente a la mina la Leona en el distrito minero de Chancón. Determina que la mineralización hipógena es de tipo polimetálica, con minerales de cuarzo, calcita, pirita, esfalerita, arsenopirita y calcopirita, con menor galena y trazas de bornita y magnetita. En base a datos termométricos, determinó una profundidad de emplazamiento de mineralización entre 750 y 900 m bajo la paleosuperficie, postulando una relación genética con el emplazamiento de intrusivos subvolcánicos dacíticos de edad post miocena. Además, clasifica al yacimiento como epitermal.

En la misma línea de Díaz (1986), Munzenmayer (2002) mapea a escala 1:30000 del distrito de Chancón (Figura 14), en el cual muestra las vetas más importantes, junto a las labores mineras activas en ese entonces. Postula que la mineralización del distrito está asociada tanto a emplazamientos de cámaras magmáticas de edad Miocena en la Fm. Lo Valle, indicando que este evento se asocia a la depositación de la Fm. Farellones, como a un desarrollo posterior de fallas y plegamientos, evento que asocia al desarrollo del sinclinal del Cordón los Peumos. Las conclusiones de este trabajo apuntan a que existieron dos eventos mineralizadores importantes en el distrito y clasifica a este como un epitermal con presencia de metales base, la cual se aloja en vetas.

Los resultados de Sernageomin y JICA/MMAJ (1984) son confirmados por Portigliati (2005) a través del desarrollo de un estudio minero y geoquímico del distrito de Chancón. En este estudio concluye que en su mayoría la minería de Chancón se ha desarrollado principalmente en zonas de oxidación y enriquecimiento secundario donde las de Au son mayores, con valores promedio entre 3 y 6 ppm, llegando a 10 ppm en casos excepcionales. Además, reconoce que cerca de 80 depósitos conocidos en el área son vetas hospedadas en rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Lo Valle. Estas vetas albergan mineralización polimetálica de Cu, Au, Ag, Pb y Zn, siendo la ganga principal el cuarzo y en segunda medida, la calcita. Del análisis geoquímico, concluye que existen dos tendencias. La primera, es una disminución de Au, Pb, Zn y un aumento en las les de Cu en profundidad. La segunda, corresponde a una zonación horizontal de la mineralización de Au, en la cual se evidencia una aureola de alta ley entorno a un cuerpo volcánico silíceo de 100 m de espesor. Las vetas provenientes del sur, prácticamente no penetran este cuerpo volcánico, mientras que, al norte, las vetas se arquean en su rumbo a medida que las vetas se aproximan a este cuerpo volcánico. En base a esto, se dedujo que el cuerpo volcánico habría bloqueado el ascenso de los fluidos mineralizadores ricos en Au.

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. Geología Regional

El Distrito minero de Chancón se encuentra ubicado en el borde oriental de la cordillera de la costa de Chile Central. La evolución geológica de este distrito, puede dividirse en tres periodos paleogeográficos o etapas de tipo regional. Los dos primeros se relacionan con el depósito de secuencias estratigráficas volcano-sedimentarias e intrusivas mesozoicas (Formación Lo Valle), mientras que el último se asocia al emplazamiento de intrusivos miocénicos. Estos últimos corresponden a la secuencia volcánica asignada a la Formación (Fm) Farellones (Munzenmayer, 2002).

En una primera etapa, desarrollada entre el Kimmeridgiano y el Tithoniano – Albiano, se desarrolla un margen de tipo de tipo extensional, con una subducción de tipo roll back y el desarrollo de cuencas de antearco (ejemplo: Cuenca de antearco de Lo Prado) (Charrier et al., 2007). En este contexto tectónico se depositan la Fm. Lo Prado y la Fm. Veta Negra, donde esta última sobreyace de manera concordante a la primera (Thomas, 1958). Esta etapa finaliza con un episodio compresivo que generó una inversión de cuencas en la cual los depósitos fueron exhumados y plegados. Este episodio de compresión se asocia al inicio de la Fase Peruana (Vicente et al., 1973; Reutter, 2001; Charrier et al., 2007).

En la segunda etapa desarrollada entre el Cretácico Inferior tardío al Cretácico Superior ocurre una reducción del ángulo de subducción en América del Sur (subducción tipo chilena), teniendo como consecuencia la migración del arco magmático hacia el este (Charrier et al., 2007). Los granitoides de este periodo constituyen el cinturón plutónico mesozoico de Chile central, cuyo espectro litológico incluye desde gabros a granitos, definiendo una serie típica calco-alcalina alta en potasio (Charrier et al., 2007).

Los depósitos cretácicos ubicados en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa de Chile Central, están representados por la Fm. Lo Valle (Thomas 1958; Godoy 1982; Bravo 2001; Charrier et al., 2007) que sobreyace con discordancia angular la Fm. Veta Negra (Nasi & Thiele, 1982). Según Gana y Wall (1997), la Fm. Lo Valle se habría depositado durante una fase tardía de un periodo extensional y corresponde a la formación más antigua que aflora en el distrito de Chancón (Figura 14).

Numerosos mesotermales y epitermales de Au-Cu están asociados a rocas ígneas del Cretácico tardío. A lo largo de la cordillera de la Costa de Chile norte-central se encuentran los distritos Inca de Oro, El Espino, Farellón Sanchez, El Bronce de Petorca, Alhué y Chancón (Maksaev et al., 2007).

La tercera etapa se extiende del Paleógeno tardío, siendo en su mayor parte en su mayor parte es de tipo compresivo, teniendo como consecuencia el alzamiento de los Andes y el corrimiento del arco volcánico a su posición actual (Charrier et al., 2007), con

la particularidad que desde los 26 Ma, la convergencia de placas se tornó más oblicua, causando importantes variaciones en el régimen tectónico. Reflejo de esto, es el desarrollo de fallas de tipo compresivas y extensivas (strike – slip) en el antearco (Hartley et al. 2000; Charrier et al., 2007). Las rocas pertenecientes a este periodo asociadas a la Fm. Farellones, tienen una escasa distribución en el distrito, sobreyaciendo con discordancia angular a la Fm Lo Valle (Sernageomin y JICA/MMAJ., 1982). Munzenmayer (2002), identifica intrusivos subvolcánicos dacíticos en el distrito de Chancón, los que corresponderían a la deposición de la secuencia volcánica asignada a la Fm. Farellones.

3.2. Estratigrafía distrital

Formación Lo Valle (Cenomaniano – Turoniano)

Formación presente en prácticamente la totalidad del distrito (Figura 14). Se encuentra constituida principalmente por una alternancia de lavas y piroclastos andesíticos con algunas intercalaciones de piroclastos dacíticos (Thomas, 1958). Esta formación infrayace con leve discordancia angular a la Fm. Farellones. Edades K-Ar indican edades entre 78 y 65 Ma (Drake, 1976).

Formación Farellones (Mioceno – Plioceno)

Formación compuesta principalmente por volcanitas dacíticas de color café a gris claro, lavas y tobas arenosas a brechosas (Klohn, 1960). Las edades de esta formación son variables y dependen de la ubicación. Frente a Santiago, se conoce una edad U-Pb Shrimp de 22.5 ± 0.2 Ma para su base (Fock, 2005; Godoy et al., 2009). Mientras que otros sectores se obtuvo una edad U-Pb en circón de 9.11 ± 0.36 Ma (Godoy et al., 2009).

3.3. Intrusivos

Complejo Plutónico Alhué Ksca

Unidad plutónica que cubre una superficie de 120 km² y que se encuentra formada por intrusivos granitoides holocristalinos leucocráticos y cuerpos menores de dioritas y andesitas porfíricas hipabisales negras (Godoy et al., 2009). Según Nasi (1981), este intrusivo corta a toda la secuencia estratigráfica cretácica, desde la Fm. Lo Prado, hasta la Fm. Lo Valle, presentando un metamorfismo de bajo grado en las cercanías del intrusivo. Dioritas cuarcíferas entregaron una edad ⁴⁰Ar/³⁹Ar en anfíbola de 89.5 ± 0.8 Ma (Godoy et al., 2009), mientras que en roca se obtiene una edad K-Ar de 92 Ma. (Wall et al., 1996; Godoy et al., 2009), por otro lado, una tercera datación en plagioclasa indicó una edad K-Ar de 95 ± 4 Ma.

Otros Intrusivos

En el distrito se identifican cuerpos intrusivos menores de composición dacítica, diorítica, riolítica y andesítica, los cuales intruyen a la Fm. Lo Valle y Farellones (Díaz, 1986; Munzenmayer, 2002). Estos cuerpos corresponden a una fase intrusiva contemporánea a la Fm. Farellones y pertenece al Grupo Volcánico Oligo-Miocénico (26.3 y 19.3 Ma) del Valle Central (Drake et al., 1976; Vergara y Drake., 1979; Díaz., 1986).

3.4. Estructuras y lineamientos

Las principales fallas identificadas en el distrito tienen direcciones principales N-S con una extensión mayor a 6 km, NW-SE y EW con una extensión de hasta 2 km. Siendo dominante las fallas con dirección N-S (Figura 15). La mayoría de estas son observadas en el distrito cortando vetas, interrumpiéndolas o desplazándolas. Por lo tanto, en gran parte estas son consideradas post-mineralización (Sernageomin y JICA/MMAJ., 1982).

3.5. Mineralización

Las menas más relevantes identificadas en el distrito, corresponden principalmente a calcopirita, pirita, arsenopirita, minerales oxidados de cobre, galena, blenda, minerales de plata y minerales de oro. Este último, está asociado con minerales de cobre y se presenta diseminado en cuarzo. Los principales minerales de ganga son el cuarzo, calcita y óxidos de hierro (Sernageomin & JICA/MMAJ, 1982).

Sernageomin y JICA/MMAJ (1982) identificaron la existencia de una zonación de tipo horizontal en la mineralización existente, la que se dispone en franjas elongadas en dirección NW-SE, comenzando en el extremo NE del distrito con una zona rica en cobre. Esta estructura se encuentra al SW y se plantea un aumento en la concentración de Au – Ag y disminuyendo la de Cu. Esta zonación sería consecuencia del avance de la erosión respecto de la deposición original de la mineralización.

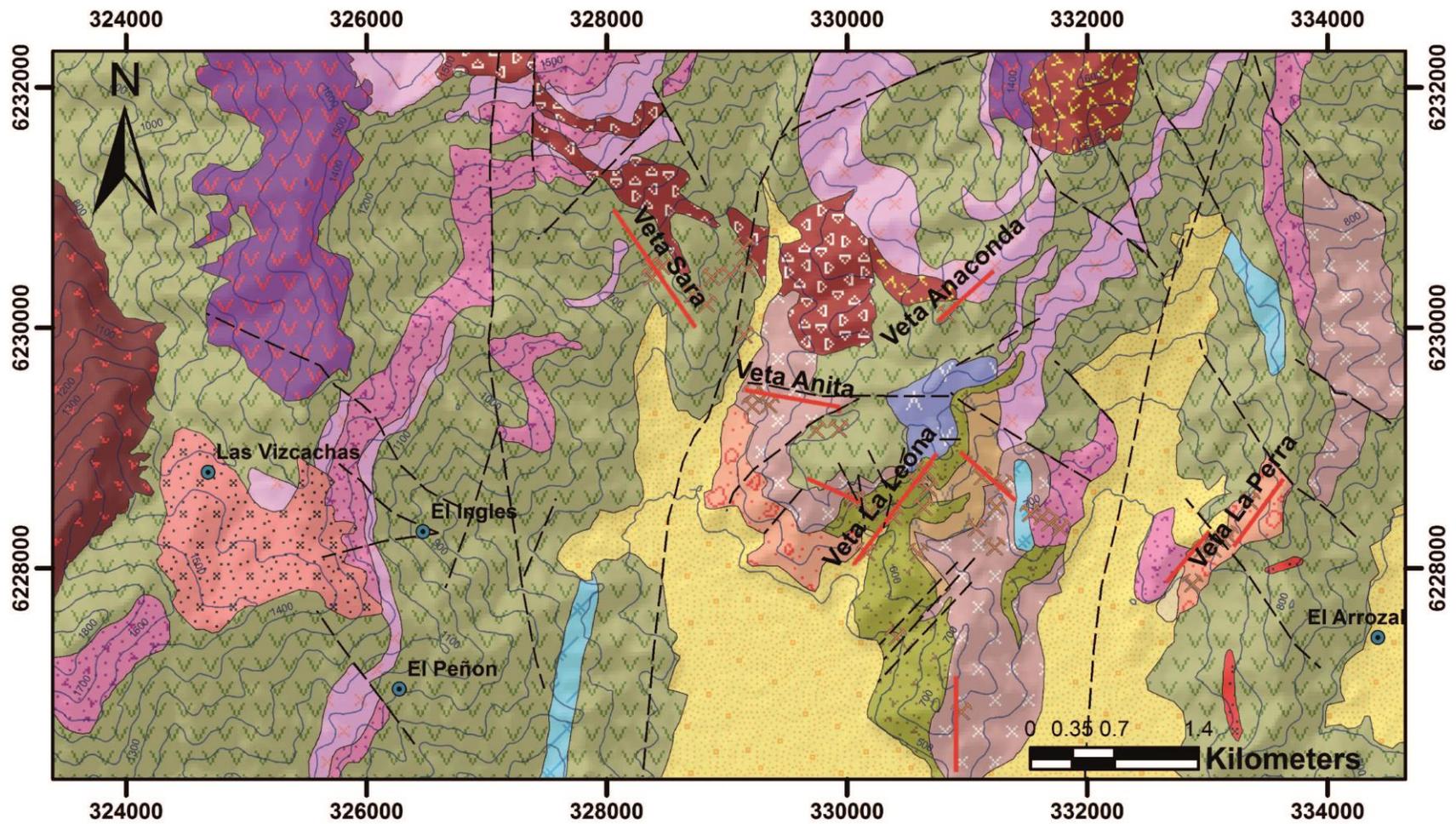


Figura 14: Mapa geológico del distrito de Chancón, escala 1:30000. Modificado de Munzenmayer (2002).

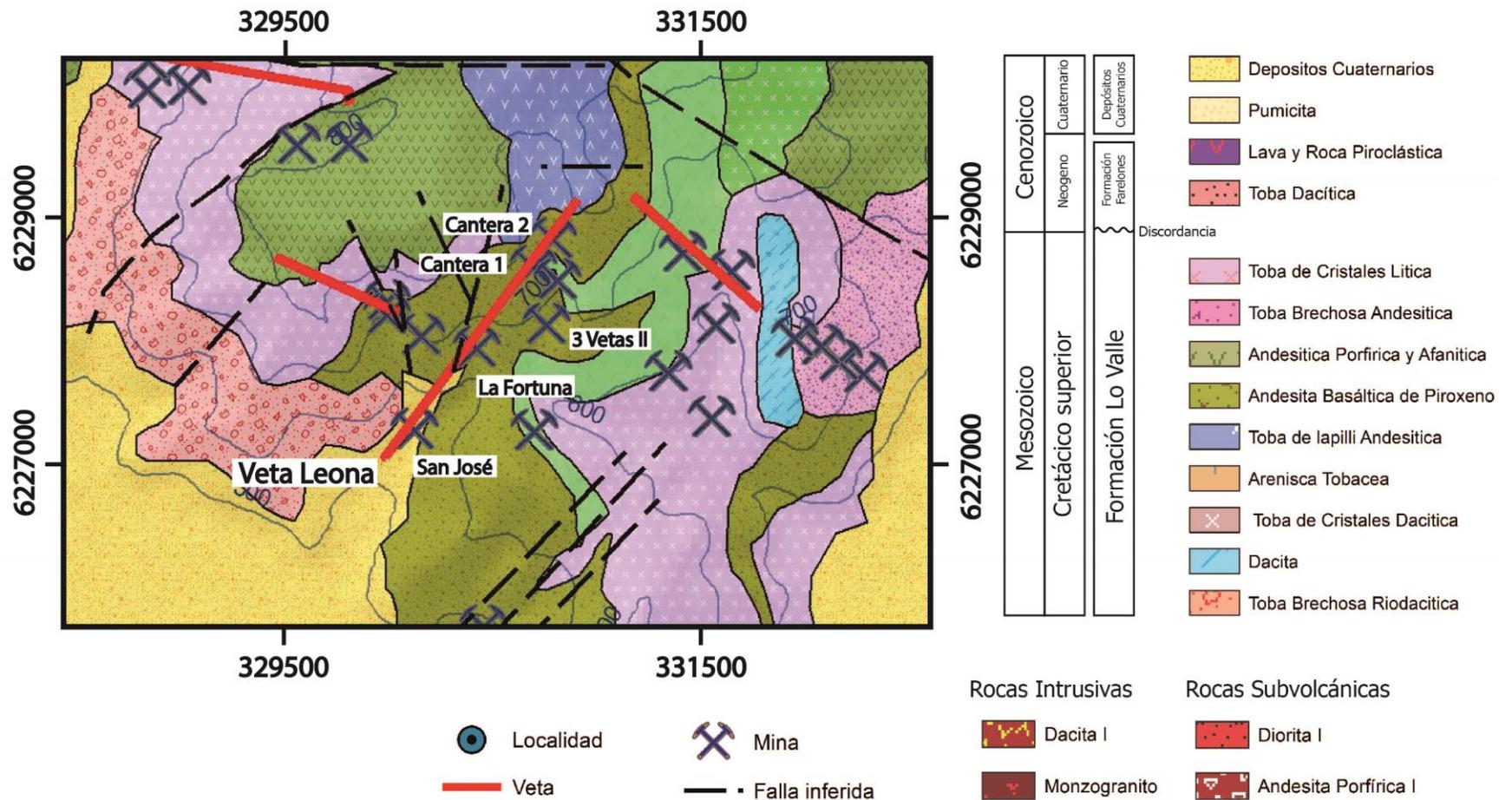


Figura 15: Acercamiento al área de estudio (Veta Leona), mostrando la ubicación de la entrada de las principales labores mineras en esta veta.

4. METODOLOGÍA

4.1. Muestreo y clasificación

El muestreo en terreno se realizó en colaboración con Minera Don Oscar Ltda., obteniéndose un total de 46 muestras. La obtención de estas se realizó en distintos niveles de la veta Leona, desde las labores mineras en superficie (715 msnm), hasta las labores mineras más profundas (560 msnm), tomando como referencia la Cantera 1 y 2 (Figura 16).

Cada espécimen obtenido se dividió por la mitad, con la precaución de cortar de manera perpendicular a las vetas y vetillas. Posteriormente, se seleccionaron las muestras que contuvieran vetas o vetillas de cuarzo poco alterado, vetillas de cuarzo con mineralización, esfalerita masiva o en cúmulos. Finalmente, se seleccionaron 10 mitades para realizar análisis geoquímico de roca total y 20 para cortes transparentes rápidos.

A dos de las 10 mitades seleccionadas se les realizó una separación de tipo mecánica (corte con sierra), con el objetivo de aislar diferentes brechas hidrotermales o vetas del resto de la roca. Con esto, se obtuvo un total de 12 muestras a las cuales se les realizó un análisis geoquímico de tipo roca total para 66 elementos.

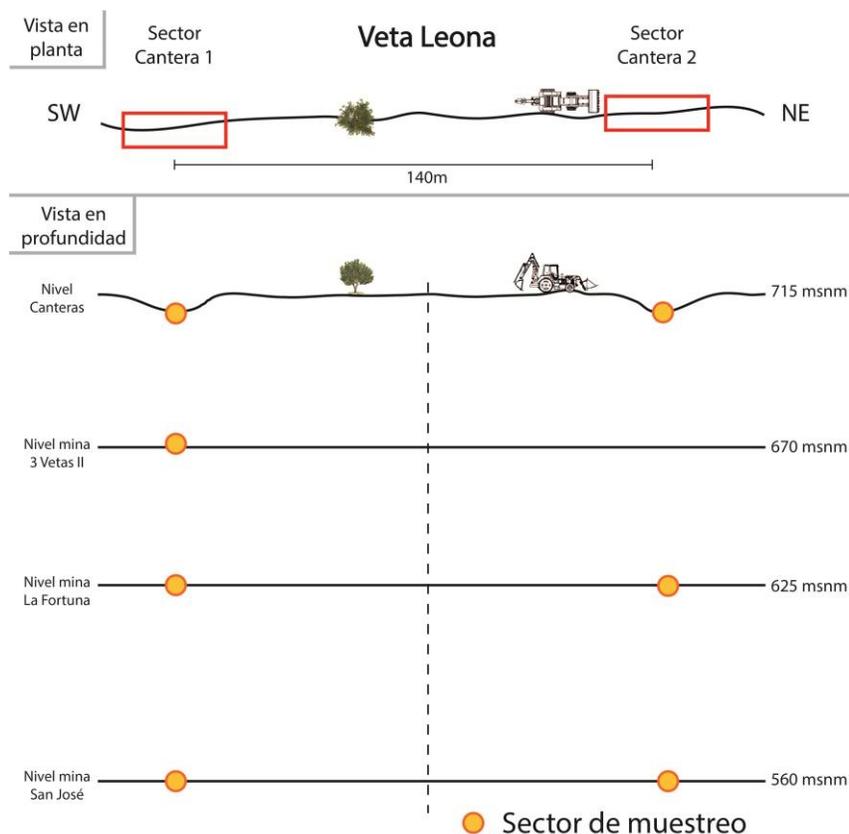


Figura 16: Metodología de muestreo realizada en la veta Leona

4.2. Preparación de cortes transparentes rápidos (corte transparente rápido)

Un corte transparente rápido es un corte transparente de entre 70 - 100 μm , con un bajo trabajo de desgaste, por lo que debe usarse aceite de inmersión con un coeficiente de difracción cercano al del cuarzo ($n = 1.515$) para realizar una observación microscópica adecuada.

La fabricación de cortes transparentes rápidos es descrita por Goldstein y Reynolds (1994). Los pasos propuestos por estos autores se describen a continuación: El primer paso consiste en seleccionar un área de 21 x 35 mm en una cara plana de una roca. Luego, usando una sierra con disco de corte diamantada y enfriada por agua, se corta el sector de interés. Idealmente se debe obtener una “caluga” (paralelepípedo) de roca de 21x35x15 mm. A continuación, se debe devastar la superficie de interés con carburo de silicio en polvo (*grit 120*) hasta obtener una superficie completamente plana y uniforme. Para eliminar los residuos de carburo de silicio, la “caluga” se limpia en agua con un baño con ultrasonido. Posteriormente, se adhiere con resina epoxica o cianocrilato un portaobjeto de vidrio previamente devastado a cada “caluga”. Una vez seco el pegamento se corta la roca de forma paralela al portaobjeto de vidrio, dejando menos de 1 mm de grosor en la roca. Finalmente, se desgasta con carburo de silicio (*grit 120*) la superficie de roca expuesta, hasta tener un espesor aproximado entre 70 - 100 μm .

Para observar de manera correcta un corte transparente rápido se debe impregnar la superficie de roca con aceite de inmersión, con un coeficiente de difracción similar al del vidrio. Luego, se cubre la roca con un cubre-objetos de vidrio.

De este proceso de fabricación se obtuvieron 20 cortes, a las cuales se les realizó tanto petrografía textural, como de inclusiones.

4.3. Petrografía

Para el estudio petrográfico se utilizó el microscopio óptico *Olympus BX53* (Figura 17), perteneciente al Laboratorio de Inclusiones fluidas y vítreas del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), Departamento de Geología, la Universidad de Chile.

La petrografía realizada consistió en identificar texturas tanto en cuarzo, calcita y esfalerita, identificando a su vez el tipo de mineralización y la relación temporal relativa que guardaba con estas. Con esta información se determinó la relación temporal entre las diferentes texturas halladas y la mineralización. Además, se identificaron los Arreglos de Inclusiones Fluidas existentes en cada textura, tipo, composición y cambios posteriores de las inclusiones fluidas. Con esta información, se seleccionaron 5 cortes transparentes rápidos, las cuales tenían texturas de interés y Arreglos de Inclusiones Fluidas con razones líquido y vapor consistente, evidencia de ebullición, entre otras características. De cada corte transparente rápido, se seleccionó su rechazo “caluga”,

con la cual se realizó un corte doble pulido, la cual es apta para realizar microtermometría de inclusiones fluidas.

La petrografía realizada en cortes transparentes rápidos, tuvo como foco la observación y descripción de las texturas en cuarzo y calcita, junto a su relación con minerales accesorios y de mena. Las texturas que se lograron identificar se mencionan a continuación en orden de abundancia.

4.4. Microtermometría

Goldstein y Reynolds (1994) indican que la microtermometría consiste en determinar las temperaturas de los cambios de fases de las inclusiones durante el calentamiento y enfriamiento. Para que una Asociación de Inclusiones Fluidas sea considerado apto para realizar esta técnica, debe cumplir con ciertos criterios. El primero es que la pregunta que se desea responder sea coherente a la Asociación de Inclusiones Fluidas presente, es decir, se debe tener noción del tipo de información que puede aportar. En este estudio se busca determinar las condiciones *PTX* del fluido mineralizador, el cual podría estar asociado a elementos de In, Te y Se. Lo anterior requiere de una petrografía detallada determinando la temporalidad y contexto de dicha tendencia. Adicionalmente, otra característica importante que debe cumplirse es que la razón líquido y vapor de cada inclusión debe ser consistente, en caso contrario, el *Arreglos de Inclusiones Fluidas* debe ser descartado.

Los cambios de fases relevantes en este trabajo son la temperatura de último fundido (T_m), que es la temperatura a la que se derrite el último hielo en la inclusión y temperatura de homogeneización (T_h), que es la temperatura a la que homogeniza el fluido a líquido o vapor dependiendo de cuál sea la fase predominante.

La microtermometría se realizó usando la platina *Linkam THM-600* montado en el microscopio *Olympus BX53* (Figura 17). La termocupla de la platina fue calibrada usando inclusiones sintéticas estándar (Bodnar y Sterner, 1985). La exactitud y precisión de la temperatura de homogeneización fue estimada en ± 1 °C. La precisión y exactitud del último fundido fue estimada en ± 0.1 °C. El procedimiento estándar para realizar la microtermometría de inclusiones se detalla en el Anexo B:

Previo a la realización de la microtermometría, se seleccionaron las Arreglos de Inclusiones Fluidas de interés en cada sección delgada doble pulida. Luego, utilizando una sierra diamantada delgada (<1 mm) se cortaron las áreas donde se encontraban las Arreglos de Inclusiones Fluidas. Cada una de estas áreas no debe sobrepasar el tamaño de 1×1 cm. Cada área de interés se sumergió en acetona para despegar el portaobjeto vidrio de la sección delgada de roca.



Figura 17: Microscopio *Olympus BX53* y *Linkam THM-600* de la Universidad de Chile.

4.5. SEM-BSE

Luego de realizar la petrografía, se seleccionaron muestras con mineralización de pirita y calcopirita diseminada en cuarzo (*rompecabeza*). Estas se metalizaron con una capa de carbono utilizando el equipo *Cressington 108C Auto carbón Coater*. Luego de esto las muestras fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido con el detector de electrones retrodispersados (*BSE*). El equipo utilizado corresponde al SEM-EDX-CL Quanta 250 (Figura 18). Este equipo está ubicado en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, en el laboratorio de Microscopía electrónica.

En esta fase del estudio consistió en analizar pirita, calcopirita y cuarzo en búsqueda de metales traza como Au, Ag, In, Te y Se. Para esto se utilizó un *Spot* de 5, alto voltaje de 12.5 Kv y una corriente de 80 μ A.



Figura 18: SEM-EDX-CL *Quanta 250* de la Universidad de Chile.

El análisis *SEM-BSE* se realizó en rechazos de cortes doble pulido en los que se descartó realizar microtermometría, Raman o ablación láser *ICP-MS*. Estos correspondían a muestras ricas en cuarzo rompecabeza, con mineralización de tipo diseminada de pirita y calcopirita.

4.6. Raman

El análisis Raman fue realizado por Daniel Moncada, profesor titular de la Universidad de Chile. Este análisis se realizó con el objetivo de identificar la presencia de volátiles, se utilizó el espectroscopio Raman *Jobin Yvon LabRam-HR800*, con un espectrógrafo de alta resolución de 800mm y 1800 grooves/mm. Se fijó un ancho de hendidura de 150 μm . La estimulación fue proporcionada por el láser 100S-514 Ar^+ 514 nm (verde), con una salida de 42 mW (Figura 19), perteneciente al *Department of Geosciences Fluid Research Laboratory*, en *Virginia Tech*. Este laser, se enfocó con un objetivo de 100X (N.A. =0.7). La recolección del espectro fue de 45 segundos en promedio para determinar la posición de cada pico. Las técnicas de calibración para este equipo y el densímetro se detallan en Lamadrid et al., (2017).



Figura 19: Raman *Jobin Yvon LabRam-HR800* perteneciente a *Virginia Tech*.

4.7. Ablación Laser ICPMS

La Ablación Laser ICPMS fue realizado por Daniel Moncada, profesor titular de la Universidad de Chile. Con este análisis se cuantificaron elementos mayores y trazas en inclusiones fluidas, su entorno (*host*) y mineralización (opaco) correspondientes a especímenes de roca. Se utilizó el *Agilent 7500ce ICPMS quadrupole mass spectrometer* acoplado a un sistema de ablación *GeolasPro Eximer 193-nm ArF laser ablation system* (Figura 20), perteneciente al *Department of Geosciences Fluid Research Laboratory*, en *Virginia Tech*.



Figura 20: LA-ICPMS Agilent 7500ce ICPMS quadrupole mass spectrometer acoplado a un sistema de ablación GeolasPro Eximer 193-nm ArF laser ablation system. Perteneciente a Virginia Tech.

Se midieron un total de 9 Arreglos de Inclusiones Fluidas y 35 minerales opacos, para un total de 42 elementos, usando un tiempo de ablación (*Dwell time*) de 10 ms, excepto para Au y Ag donde se usaron 40 ms. La concentración de elementos de las señales fue determinada por integración de intensidades de todos los elementos, aplicando el estándar *NIST SRM-610*. Las características y condiciones utilizadas en las muestras se detallan en la Tabla 2.

Ablación Laser ICPMS	
Sistema ICPMS	<i>Agilent 7500ce ICPMS quadrupole mass spectrometer</i>
Tiempo de ablación	10 ms excepto para Au y Ag: 40 ms
Estándar externo	<i>NIST SRM-610</i>
Tipo de laser	<i>GeolasPro Eximer 193-nm ArF laser ablation system</i>
Energía del láser para ablación	7-10 J/cm ²
Frecuencia de pulso del laser	10 Hz
Diámetro de ablación	> 5 μm

Tabla 2: Características y condiciones usadas en el LA-ICPMS.

La reducción de datos de inclusiones fluidas y minerales obtenidas en el LA-ICPMS se realizó con el software *AMS* (Mutchler et al., 2008), este permite estimar las concentraciones utilizando estándares externos conocidos (*NIST SRM-610*). Los pasos seguidos en el uso de este software se detallan en el Anexo C.

El análisis de Laser Ablation en inclusiones fluidas y minerales, evidenció el enriquecimiento en elementos críticos y metales preciosos en diversas Arreglos de Inclusiones Fluidas.

Las concentraciones de estos elementos en inclusiones se clasificaron de acuerdo al tipo de Arreglos de Inclusiones Fluidas en que fue realizado este análisis.

5. RESULTADOS

5.1. Evidencia en terreno

La veta Leona tiene una orientación NE-SW, una corrida de 1.5 km y una potencia de veta que varía entre 1.5 m y 3 m (Figura 15). En superficie (715 msnm) se identificó que la veta tiene abundantes fracturas, las que se encuentran rellenas de óxidos de hierro color rojo pardo y con aparente limonita color amarillo ocre, sin evidencia aparente de minerales oxidados de cobre (Figura 21a). En esta misma cota, se identificó que la veta está compuesta por dos tipos de brechas hidrotermales a las que se les asignó el nombre de Brecha I y Brecha II (Figura 21a y Figura 21b). La Brecha I corresponde a una brecha hidrotermal rica en cuarzo de tipo matriz soportado, con una abundante presencia de óxidos de hierro, ausencia de minerales oxidados de cobre u otro tipo de mineralización a nivel macroscópico. Esta correspondería al mayor volumen de relleno de la veta (Figura 21b). La Brecha II corresponde a una brecha hidrotermal rica en cuarzo, con vetillas de cuarzo superpuestas. En esta se identificó mineralización de pirita y calcopirita diseminada (Figura 21b). Además, se reconoció que esta ocupa alrededor de 1/6 del total de la sección transversal de la veta en el sector estudiado. El espécimen de la Figura 21b muestra el contacto entre estas Brechas I y II, en la que puede verse la existencia de un halo de alteración de aproximadamente 1 cm en el contacto entre las dos.

Esta clasificación de brecha no solo fue encontrada en superficie, sino que también en profundidades donde se realizan labores mineras. Esto se pudo determinar en base a la alta cantidad de fases de sílice (50-80%) y la baja o nula mineralización presente en las Brechas I en comparación a la menor cantidad de fases de sílice (<50%) y la evidente mineralización que va de diseminada a masiva en la Brecha II (Figura 22a, Figura 22b y Anexo C).

La Figura 22a y Figura 22b corresponden a muestras obtenidas a 560 msnm y 670 msnm, respectivamente. En la primera (Figura 22a), se identifica una brecha hidrotermal rica en cuarzo y jaspe sin mineralización aparente, cortando a esta, se observa una vetilla de cuarzo con calcopirita que va desde masiva a diseminada densamente. En la segunda (Figura 22b), se observa una brecha hidrotermal con clastos correspondientes a la roca caja de andesita fuertemente alterada y fracturada. La matriz de esta brecha presenta calcopirita que va desde diseminada a masiva inmersa en cuarzo.

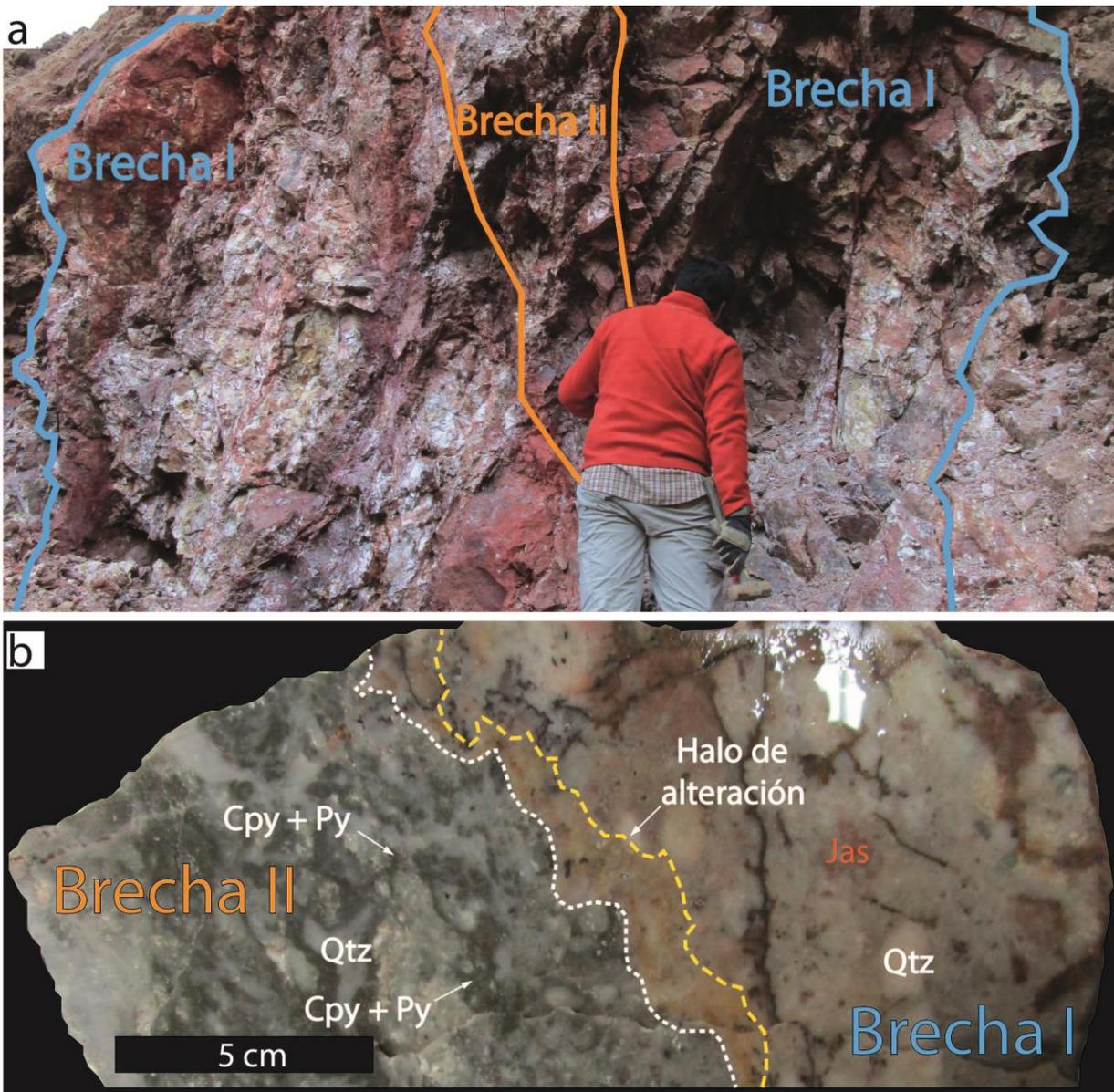


Figura 21: Evidencia en terreno: a) Sección transversal de la veta con evidencia de dos brechas hidrotermales (Brecha I y II); b) Muestra superficial mostrando la coexistencia de estas dos brechas, además del halo de alteración presente en la porción de la roca correspondiente a la Brecha I. Cpy: calcopirita; Jas: jaspe; Qtz: cuarzo; Py: pirita.

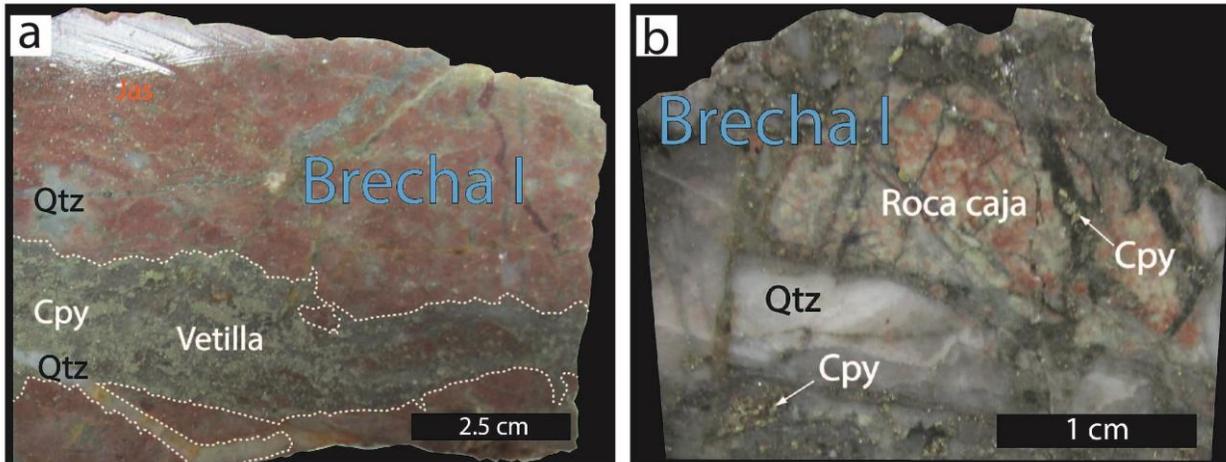


Figura 22: Evidencia en terreno: a) Muestra en profundidad de la Brecha I y una vetilla con mineralización de calcopirita en cuarzo; d) Brecha hidrotermal (Brecha I) con clastos de roca caja y mineralización de calcopirita en la matriz de brecha. Cpy: calcopirita; Qtz: cuarzo.

Respecto a la mineralización, se observó que no se distribuía uniformemente en la veta y que, además, mostraba una zonación en profundidad. En superficie (715 msnm), las rocas encontradas contienen abundante cuarzo y pirita, en tanto que en niveles intermedios de las labores mineras (650 y 625 msnm), se detectó la aparición de esfalerita, calcopirita, galena y una mantención de la cantidad de pirita. En cuanto al cuarzo, se halló una disminución de su presencia. En los sectores más profundos explotados de la veta (560 msnm), se notó un notorio aumento en la cantidad de calcopirita, esfalerita y galena, por sobre la de pirita. Además, aquí también se notó una gran disminución de cuarzo y presencia de jaspe en algunas muestras.

5.2. Geoquímica

El análisis geoquímico de roca total permitió determinar la existencia de elementos críticos como In, Te y Se, además de otros elementos como Au, Ag, Cu. Los principales valores promedios obtenidos en estos especímenes se detallan en el Anexo E, mientras que los valores más representativos en este estudio se muestran en la Tabla 3.

Muestras	Concentración en partes por millón (ppm)							
	Au	Ag	Cu	Pb	In	Te	Se	Cd
BC-01	1.4	36.1	193.5	1395.0	0.0	6.4	6.9	0.3
BC-03	0.7	12.3	301.0	106.0	0.0	3.5	6.6	0.2
B-03-1016	8.4	40.7	10000.0	986.0	12.5	16.6	22.8	1000.0
BC-04	0.2	8.2	2290.0	10000.0	0.0	3.6	5.3	170.5
BC-06	0.5	5.5	169.0	198.5	0.0	2.7	0.6	8.5
BC-07	1.6	15.8	7380.0	1360.0	0.2	3.4	2.4	71.3
BC-11	6.1	34.9	10000.0	625.0	1.5	2.2	9.8	574.0
BC-12	0.7	7.4	1940.0	382.0	0.0	2.5	1.6	6.1
BC-13	3.7	19.6	10000.0	353.0	1.2	5.0	9.4	12.4
BC-14	0.5	4.2	694.0	392.0	0.2	2.1	3.6	14.5
BC-15	1.9	19.7	3990.0	896.0	1.5	11.0	26.4	222.0
BC-16	2.0	21.4	106.5	217.0	0.1	7.1	3.7	0.4
Promedio	2.3	18.8	3922.0	1409.2	1.4	5.5	8.3	173.3

Tabla 3: Principales elementos detectados por geoquímica de roca total en especímenes de la veta Leona

Estos valores obtenidos se compararon con valores medios presentes en la corteza terrestre (Figura 23). De esta comparación se observa que la veta muestra un enriquecimiento (sobre la recta anaranjada) con respecto a la corteza en elementos como Au, Ag, Cu, Cd, Pb, As, Sb, Se, Bi, Mo, Zn, W, In, Te, Se, entre otros.

En labores en explotación, las concentraciones de estos elementos muestran cierta variabilidad. A 715 msnm las mayores concentraciones (>10 ppm) corresponden a Ag, mientras que, para Au, Se y Te, se detectaron valores entre 1 y 10 ppm. A su vez, a 670 msnm se detectaron valores mayores a 10 ppm para Ag, Se, Te y Au, en tanto que para In estas fueron entre 1 y 10 ppm. A 625 msnm sólo se detectó Ag sobre los 10 ppm y el resto de los elementos en concentraciones entre 1 y 10 ppm. Finalmente, a 560 msnm, sólo Ag continúa sobre los 10 ppm, mientras que el resto de los elementos se encuentra en concentraciones entre 1 y 10 ppm, llegando a valores por debajo de 1 ppm. La geoquímica en profundidad es representada en la Figura 24.

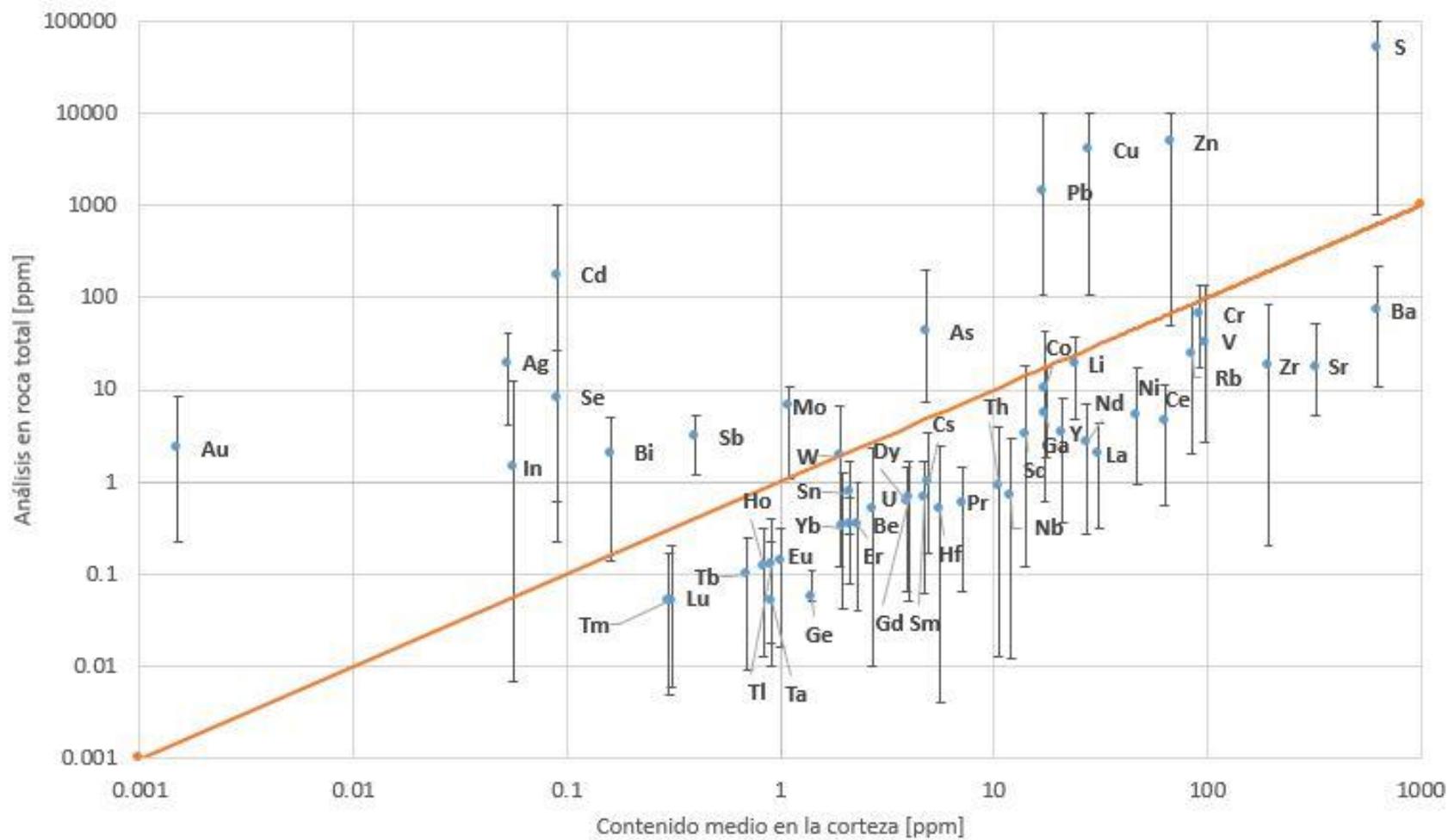


Figura 23: Contenido medio en la corteza vs análisis en roca total. La recta anaranjada representa una línea 1:1

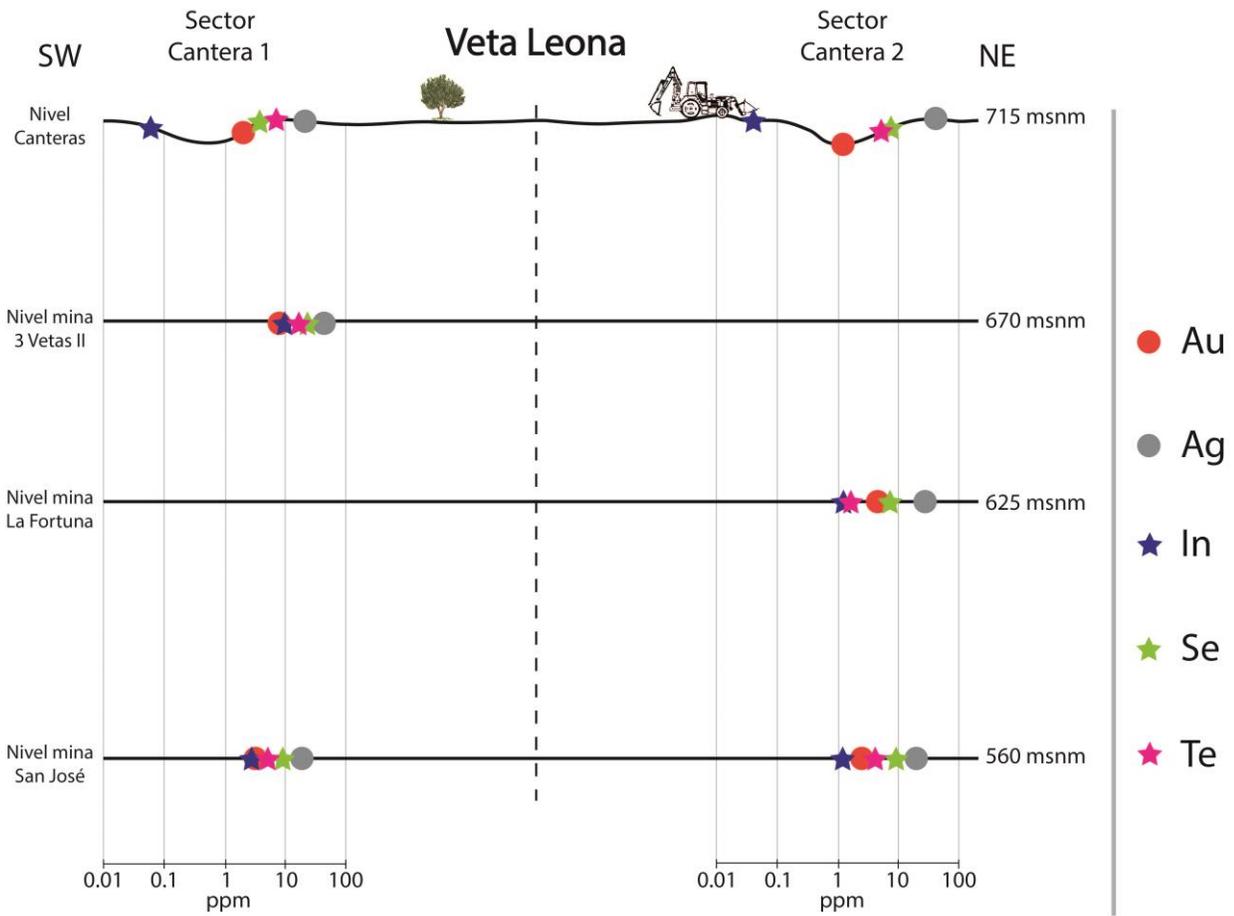


Figura 24: geoquímica de especímenes realizada en las labores mineras en profundidad, al interior de la veta Leona mostrando valores para Au, Ag, In, Te y Se.

5.3. Petrografía

La textura más abundante encontrada, alrededor de un 90% de los especímenes de la veta Leona, corresponde a cuarzo tipo rompecabeza (Figura 25b). Esta textura de recristalización está formada por agregados cristalinos a microcristalinos de cuarzo (Dong et al., 1995; Moncada y Bodnar, 2012). Este tipo de cuarzo fue identificado en casi todas las muestras extraídas de la veta, formando parte tanto de brechas como en bordes de vetillas y microvetillas. Se observó que la mineralización de tipo metálica, se encuentra en contacto o inmersa en cuarzo rompecabeza (Figura 26). Esta textura, es la única identificada en las Brechas I, mientras que en las Brechas II, se encontró rellenando espacios o bordeando otras texturas en cuarzo.

Otra textura de relleno de espacios abiertos abundante (40% de los especímenes) corresponde a cuarzo euhedral, el cual se presenta variando de subeuhedral a euhedral (Figura 25c), con un tamaño variable entre 50 – 250 μm . Esta textura está formada por cuarzoes individuales con sus seis caras desarrolladas, por lo que es reconocible a nícoles cruzados, y en algunas ocasiones, a nícoles paralelos. Esto último, ocurre cuando el cuarzo contiene inclusiones de tipo primarias, las cuales siguen de forma paralela las caras del cristal. El cuarzo euhedral se observó en todos los niveles de la veta, pero restringido únicamente a especímenes clasificados como Brechas II. Una característica común hallada es que este siempre se encontró bordeado por cuarzo rompecabeza o plumoso. Todos los Arreglos de Inclusiones Fluidas (FIA's) primarios registrados en cuarzo se observaron en cuarzo euhedral.

El cuarzo plumoso, presente en un 10% de los especímenes (Figura 25a), puede reconocerse sólo a nícoles cruzados y se caracteriza por estar formado por cuarzoes individuales con apariencia de pluma, la cual puede verse ligeramente sólo en sus posiciones de máxima extinción, desarrollándose comúnmente en márgenes de cristales de cuarzo euhedrales (Adam, 1920; Sander y Black, 1988; Dong et al., 1995). Esta textura fue identificada tanto en superficie (715 msnm) como en el nivel más profundo en explotación (560 msnm), encontrándose generalmente bordeando cuarzoes de tipo euhedral, pero nunca rellenando espacios.

El cuarzo coliforme, presente en un 5% de las muestras (Figura 25d), es un agregado de minerales que combina formas esféricas, botroidales y reniformes, entre otras. Esta combinación es típica de calcedonia en agregados ritmicos y finos (Dong et al., 1995). Esta textura sólo se observó a nivel superficial de la veta, teniendo una baja ocurrencia incluso en muestras a este nivel.

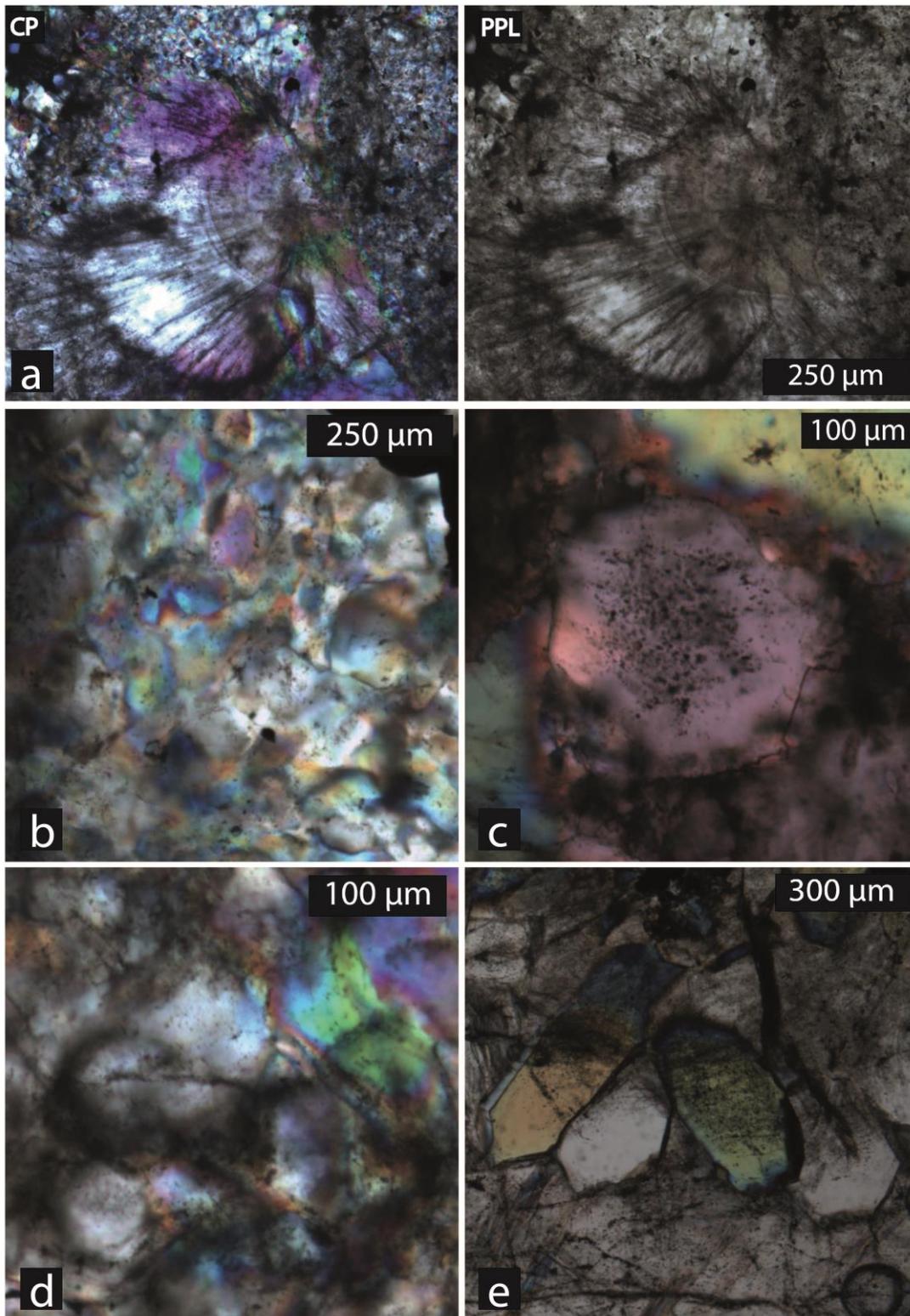


Figura 25: a) Cuarzo plumoso mostrado a nicoles cruzados (CP) y nicoles paralelos (PPL); b) Cuarzo rompecabeza; c) Cuarzo euhedral; d) Silica amorfa (cuarzo coliforme); e) Cuarzo zonal.

El cuarzo zonal, presente en un 20% de los especímenes (Figura 25e), corresponde a una alternancia de minerales con zonas claras y lechosas en cuarzos individuales (Dong et al., 1995). Este se encontró solo en zonas profundas y rellenando espacios abiertos o fracturas dentro de cuarzo rompecabeza. Las Arreglos de Inclusiones Fluidas encontradas en esta textura son de tipo secundaria.

La calcita rombica se observó en las labores ubicadas a 670 y 560 msnm, encontrándose en todos los casos rellenando fracturas tanto en cuarzo como en mineralización.

Además de las texturas descritas, se identificaron ciertas particularidades en la esfalerita. La primera corresponde a su color gris metálico oscuro a muestra de mano (Anexo D, B03-1016) y color gris pardo en sección delgada. Como factor común, las muestras de esfalerita se encontraban fuertemente fracturadas. Aun así, se logró identificar planos de clivaje y direcciones de crecimiento, lo cual sirvió de guía para realizar las secciones delgadas e identificar en estas la temporalidad de los Arreglos de Inclusiones Fluidas (Figura 32). Otra característica identificada, fue la presencia de cristales de calcopirita en exolución (Figura 27b).

A nivel microscópico, se verificó la zonación mineral existente entre las zonas superficiales y más profundas en explotación de la veta. A nivel superficial los minerales encontrados corresponden en su mayoría a pirita de tipo diseminada en cuarzo rompecabeza, illita en cuarzo rompecabeza (Figura 27a) y óxidos post-mineralización. Hacia niveles más profundos (670 msnm), es notoria la presencia de esfalerita tipo masiva, en masas y vetillas, además de un aumento en la cantidad de otros minerales como calcopirita y galena. Al nivel de 560 msnm, es evidente el aumento de metales sulfurados, llegando incluso a superar en volumen al cuarzo en algunas muestras. Junto con esto, se identificó una disminución en la ocurrencia de pirita y un aumento significativo de galena, calcopirita y esfalerita. Como característica común se identificó que parte considerable de la mineralización se encontró en cuarzo rompecabeza (Figura 26).

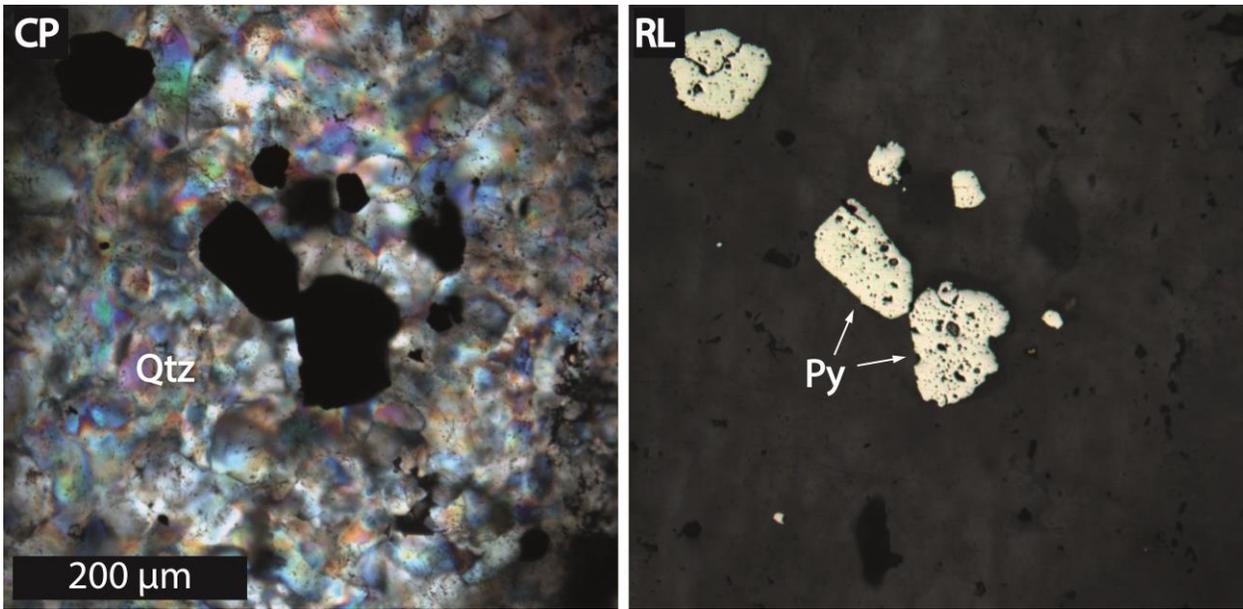


Figura 26: Ejemplo de mineralización de pirita diseminada en cuarzo *rompecabeza*.

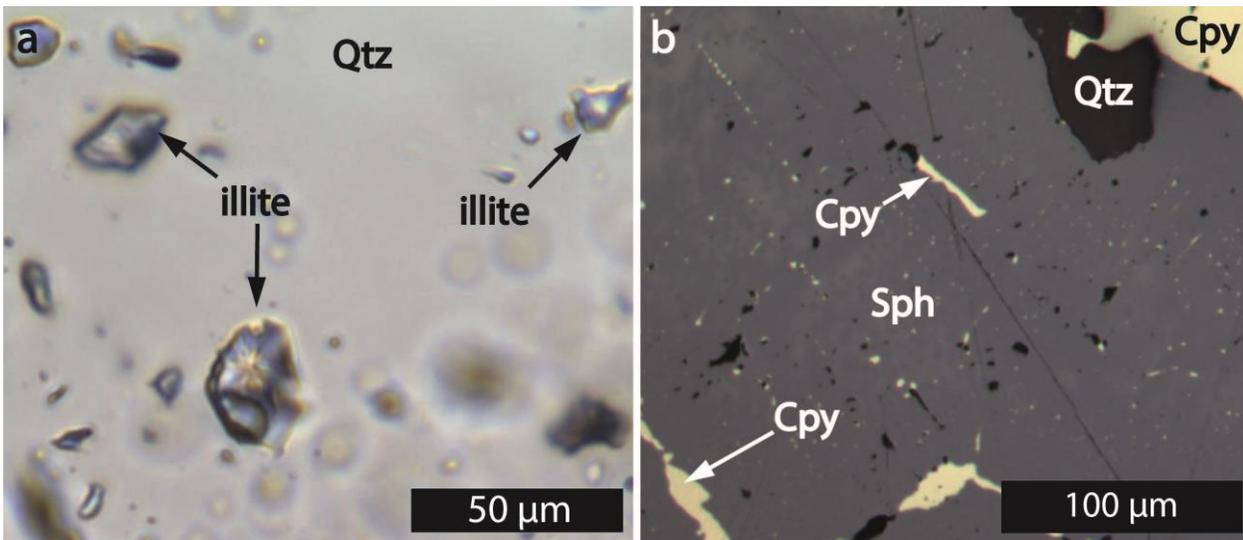


Figura 27: a) Evidencia de illita en cuarzo *rompecabeza*, correspondiente a una muestra superficial con evidencia de evaporación rápida. b) Exolución de calcopirita en esfalerita tipo masiva.

5.4. Petrografía de inclusiones

La evidencia petrográfica muestra la existencia de Arreglos de Inclusiones Fluidas (FIA's) en cuarzo, esfalerita y calcita. Estos se clasificaron según el mineral en el cual se hospedaban y según como se encontraban las inclusiones primarias o secundarias a temperatura ambiente.

En cuarzo euهدral se registraron dos tipos de Arreglos de Inclusiones Fluidas primarias, las características de cada una se detallan a continuación.

Un primer tipo de arreglo contiene inclusiones ricas en líquido, con razones líquido y vapor consistente, coexistiendo con inclusiones ricas en vapor (Arreglos de Inclusiones Fluidas A) y concentrándose en el centro del cristal, lo que indica que las inclusiones se habrían formado en fases iniciales del crecimiento del cristal. El tamaño promedio de estas inclusiones varía entre los 5 – 10 μm (Figura 28). Estos Arreglos de Inclusiones Fluidas fueron encontradas tanto en superficie (715 msnm), como en niveles intermedios-profundos de labores en explotación (625 msnm).

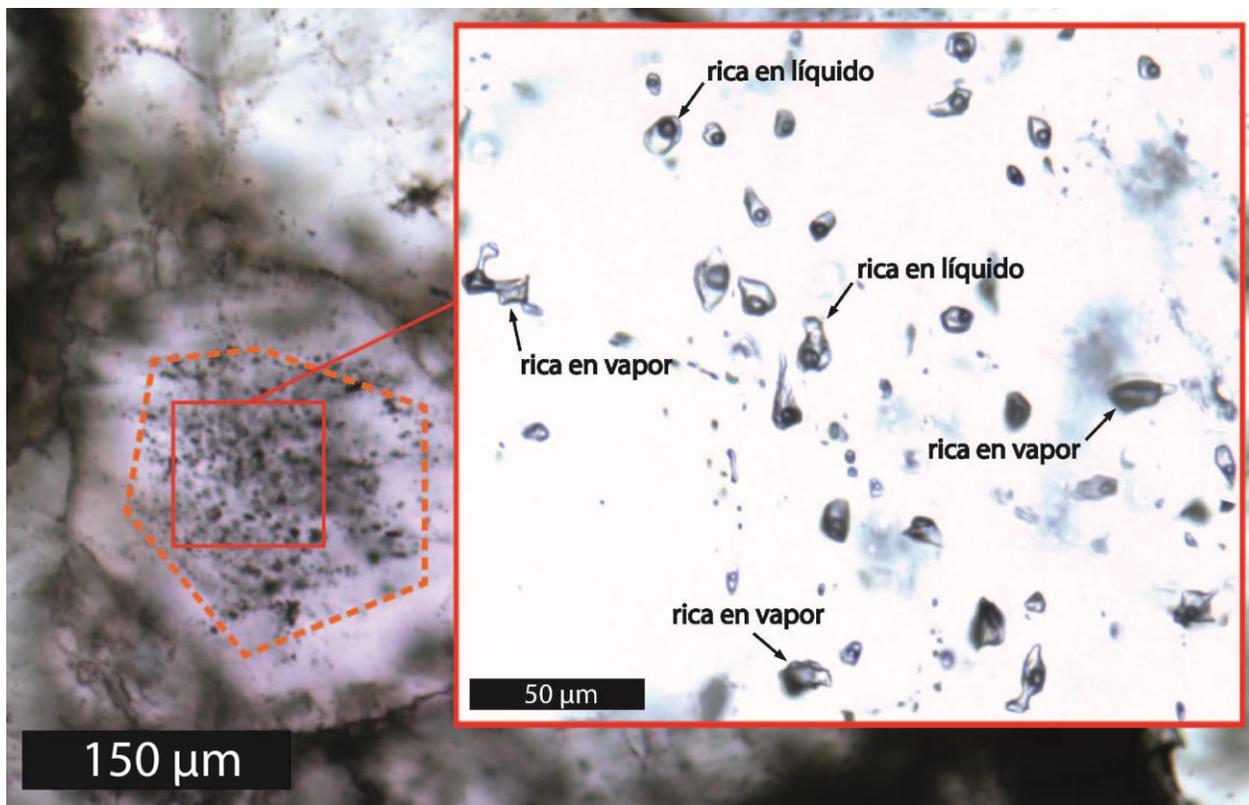


Figura 28: Arreglo de Inclusiones Fluidas A (BC03C) en cuarzo euهدral encontrado en un espécimen a 715 msnm.

Un segundo tipo contiene inclusiones secundarias en cuarzo euhedral, formado sólo por inclusiones ricas en vapor (Arreglos de Inclusiones Fluidas B). Estas se encuentran cortando el crecimiento mineral, indicando que la formación de estas correspondería a un evento hidrotermal posterior. El tamaño de estas inclusiones oscila entre 5 -30 μm (Figura 29) y sólo se hallaron en sectores profundos de las labores en explotación (560 msnm).

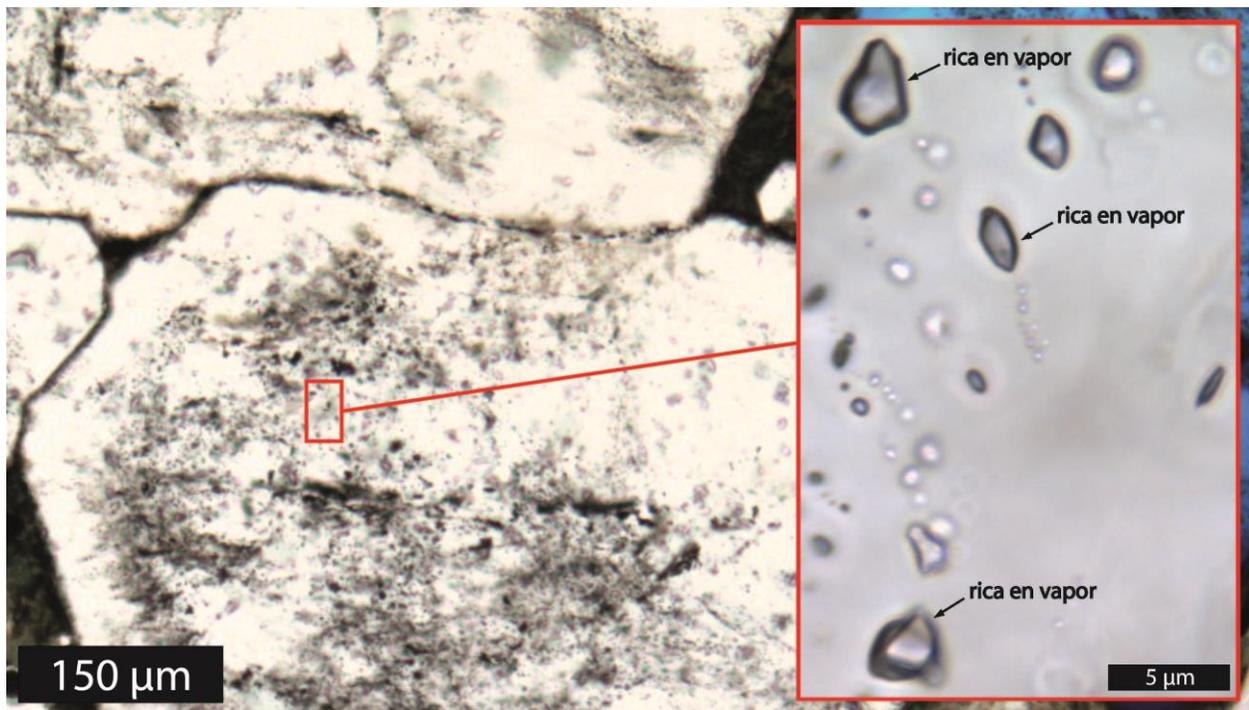


Figura 29: Arreglo de Inclusiones Fluidas B) en cuarzo euhedral encontrado en un espécimen a 560 msnm.

En cuarzo euhedral y zonal, se identificaron Arreglos de Inclusiones Fluidas secundarias (Figura 30), con inclusiones ricas en líquido, con razones líquido y vapor consistente (Arreglos de Inclusiones Fluidas C), cortando el crecimiento mineral, pasando incluso hasta otros cristales cercanos. Estos Arreglos de Inclusiones Fluidas sólo se encontraron en sectores intermedios a profundos de las labores en explotación (625 msnm).

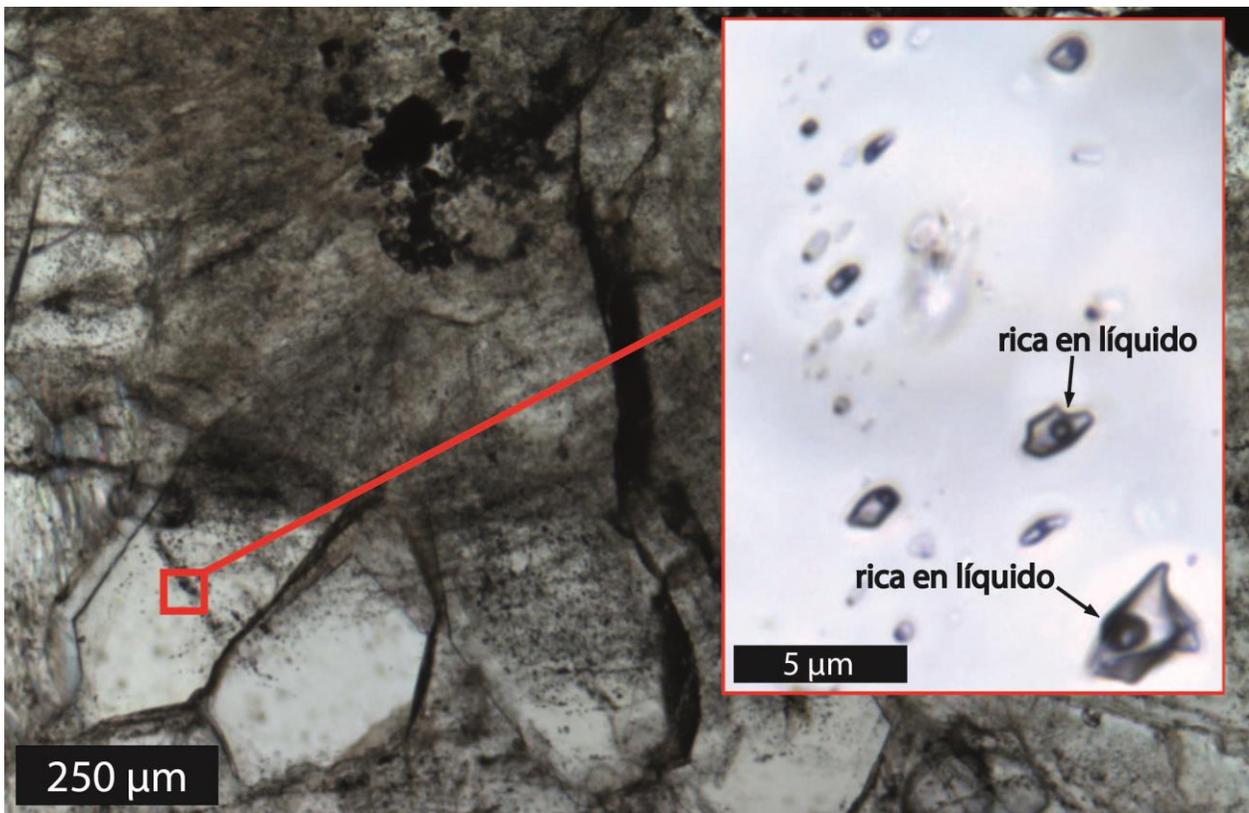


Figura 30: Arreglo de Inclusiones Fluidas C en cuarzo euهدral encontrado en un especimen a 625 msnm.

En esfalerita, se identificaron seis Arreglos de Inclusiones Fluidas primarias, con inclusiones ricas sólo en líquido, con razones líquido y vapor consistente, y con calcopirita formando parte de cada inclusión (Arreglos de Inclusiones Fluidas D), lo que indica que esta habría formado parte del fluido (Figura 31 y Figura 32). Estos Arreglos de Inclusiones Fluidas se encontraron en sectores intermedios a profundos (670 y 625 msnm) en muestras ricas en cuarzo con esfalerita en masa y muestras de esfalerita masiva.

En la Figura 31 se observan estos Arreglos de Inclusiones Fluidas hospedadas en cristales negativos de esfalerita, con abundante calcopirita en cada inclusión. A su vez, en la Figura 32 se identifican Arreglos de Inclusiones Fluidas siguiendo el crecimiento de un cristal de esfalerita (A → B), es decir, las inclusiones de la Figura 32B serían posteriores a las inclusiones de la Figura 32A. Además, se identifica la presencia de una inclusión secundaria con estrangulamiento.

Por otra parte, en calcita rómbica se encontraron Arreglos de Inclusiones Fluidas secundarias (Anexo F - BC-11-T3), con inclusiones ricas sólo en líquido (Arreglos de Inclusiones Fluidas E).

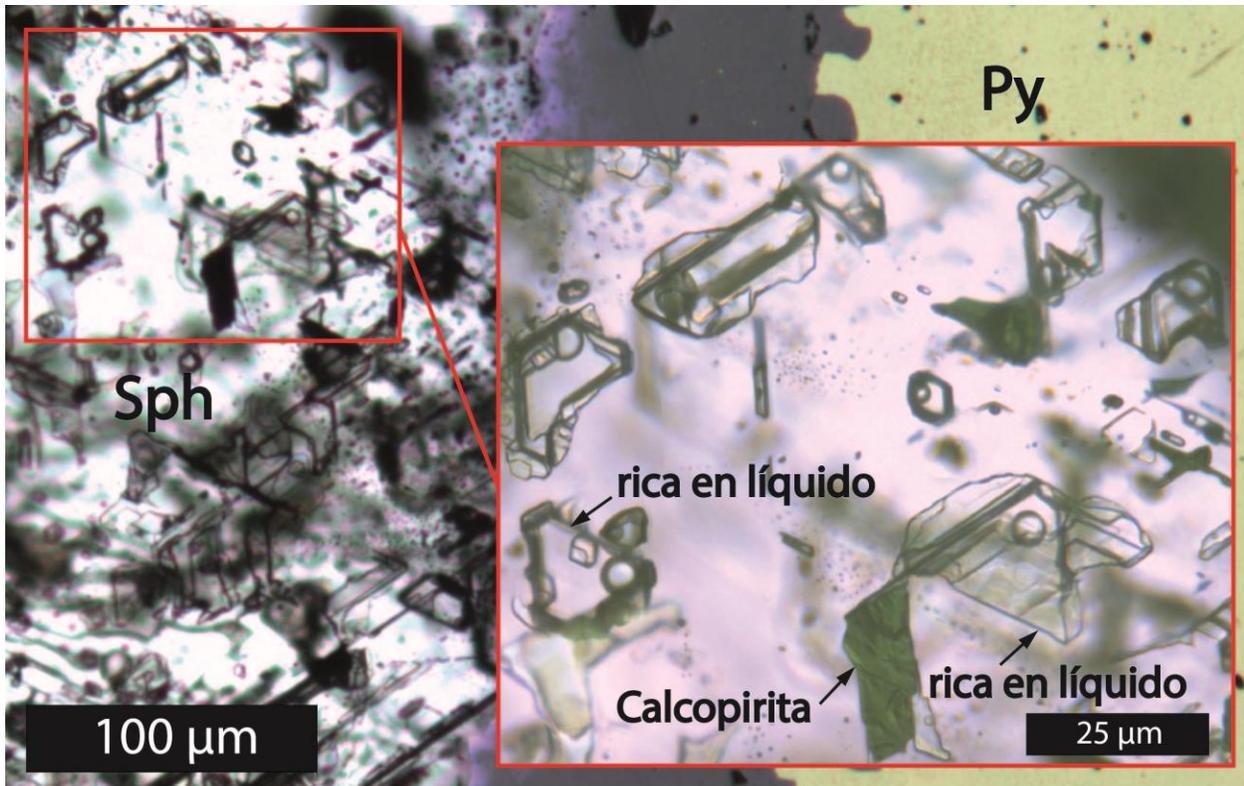


Figura 31: Arreglos de Inclusiones Fluidas D (T1.2) con inclusiones ricas en líquido y presencia de mineralización en esfalerita.

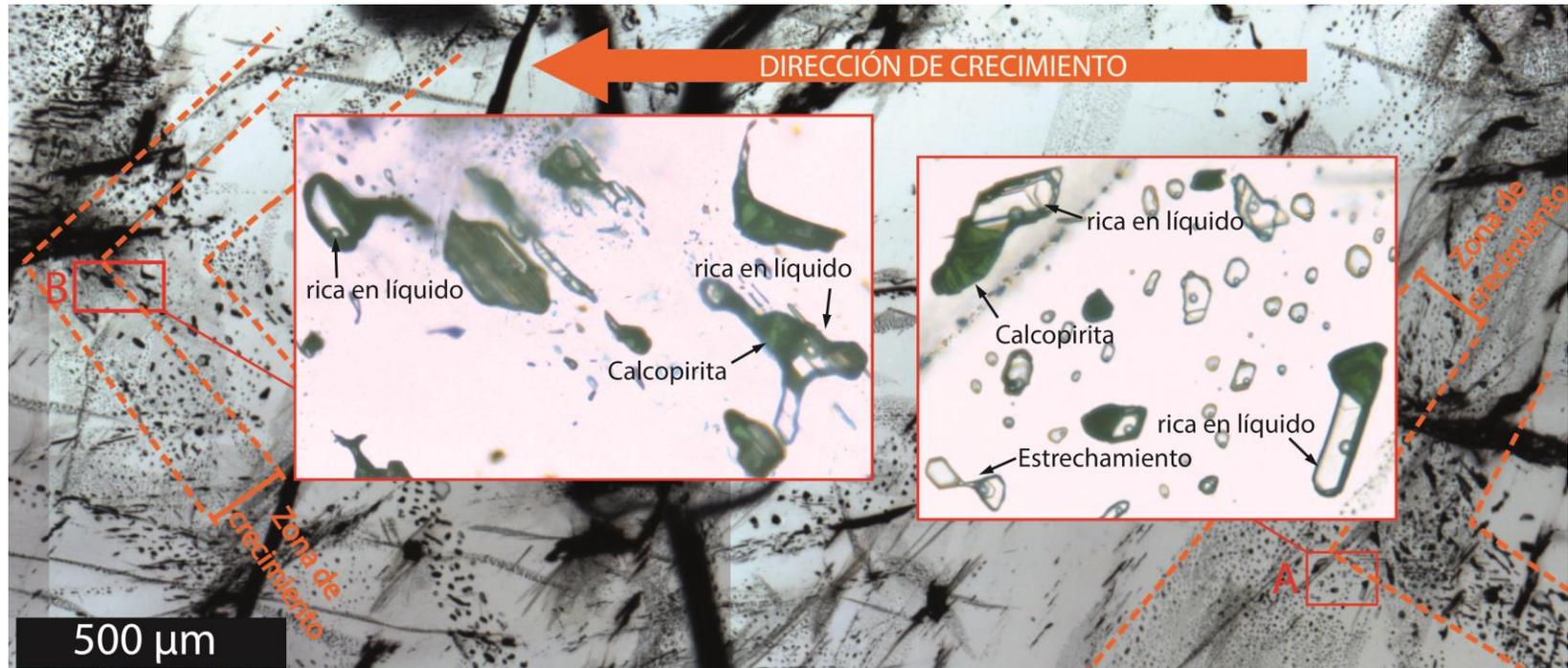


Figura 32: FIA's D encontrados en zonas de crecimiento de esfalerita (A→B). A) Arreglos de Inclusiones Fluidas T3A con mineralización, junto a FIA's secundarios con necking down. B) Arreglos de Inclusiones Fluidas T3B posteriores, con mineralización.

5.5. Microtermometría

Las inclusiones primarias ricas en líquido coexistentes con inclusiones ricas en vapor en cuarzo euهدral (Arreglos de Inclusiones Fluidas A), mostraron temperaturas de homogeneización (T_h) entre 250 y 245 °C y temperaturas de último fundido (T_m) entre -3.7 y -4.8 °C.

Las inclusiones secundarias ricas en líquido en cuarzo euهدral (Arreglos de Inclusiones Fluidas C), presentaron T_h entre 250 y 249 °C, y T_m entre -0.3 y -0.5 °C.

Los resultados relativos a las inclusiones primarias ricas en líquido en esfalerita (Arreglos de Inclusiones Fluidas D), se clasificaron en dos grupos de resultados. El primer grupo corresponde a muestras pertenecientes a la mina 3 Vetas II (670 msnm), con un total de 5 Arreglos de Inclusiones Fluidas, donde se obtuvo T_h entre 157 y 120 °C y T_m entre -0.6 y -9.3 °C. El segundo grupo corresponde a muestras obtenidas de la mina La Fortuna (625 msnm), donde se obtuvo T_h entre 247 y 237 °C y T_m entre -6.1 y -6.5 °C.

En inclusiones secundarias ricas en líquido en calcita (Arreglos de Inclusiones Fluidas C), se obtuvieron T_h entre 138 y 135 °C y T_m entre -3.0 y -3.5 °C.

Las temperaturas de homogeneización y las salinidades obtenidas a partir de las temperaturas de último fundido correspondientes a los Arreglos de Inclusiones Fluidas (FIA's) hallados se resumen en la Tabla 4 y se muestran de manera gráfica en la Figura 33. Estos resultados se muestran de forma detallada en el Anexo H.

Muestra	Cota msnm	Host	FIA's	Min	Th °C	Prom. °C	NaCl eq % en peso	Prom. % en peso	n
BC03C	715	Qtz	A	no	245 - 250	248	6.0 - 7.6	6.6	7
B-T1	670	Sph	D	si	139 - 155	145	1.6 - 5.7	2.9	5
B-T2	670	Sph	D	si	125 - 154	135	1.1 - 5.7	2.8	6
A-T1	670	Cal	E	no	135 - 138	137	5.0 - 5.7	5.3	5
A-T2	670	Sph	D	si	120 - 130	125	13.2 - 12.3	12.6	5
A-T3A	670	Sph	D	si	145 - 157	150	8.5 - 11.6	10.4	7
A-T3B	670	Sph	D	si	118 - 135	130	1.1 - 1.9	1.6	5
T1.2	625	Sph	D	si	235 - 247	239	9.3 - 9.9	9.5	6
BC11-T3	625	Qtz	C	no	249 - 250	250	0.5 - 0.9	0.7	5
BC13	560	Qtz	B	no	-	-	-	-	-

Tabla 4: Resumen de datos de microtermometría e información anexa. La muestra BC13 corresponde a un Arreglo de Inclusiones Fluidas con únicamente inclusiones ricas en vapor. Cal: calcita, Qtz: cuarzo, Sph: esfalerita, Min: mineralización, Prom: promedio, n: número de inclusiones. msnm: metros sobre el nivel del mar.

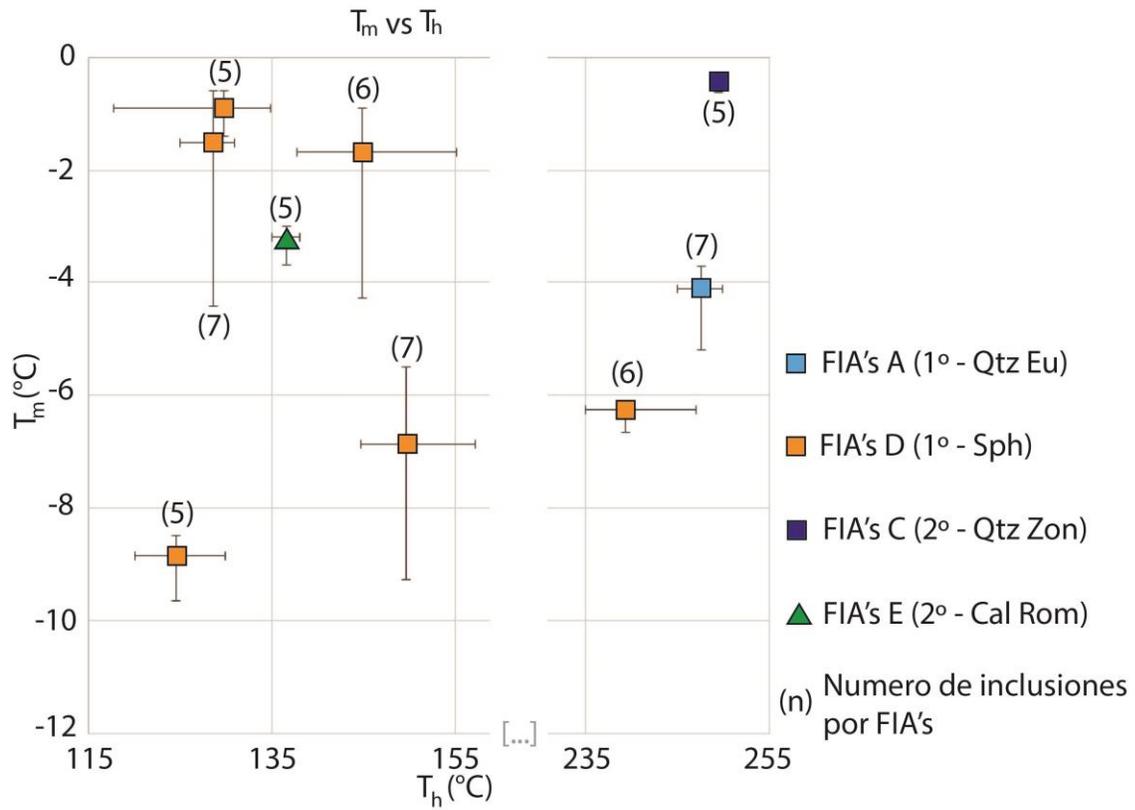


Figura 33: Diagrama T_h vs T_m de los resultados obtenidos de microtermometría en la veta Leona.

5.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM-BSE)

Se identificó que ciertos granos de pirita en cuarzo rompecabeza presentan sectores enriquecidos en Au y Ag (Figura 34). Los análisis puntuales, semi-cuantitativos para estos elementos, mostraron concentraciones de 18.55 % en peso para el Au y de 2.60 % en peso para Ag (Tabla 5). Finalmente, con esta técnica, no se detectó presencia de elementos críticos en ninguna de estas muestras.

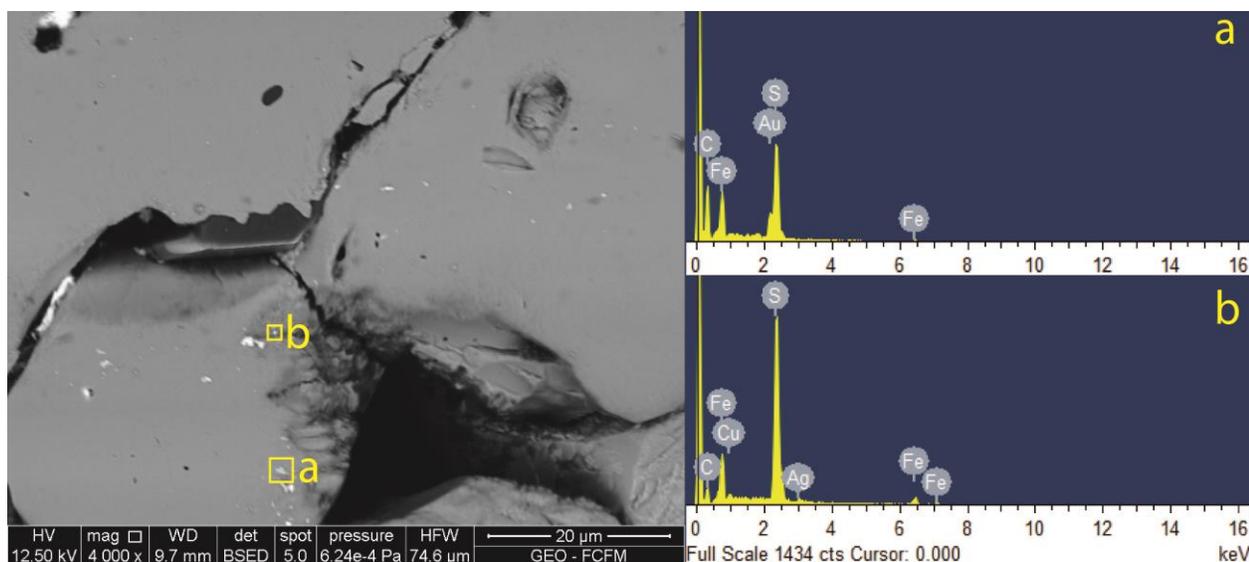


Figura 34: SEM-BSE realizado en pirita. a) área detectada en pirita con señales de Fe, S y Py. b) área detectada en pirita con señales de Fe, Cu, S y Ag. El C detectado corresponde al metalizado.

% en peso	S	Fe	Cu	Ag	Au
a	53.63	5.41	0	0	40.96
b	67.32	23.43	5.29	3.96	0
% mol	S	Fe	Cu	Ag	Au
a	84.62	4.88	0	0	10.50
b	79.64	15.94	3.13	1.39	0

Tabla 5: Porcentaje en peso (% en peso) y molar (% mol) semi-cuantitativo para los elementos detectados en Pirita.

5.7. Raman

Se realizó un análisis Raman en todos los Arreglos de Inclusiones Fluidas, con el objetivo de buscar presencia de volátiles como CO₂, SO₂, o alguna otra especie. Del total de Arreglos de Inclusiones Fluidas analizados, hallándose sólo la presencia de CO₂ en “BC11-T3” (Figura 35 y Anexo I), correspondiente a Arreglos de Inclusiones Fluidas C, hallados en zonas profundas. La presión promedio mínima, se calculó utilizando la regresión propuesta por Lamadrid et al (2017) (Ecuación 8 y 9), obteniéndose una presión de CO₂ de 575.6 psi (39.68 bar) y una densidad de 0.1 g/cm³. Los datos obtenidos se encuentran en el Anexo I.

$$P_{\text{psi}} = -176,807.6 + (1723.5547 \times \Delta) - 1722.7765 \times (\Delta - 102.866)^2 \text{ (Ec. 8)}$$

$$\rho = -36.42055 + (0.354812 \times \Delta) \text{ (Ec. 9)}^1$$

Δ es la diferencia del fermi diad.

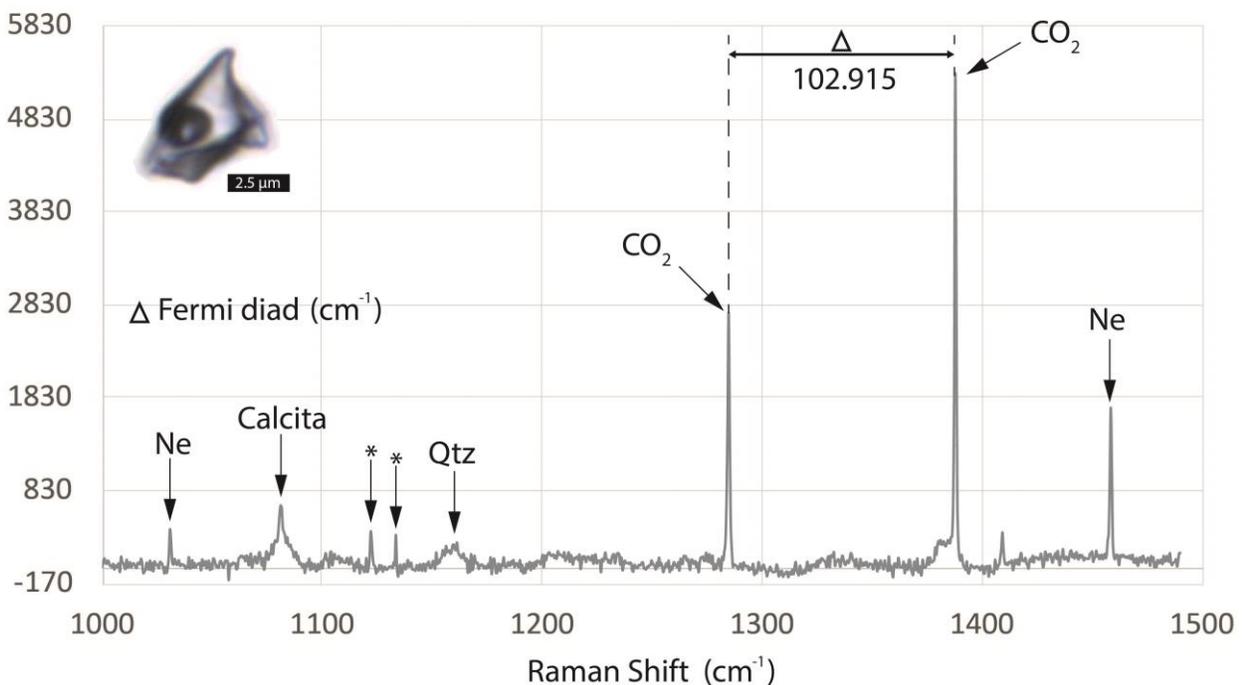


Figura 35: Picos obtenidos en Raman en una inclusión de la muestra BC11-T3. Los picos correspondientes a CO₂ se encuentran en 1285 y 1387 Qtz: cuarzo, *: no reconocido.

¹ ρ = densidad (g/cm³); Δ = Fermi diad (cm⁻¹); Ppsi= Presión (psi).

5.8. Ablación laser ICP-MS

En Arreglos de Inclusiones Fluidas primarias con inclusiones ricas en líquido coexistentes con ricas en vapor, en cuarzo euhedral, sólo fue significativa la presencia de In en las inclusiones. El resto de los elementos de interés estaban bajo el límite de detección. El total de elementos detectados en este conjunto se muestra en el Anexo J.

En Arreglos de Inclusiones Fluidas secundarias, con inclusiones ricas en líquido, en cuarzo zonal, fue notorio el pico de Ag (Figura 36) registrado en algunas de sus inclusiones, variando entre 5.61 y 16.64 ppm, además se detectó 15.74 ppm de In en solo una inclusión, mientras que, en otras inclusiones, este elemento se encontraba bajo el límite de detección. Al analizar detalladamente los patrones de espectro de cada inclusión, se detecta que la presencia de Ag asociada a la inclusión es evidente, sin embargo, podría existir un aporte de este elemento por parte del host.

Las Arreglos de Inclusiones Fluidas primarias en esfalerita, fueron analizados bajo una metodología diferente, debido a que una cantidad considerable de estas inclusiones estaba acompañada por mineralización. Estas inclusiones mostraron en su mayoría un doble pico (Figura 37, Anexo M y Anexo N), uno correspondiente a sodio (morado) y otro correspondiente a cobre (anaranjado). Este último pico correspondería a la mineralización encontrada, la que se asoció a calcopirita.

De manera análoga a la clasificación realizada en la microtermometría, los resultados se separaron en dos grupos (por profundidad).

El primer grupo corresponde a Arreglos de Inclusiones Fluidas encontradas en muestras de la mina 3 Vetas II, en estos (Anexo M y Anexo N) se registraron valores promedio de Au variable entre 0.04 y 8.08 ppm, rangos para Ag entre 13.12 y 884.10 ppm, In entre 0.17 y 10.15 ppm y Se entre 44.14 y 482.15 ppm. El Te en este primer grupo de Arreglos de Inclusiones Fluidas, se encontraba bajo el límite de detección. En la Figura 37, se muestra el ejemplo de un pico del Arreglos de Inclusiones Fluidas "T1.2", en este se observa que existe un enriquecimiento de elementos como Ag y Se asociados al pico de cobre, sin embargo, se detecta que también existe un aporte de estos elementos por parte del mineral hospedante (esfalerita), lo que tendría como consecuencia que la concentración registrada pudiese ser más alta que la correspondiente a la inclusión.

El segundo grupo corresponde a Arreglos de Inclusiones Fluidas ubicadas en especímenes de la mina La Fortuna (625 msnm). Los valores promedio registrado para Au es de 5.65 ppm, Ag con 1640.64 ppm, In con 276.83 ppm y Te con 99.5 ppm. En este arreglo, el Se estaba bajo el límite de detección. Además de estos de elementos de interés, se detectó en estas inclusiones un enriquecimiento en elementos como Na, Ca, K, Sr, Cs, Ba y Pb. En todos estos casos no se puede descartar un aporte de elementos por el host, en especial para estos elementos metálicos que también mostraron estar enriquecidos en minerales como esfalerita, pirita y galena.

Asociado a las Arreglos de Inclusiones Fluidas ricas en líquido en calcita (A-T1), no se detectó ningún elemento de interés. Sin embargo, en el Anexo J se muestran los elementos en lo que esta enriquecido este Arreglos de Inclusiones Fluidas, los cuales corresponden a Na, K y Ca.

En la Tabla 6 se resumen los resultados de la ablación laser realizada en los Arreglos de Inclusiones Fluidas (FIA's), considerando sólo las inclusiones con presencia de los elementos mencionados anteriormente.

Muestra	Altimetría	Mineral	FIA's	Min	Au	Ag	In	Te	Se
	msnm				Concentración en partes por millón (ppm)				
BC03C	715	Qtz	A	no	LOD	LOD	0.5	LOD	LOD
B-T1	670	Sph	D	si	LOD	45.1	LOD	LOD	482.6
B-T2	670	Sph	D	si	0.1	63.8	0.2	LOD	LOD
A-T1	670	Cal	E	no	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
A-T2***	670	Sph	D	si	8.1	196.4	7.2	LOD	LOD
A-T3A	670	Sph	D	si	LOD	884.1	10.2	LOD	LOD
A-T3B	670	Sph	D	si	LOD	13.1	0.3	LOD	44.1
T1.2	625	Sph	D	si	5.7	1640.6	276.8	99.50	LOD
BC11-T3	625	Qtz	C	no	LOD	11.1	15.7	LOD	LOD

Tabla 6: Valores promedio obtenidos en diferentes Arreglos de Inclusiones Fluidas para Au, Ag, In, Te y Se. msnm: metros sobre el nivel del mar, LOD: bajo del límite de detección.

Las concentraciones promedio para elementos como Au, Ag, In, Te, Se en minerales opacos, se clasificaron de acuerdo al tipo de mineral en el que se encontraron (Tabla 7). En esta puede verse que, en minerales como piritita, hay enriquecimiento en elementos como Au, Te y Se, La calcopiritita muestra un gran enriquecimiento en Ag, mientras que la esfalerita presenta un enriquecimiento en In y Ag. Minerales como la galena se muestran muy enriquecidas en Ag, Te y otros elementos como Bi, Tl y Sb (Anexo K - en azul). Por otro lado, minerales como cuarzo y calcita no presenta un enriquecimiento metálico importante.

Mineral	Au	Ag	In	Te	Se
	Concentración en partes por millón (ppm)				
Piritita	0.60	2.8	LOD	26.4	33.1
Calcopiritita	0.04	233.2	2.1	1.6	9.5
Esfalerita (blenda)	0.05	19.5	47.1	0.7	11.8
Galena	0.05	319.5	LOD	188.8	11.6
Cuarzo	LOD	0.4	LOD	2.3	LOD
Calcita	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD

Tabla 7: Valores promedio de Au, Ag, In, Te y Se en minerales de mena y ganga. LOD: bajo del límite de detección

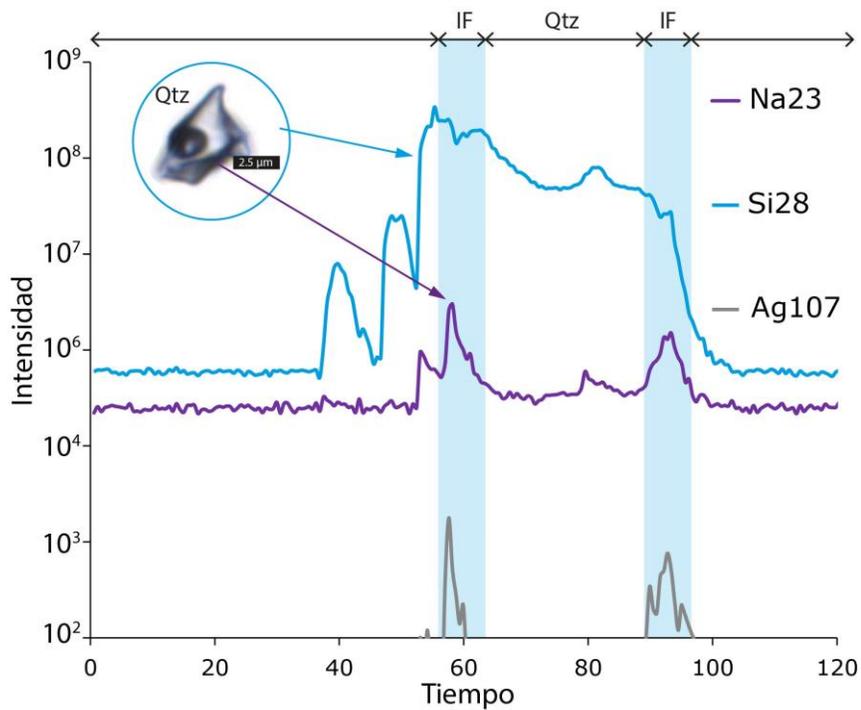


Figura 36: Picos obtenidos con ablación láser, correspondientes a inclusiones secundarias en Arreglos de Inclusiones Fluidas en cuarzo zonal [BC11-T3]. IF: Inclusión Fluida; Qtz: cuarzo.

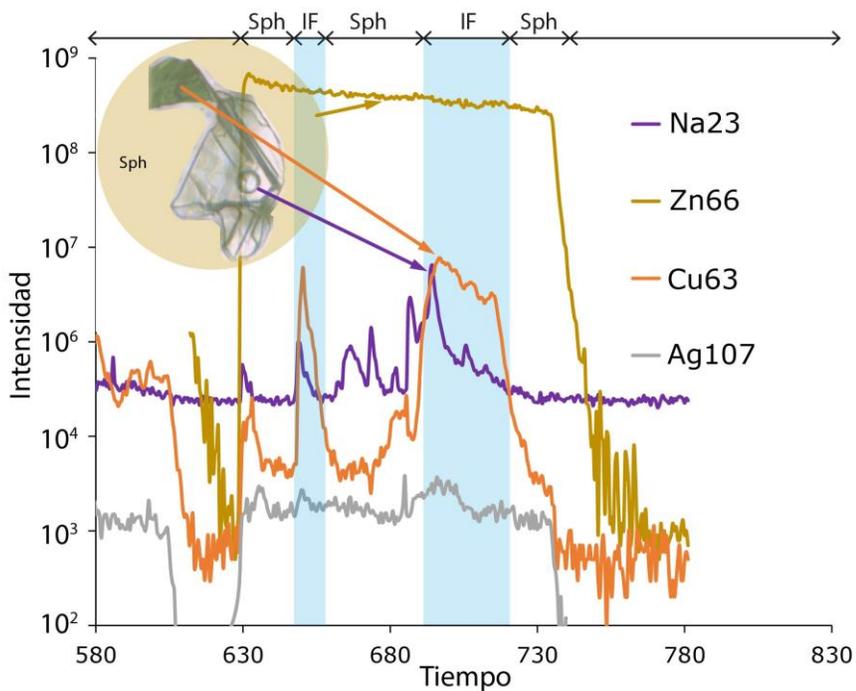


Figura 37: Picos obtenidos con ablación láser, correspondientes a inclusiones primarias en Arreglos de Inclusiones Fluidas en esfalerita [T1.2]. IF: Inclusión Fluida; Sph: Esfalerita.

6. DISCUSIONES

6.1. Geoquímica

La geoquímica de especímenes correspondientes a la veta Leona, indica que en promedio existe enriquecimiento con respecto a la corteza en elementos críticos de In, Te, Se y elementos de Au, Ag, Cu, Cd, Pb, As, Sb, Se, Zn, entre otros. Sin mostrar una variación significativa de tipo lateral (150 m) en las labores en explotación. Sin embargo, se observó una variación en profundidad en elementos críticos y preciosos (Figura 24). Las mayores concentraciones de estos elementos se encontraron a 715 y 670 msnm y menores concentraciones a 625 y 560 msnm. Lo anterior tiene sentido al considerar que, en depósitos de este tipo, los elementos de tipo preciosos tienden a encontrarse en los sectores más superficiales de las vetas.

De manera comparativa, se identificó que las concentraciones más bajas en elementos críticos y preciosos correspondían especímenes clasificados previamente como Brecha I, mientras que las concentraciones más altas correspondían a especímenes de la Brecha II. Esta variabilidad comparativa se representó en un diagrama de cajas y bigotes (Figura 28), en el que puede verse un notorio aumento en diversos elementos (críticos y preciosos) asociado a las Brechas II. En los elementos críticos y preciosos, los casos más notorios estarían representados por Au, Ag, In y Se, llegando a haber variaciones de hasta un orden de magnitud.

La existencia de dos tipos de brechas, sumado a la notoria diferencia en concentraciones de elementos entre estas, permite deducir la existencia de al menos dos eventos hidrotermales en la formación de la veta. De estos eventos, uno habría contribuido con el mayor volumen de mineralización con presencia de elementos críticos y preciosos.

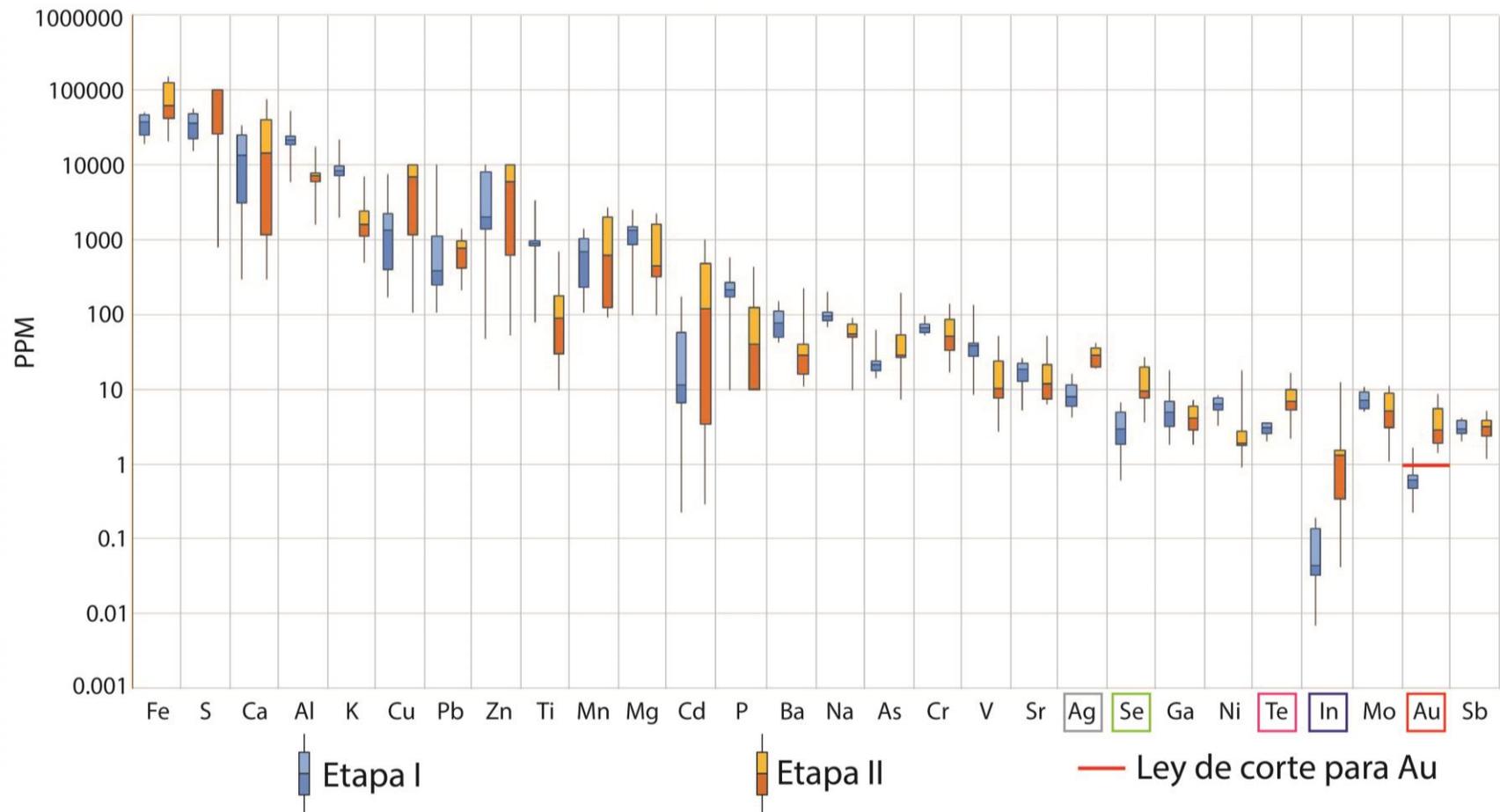


Figura 38: Diagrama de cajas y bigotes comparativo realizado por stage para 28 elementos. La línea roja representa la ley de corte de Au de 1 ppm.

6.2. Petrografía y Paragénesis

Basándose en las relaciones texturales, se definió una secuencia paragenética en la formación de la veta. Como guía se utilizó la información recopilada en terreno y geoquímica realizada en especímenes.

Al analizar el corte transversal en superficie de la veta (Figura 21a), se determinó que esta estaba formada por dos tipos brechas hidrotermales. El mayor volumen de la veta corresponde a brechas ricas en fases en sílice con baja a nula mineralización (Brechas I). Cortando estas y ocupando un volumen aparente 6 veces menor se encontraron brechas con menor fases en sílice y evidente mineralización (Brechas II). Además, se identificó un halo de alteración de alrededor de 1 cm en la Brecha I en el borde en contacto con la Brecha II (Figura 21b). Indistintamente, estas brechas se encontraron cortadas por vetillas posteriores y fracturas rellenas con óxidos de hierro. Los datos anteriores, junto con la geoquímica permiten establecer que las Brechas I aportan menor volumen de mineralización en comparación a las Brechas II que se asocian al mayor volumen de mineralización de la veta.

La evidencia expuesta anteriormente permite deducir que la veta se habría formado por al menos tres eventos. Un primer evento hidrotermal rico en sílice habría formado la veta, un segundo evento habría aportado la gran parte de la mineralización y finalmente en un evento post-mineralización, habría ocurrido fases tardías correspondientes a vetillas de cacita, entre otros y posterior fractura miento y oxidación del sistema. Los detalles deducidos para cada etapa, junto a la secuencia paragenética interpretada se expone a continuación

En la primera etapa de la formación de la veta Leona se identificó únicamente textura de cuarzo rompecabeza, abundante jaspe y mineralización de tipo diseminada de pirita y calcopirita.

En la segunda etapa, se definió una sub-secuencia paragenética a través del análisis de las relaciones de contacto entre las diferentes texturas en cuarzo y su asociación con la mineralización. Para la definición de esta secuencia se consideró que las vetillas crecen de borde a centro y que existen texturas que se desarrollan sobre cristales de cuarzo claros, como el plumoso, de manera independiente a la vetilla. En la Figura 39 se observa parte del borde de una vetilla donde coexisten cuatro texturas. El orden relativo de crecimiento partiría por el borde de la vetilla, donde se identifica (1) cuarzo sub-euhedral. Creciendo sobre este último se encuentran (2) textura coliforme y (3) plumoso, asignándole al plumoso una temporalidad relativa posterior, debido a que rodea parte del cuarzo coliforme. Finalmente, hacia el centro de la vetilla, la última textura en precipitar correspondería a (4) cuarzo rompecabeza, al cual se asociaría la presencia de illita. Esta secuencia es consistente con las Arreglos de Inclusiones Fluidas primarios con inclusiones fluidas ricas en líquido coexistentes con ricas en vapor (tipo 1) y Arreglos de Inclusiones Fluidas con inclusiones secundarias ricas en vapor (tipo 2) encontrados

en cuarzo euهدral, los que indicarían la existencia de ebullición durante la formación del cuarzo sub-euهدral/euهدral y transformación en vapor posteriormente. Esta evidencia se condice con la formación de texturas tipo coliforme y plumoso en niveles superficiales y solo plumoso en profundidad. Esta, además, indica que existieron condiciones adecuadas para la precipitación de minerales de mena.

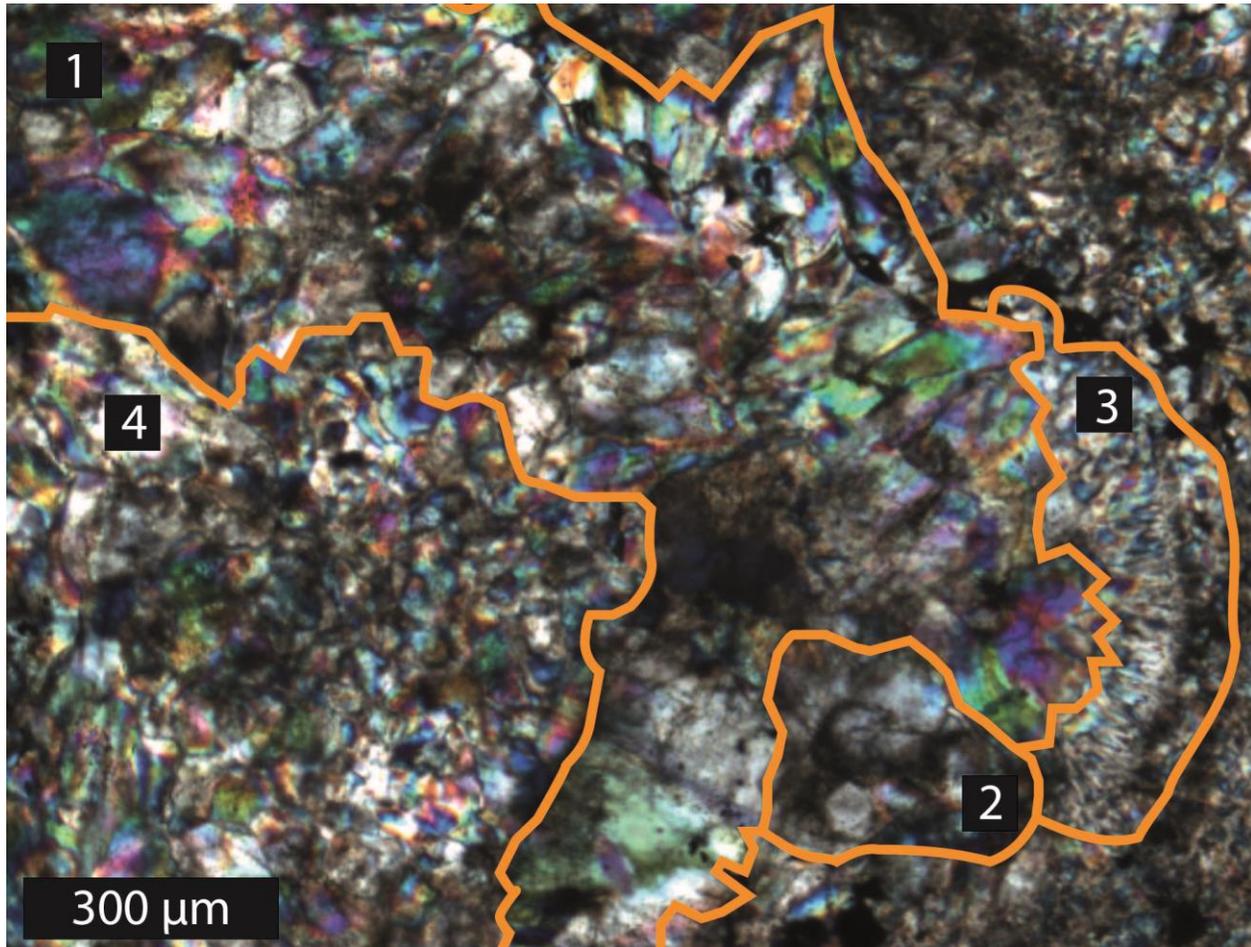


Figura 39: Texturas clave para determinar la paragénesis en cuarzo: 1. Cuarzo subeuهدral; 2. Silica amorfa (coliforme); 3. Cuarzo plumoso; 4. Cuarzo rompecabeza.

Por otra parte, la evidencia recopilada asociada a mineralización metálica estaría vinculada a cuarzo rompecabeza tanto en el primer evento como en el segundo. Para determinar la secuencia de mineralización entre la galena, esfalerita, calcopirita y pirita, se tomaron como referencia muestras donde coexistieran al menos dos de estos minerales (Figura 40). Basado en esto, se determinó que la galena habría sido la primera en formarse, ya que presenta bordes de disolución en contacto con esfalerita (Figura 40b). Luego, se habría formado la pirita, la cual es rodeada por esfalerita y calcopirita (Figura 40a y Figura 40b). Finalmente, habrían precipitado la calcopirita y la esfalerita con textura de exolución de calcopirita (Figura 40c).

Complementario a lo anterior, el análisis *SEM-BSE* detectó la presencia de Au y Ag en pirita. Relacionando co-genéticamente a la pirita con la presencia de metales preciosos como Au y Ag. La importancia de detectar estos metales radica en que algunos de los elementos críticos considerados en este estudio, como Te y Se, precipitan asociados a estos metales preciosos, elemento esencial en la formulación de la hipótesis.

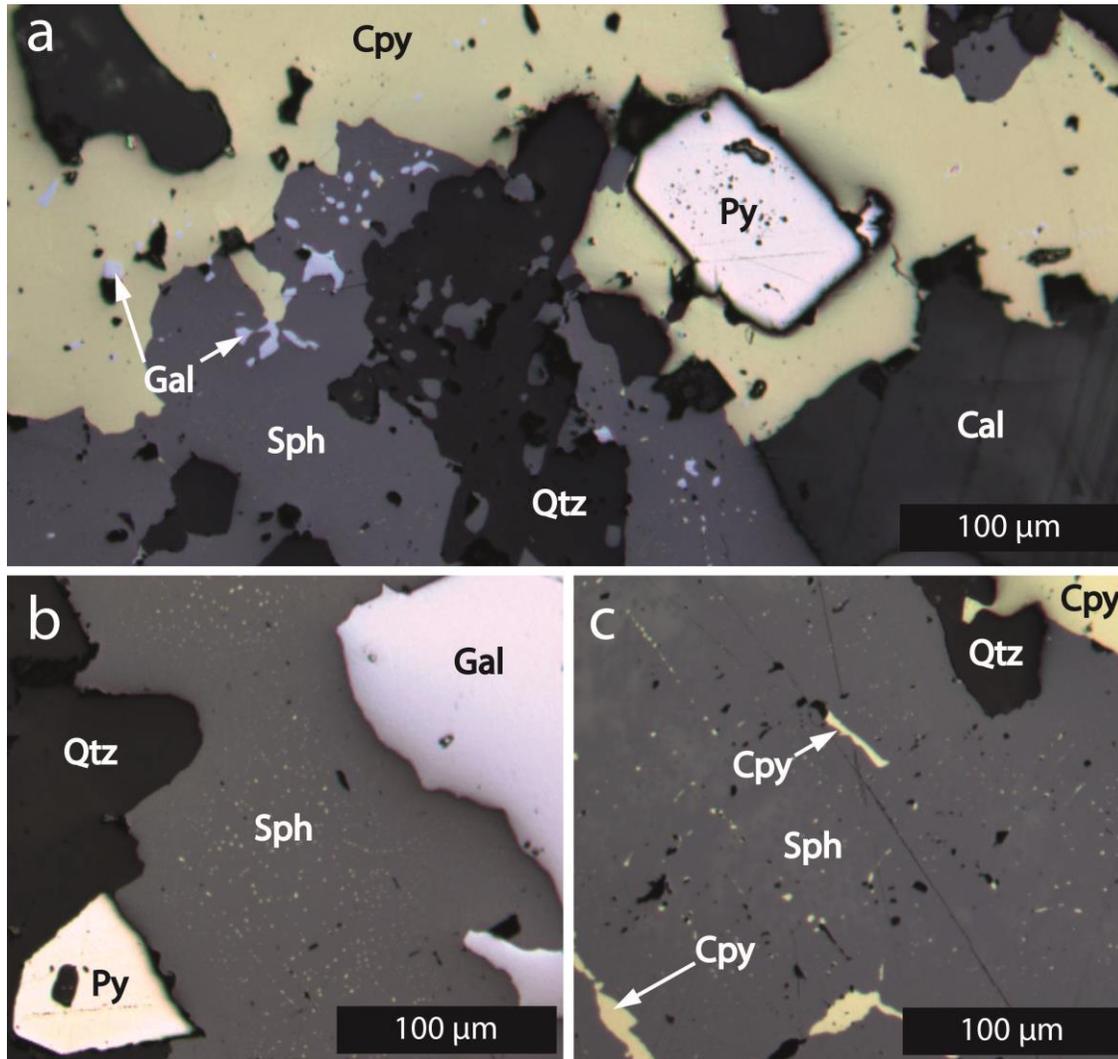


Figura 40: Minerales metálicos de mena y ganga más comunes en la veta. a) Coexistencia de pirita, calcopirita, esfalerita y galena; b) Textura de disolución en galena por esfalerita; Textura de exolución de calcopirita en esfalerita.

Etapas de mineralización

A continuación se detallan las etapas de formación que se pudieron identificar con el uso de las distintas técnicas de estudio ocupadas.

Emplazamiento de la roca caja

Esta primera etapa contempla el emplazamiento de la roca caja, la que está formada por lavas andesíticas de textura porfídica fuertemente alterada producto de los eventos hidrotermales. Sus máficos están alterados a clorita-epidota y las plagioclasas a arcillas. La mineralización encontrada en estas rocas se encuentra rellenando fracturas, lo que sería consecuencia de eventos hidrotermales posteriores.

Evento Pre-mineralizador

Esta etapa se define como el primer evento hidrotermal de la veta La Leona. Tiene como característica general una dominancia de brechas hidrotermales con alto contenido en sílice y bajo contenido metálico, encontrándose solo mineralización de pirita y calcopirita de tipo diseminada en cuarzo (Figura 22b) y una cantidad variable de jaspe en algunas muestras (Figura 22a). El cuarzo tipo rompecabeza es la única textura de cuarzo encontrada en esta etapa, en la cual sólo se hallaron inclusiones muy pequeñas ($<1 \mu\text{m}$) que no pudieron ser catalogadas. En cuanto al análisis geoquímico, este confirma lo anterior, observándose un bajo volumen de mineralización en comparación a la siguiente etapa.

Evento mineralizador (Au-Ag-metales base)

Este segundo evento hidrotermal corresponde al episodio de mayor mineralización encontrado en la veta. Se encuentra formado principalmente por vetillas de cuarzo y brechas hidrotermales ricas en sulfuros. La mineralización encontrada es abundante y varía en profundidad, siendo predominante la presencia de cuarzo y pirita en superficie, gradando a esfalerita, calcopirita y galena hacia las zonas más profundas, con una disminución considerable en la cantidad de cuarzo. Esta característica es confirmada por el análisis geoquímico, en el que se detecta un aumento considerable en la mineralización y una variación de ciertos elementos en profundidad. La secuencia de precipitación de las texturas en cuarzo son primero cuarzo sub-euhedral/euhedral, cuarzo colofome, cuarzo plumoso y finalmente cuarzo rompecabeza.

En esta etapa primero habría ocurrido la formación de cuarzo subeuhedral y euhedral bajo condiciones de ebullición (Arreglos de Inclusiones Fluidas A). Luego, habría precipitado cuarzo colofome y plumoso en niveles superficiales y sólo plumoso en profundidad. Estas texturas posteriores evidencian condiciones de ebullición, pudiendo estar relacionadas a una rápida transformación en vapor hallado en cuarzo euhedral, como inclusiones secundarias (Arreglos de Inclusiones Fluidas B). Finalmente,

se habría formado cuarzo tipo rompecabeza en presencia de illita. A esto último, se asociaría la mineralización de tipo metálica.

El orden relativo de precipitación deducido correspondería a galena, pirita y calcopirita-esfalerita. Respecto de este último mineral, la esfalerita, destaca el hallazgo de Arreglos de Inclusiones Fluidas primarias ricas en líquido (Arreglos de Inclusiones Fluidas D) con presencia de mineralización, lo que junto con la evidencia encontrada de Au-Ag en pirita, representan información clave para establecer que los elementos críticos asociados a minerales preciosos habrían comenzado con la precipitación de pirita en cuarzo rompecabeza.

Evento Postmineralización

Este último evento se relaciona con la finalización del evento hidrotermal. En esta etapa post mineralización se forman texturas como cuarzo zonal en espacios abiertos, con presencia de inclusiones secundarias ricas en líquido (Arreglos de Inclusiones Fluidas C) y relleno de calcita rómbica en fracturas y espacios abiertos con inclusiones ricas en líquido (Arreglos de Inclusiones Fluidas E). Luego, el sistema habría sufrido un metamorfismo de bajo grado, formándose minerales como clorita y epidota, los que se encuentran alterando y rellenando fracturas posteriores a las vetillas de calcita. Finalmente, habría ocurrido un proceso de oxidación y fracturamiento de la veta, el que estaría asociado a un proceso de enriquecimiento supergeno.

En la Figura 41, se resume la secuencia paragenética previamente descrita. En esta se detalla la secuencia mineral y textural, junto a los tipos de inclusiones encontrados en cuarzo, esfalerita y calcita.

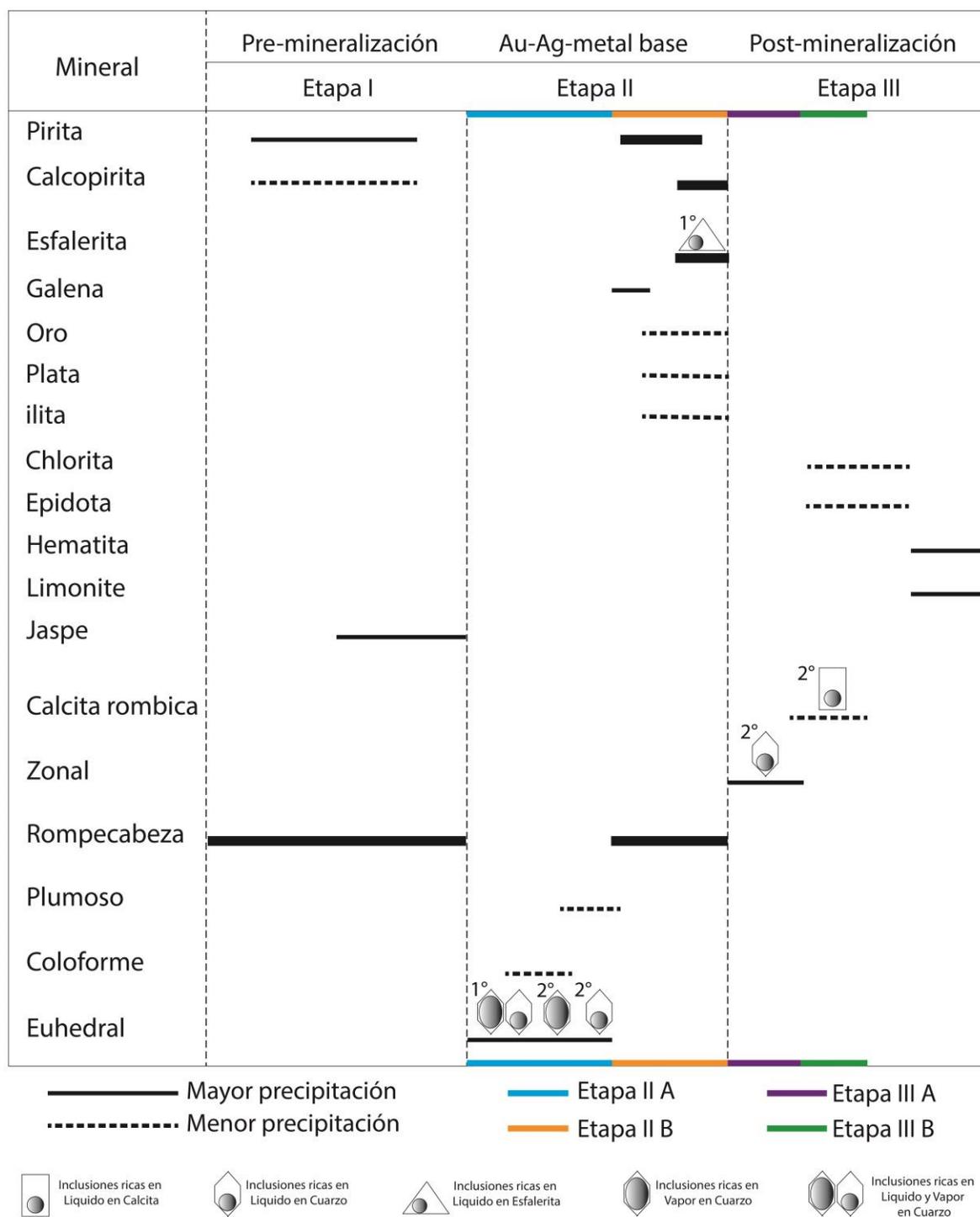


Figura 41: Paragénesis de la veta Leona. En esta se representa los tres eventos principales de mineralización, siendo el segundo el que presentó mayor volumen de mineralización y presencia de metales preciosos.

6.3. Evolución del fluido

La microtermometría realizada en cuatro de los cinco tipos de Arreglos de Inclusiones Fluidas permitió determinar las temperaturas de homogeneización y salinidades de las inclusiones. Esta información fue la base para determinar parte de las condiciones PT (Presión – Temperatura) mínimas de atrapamiento en el sistema epitermal.

La salinidad fue calculada usando la regresión propuesta por Bodnar (1992), obteniéndose salinidades promedio entre 0.7 y 12.6% en peso NaCl eq. Estos rangos son consistentes con salinidades encontradas en depósitos epitermales Au-Ag-Metales base, las que van entre 3.5 y 12% en peso NaCl eq (Albinson et al., 2001).

Debido a que más de la mitad de las Arreglos de Inclusiones Fluidas fueron hallados en esfalerita, fue necesario establecer una temporalidad relativa entre estos. La temporalidad propuesta considera como supuesto una disminución en la salinidad a medida que evoluciona el fluido. El supuesto se sustenta en la existencia de correlación positiva entre salinidades locales altas, como consecuencia de la evaporación y desecación en sistemas hidrotermales (Simmonds y Browne, 1997; Albinson et al, 2001). Un ejemplo de esto, ocurre en el depósito epitermal de Au-Ag-metales base de Waihi, donde se detecta una correlación entre la dilución salina, con respecto a la temporalidad y superficialidad, producto de una mezcla con aguas meteóricas (Brathwaite y Faure, 2002).

En la veta Leona, se detectó que los Arreglos de Inclusiones Fluidas A-T3A y A-T3B en esfalerita (Figura 32), muestran una baja en la salinidad de 10.4% a 1.6% en peso NaCl eq., al considerar como referencia el crecimiento mineral. Este supuesto toma sentido considerando que previo a la formación de esfalerita hay evidencia de ebullición. La ebullición hace que el líquido remanente aumente su salinidad, ya que el vapor escapa sin sales.

Tal como Díaz (1986) y Munzenmayer (2002) se toma como supuesto que existió mezcla de fluidos magmáticos con aguas meteóricas en Chancón. Finalmente, se propone ordenar los Arreglos de Inclusiones Fluidas en esfalerita de mayor a menor salinidad.

La Figura 42 muestra de forma comparativa la temperatura de homogeneización (T_h) y la temperatura del último fundido (T_m), ordenados de acuerdo a la secuencia paragenética y lo deducido anteriormente. Como primera aproximación de la evolución del fluido, se observa que en la Etapa II existe una tendencia a la disminución en la temperatura y salinidad a medida que se acerca el final de esta etapa, con excepción de los Arreglos de Inclusiones Fluidas T1.2, que presentan temperaturas más altas y corresponden a una muestra de mayor profundidad.

Aunque no se detectó una relación directa entre profundidad y salinidad, se consideró que mientras mayor sea la profundidad, la influencia de aguas meteóricas sería menor. Esto, sumado a la mayor presencia de metales base en labores ubicadas a 625 y 560 msnm y la relación existente con el transporte como complejos clorurados (Figura 6), explicarían el aumento en la salinidad de hasta un 12.6%. Sin embargo, este supuesto debe ser tomado con cautela, ya que el desnivel entre las labores estudiadas es escaso como para afirmar la ocurrencia de este fenómeno a mayor profundidad.

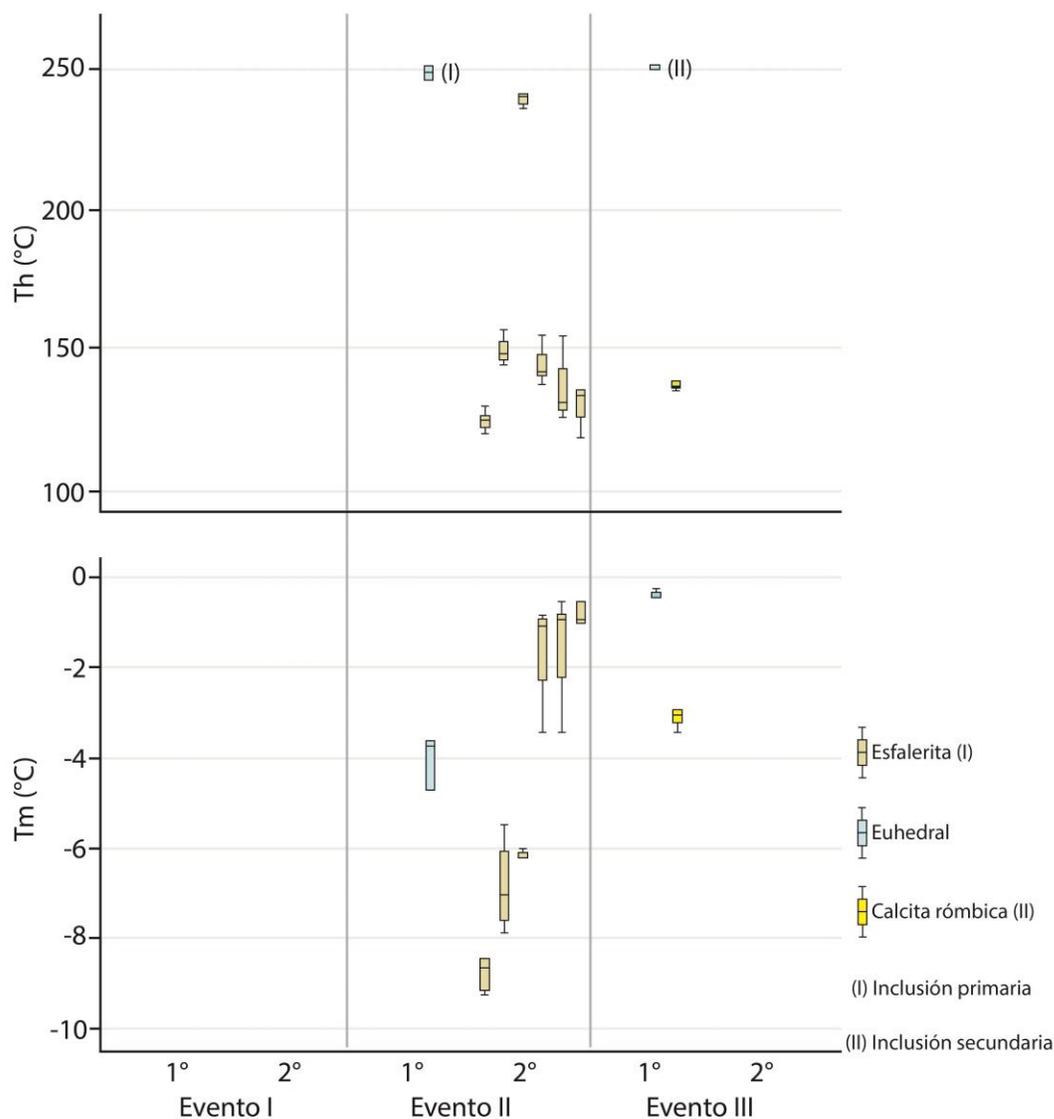


Figura 42: Diagrama de cajas y bigotes T_m y T_h ordenados por stages para los 9 Arreglos de Inclusiones Fluidas medidos

Con ablación láser se detectaron concentraciones de K y Ca en inclusiones que en promedio eran menores a las de Na (Anexo J). Por otro lado, análisis Raman indicó que sólo en los Arreglos de Inclusiones Fluidas secundarias en cuarzo zonal (tipo C) se

encontraron presiones de CO₂ de 39.68 bar, lo que corresponde a presencia de CO₂ en inclusiones tipo C del evento Post-mineralización. Por lo tanto, la presencia de este gas no se consideró representativa en el sistema, por lo que para determinar las condiciones PT (Presión – Temperatura) mínimas se tomó como supuesto el sistema simplificado de tipo binario H₂O – NaCl.

Para establecer las condiciones de atrapamiento de las inclusiones, se graficaron las curvas líquido-vapor del agua a salinidades de 2, 5, 10 y 15% en peso NaCl. Los datos para graficar estas curvas fueron extraídos de Haas (1971). Luego, se plotearon las isócoras correspondientes a las temperaturas y presiones más representativas. Lo anterior fue realizado utilizando el software creado por *Zhenhao Duan Research Group* (Wagner y Prub, 2002; Duan y Zhang, 2006).

Con la información disponible en el diagrama obtenido (Figura 43), se determinaron las condiciones del fluido, las que corresponderían a ebullición. Las presiones (P_h) obtenidas en los Arreglos de Inclusiones Fluidas se encuentran entre los 2.13 y 39.35 bar. Los valores exactos de estas condiciones obtenidas se muestran en la Tabla 8.

En Arreglos de Inclusiones Fluidas A, asociadas a ebullición, se calculó la presión de formación intersectando las isócoras a las curvas líquido - vapor de acuerdo a su composición (Figura 43), donde se obtuvo una presión de atrapamiento de 38 bar, lo que indicaría una profundidad de formación del depósito de 420 metros bajo la paleosuperficie. Estas condiciones, que habrían estado presentes en fracturas abiertas hacia la superficie (ebullición), fueron determinadas basadas en inclusiones ricas en líquido coexistiendo con ricas en vapor, donde la temperatura de homogenización es igual a la temperatura de atrapamiento.

La propuesta de la evolución del fluido se desprende de la paragénesis y las condiciones PTX (Presión – Temperatura – Composición) mínimas de atrapamiento. Esta propuesta se muestra en la Figura 43 y Figura 44. La evolución es estimada desde el evento de mineralización Au-Ag-metales base, iniciándose (1) con una separación de fases (ebullición) a una temperatura y presión de 250° C y 38 bar respectivamente. Posteriormente, (2) a mayor profundidad habría comenzado la mineralización a una temperatura y presión mínima aproximada de 250° C y 30 bar. Luego, (3) producto de una mezcla de aguas meteóricas en niveles más someros, habría ocurrido una dilución y baja progresiva en la temperatura. La siguiente etapa, (4) corresponde a un evento mineralizador tardío (evento Post-mineralización) ocurrido en profundidad y que tendría temperaturas y presión mínimas aproximadas de 250° C y 40 bar. Finalmente, (5) ocurre un evento post-mineralización de calcita a baja presión y temperatura.

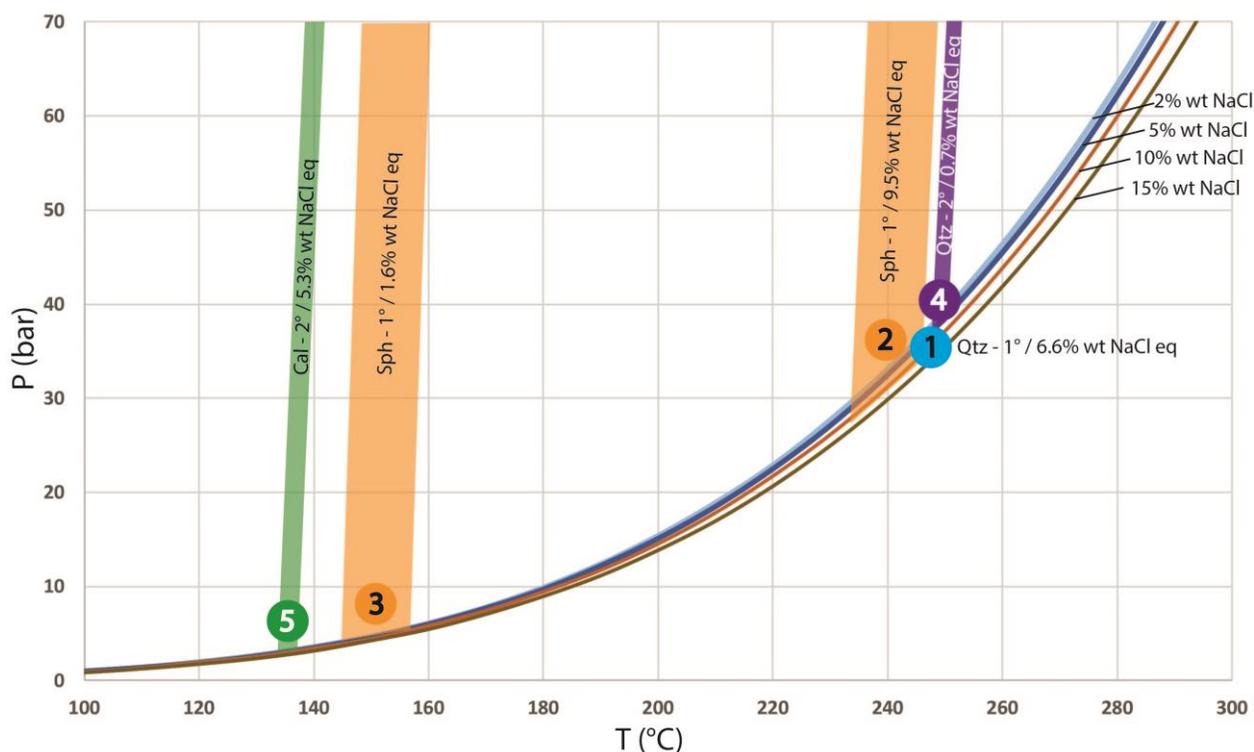


Figura 43: a) Curvas líquido – vapor para salinidades de 2, 5, 10 y 15% en peso NaCl. Las líneas verticales representan las isocoras calculadas para cada Arreglos de Inclusiones Fluidas, mientras que los círculos enumerados representan la secuencia PT mínimas seguidas por el fluido, la doble flecha indica que no determinaron las condiciones de atrapamiento. Diagrama realizado en base a Wagner y Prub (2002); Duan y Zhang (2006).

Muestra	Altimetría	Host	Arreglos de Inclusiones Fluidas	Min	T _h °C	%en peso NaCl eq	P _h bar
BC03C	715	Qtz	A	no	248	6.6	38
B-T1	670	Sph	D	si	144	2.9	4
B-T2	670	Sph	D	si	135	2.8	3
A-T1	670	Cal	E	no	137	5.3	3
A-T2	670	Sph	D	si	125	12.6	2
A-T3A	670	Sph	D	si	149	10.4	4
A-T3B	670	Sph	D	si	129	1.6	2
T1.2	625	Sph	D	si	239	9.5	30
BC11-T3	625	Qtz	C	no	250	0.7	39

Tabla 8: Resumen de los valores obtenidos de salinidad (% en peso NaCl eq) y presiones mínimas para cada FIA's. La presión obtenida en BC03C corresponde a la presión efectiva, mientras que en el resto corresponde a la presión mínima estimada.

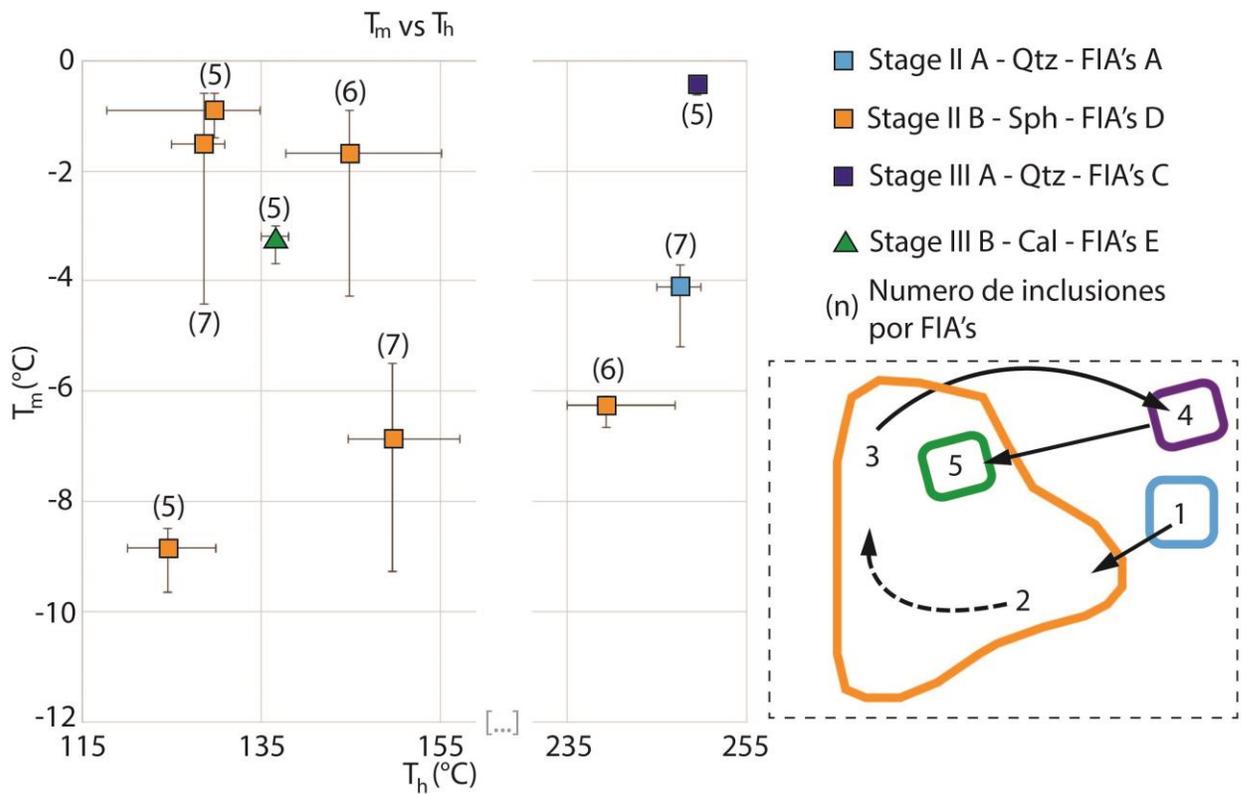


Figura 44: Diagrama T_h vs T_m mostrando el camino seguido por el fluido durante su evolución, el que se resume a la derecha. Paréntesis indica número de inclusiones.

6.4. Enriquecimiento metálico

Kelley y Spry (2016) indican que los depósitos emplazados en rocas volcánicas de signatura alcalina altas en K, presentan condiciones ideales para concentrar elementos críticos y otros metales traza. Sin embargo, el volcanismo presente en este sector es de signatura calcoalcalina alta en K, permitiendo suponer que el enriquecimiento en estos elementos no sólo estaría restringido a magmas de signatura alcalina, guardando posiblemente algún tipo de relación con el K. Los magmas de tipo calcoalcalinos, característicos en diversos depósitos metálicos de origen hidrotermal, junto a la subducción, son un factor relevante en el contenido y concentración metálica de estos magmas (Maksaev et al., 2007), pudiendo ser una característica importante en la concentración de elementos críticos o trazas

El transporte de metales como Au, Ag, Te y Se ocurre en condiciones de temperaturas $<300^{\circ}$ C, fugacidad de oxígeno (f_{O_2}) variable entre -20 y -40, pH neutro – alcalino y como complejo sulfurado, sin embargo, no se debe descartar la participación de complejos clorurados en el transporte metálico de estos elementos, producto de las altas salinidades detectadas en algunas inclusiones fluidas.

Por otro lado, el transporte de In ocurre preferentemente como clorurado y su ocurrencia suele asociarse a minerales de Zn como la esfalerita. Por lo que la ocurrencia de este elemento en la veta Leona permite suponer que el transporte metálico como complejo clorurado juega un factor relevante en este depósito.

La evidencia hallada en la veta Leona permite delimitar algunas de las condiciones físico-químicas del fluido mineralizador. A nivel superficial, se encontró illita en cuarzo rompecabeza y presencia de sílice amorfa, que evidencia, aunque no en manera suficiente, que el sistema se encontraba en condiciones neutras - alcalinas según el diagrama de fase en Au (Figura 3). El enriquecimiento en pirita, permite situar al sistema en condiciones de fugacidad de oxígeno (f_{O_2}) inferior a -40. Parámetros como la actividad de azufre (a_s), actividad de cloro (a_{Cl}), entre otros, no pudieron ser determinados por ausencia de evidencia mineralógica. Sin embargo, se halló que los Arreglos de Inclusiones Fluidas con mayor salinidad mostraron una tendencia a concentrar más metales, que las con menos salinidad.

Estas condiciones permiten suponer que el transporte metálico habría ocurrido por participación de complejos sulfurados, sin descartar la participación de complejos clorurados. La mineralización metálica habría ocurrido por desestabilización de estos complejos, producto de una caída abrupta en la presión y baja en la temperatura. Esto habría sido consecuencia de un fracturamiento hidráulico, teniendo como consecuencia la ebullición y evaporación rápida en el sistema. El ascenso del fluido y la descarga metálica por parte de complejos clorurados, junto a la suposición de una posible mezcla con aguas meteóricas, habrían producido una dilución y una baja en la temperatura de los fluidos en sectores más someros.

Se integró la evidencia textural y de inclusiones junto al análisis químico realizado en profundidad. En la Figura 45 se resumen las texturas y tipo de inclusiones encontradas a lo largo (SW a NE) y en profundidad de la veta, considerando exclusivamente en ambos casos, concentraciones promedio para Au, Ag, In, Te y Se. A lo largo de la veta no existe una zonación lateral clara, sin embargo, en profundidad se observa una variación de los elementos metálicos de interés, notando que existe un incremento metálico entre los 670 y 625 msnm, lo que estaría condicionado por la alta presencia de esfalerita en estas muestras. En profundidad, se visualiza una tendencia a la disminución de estos elementos metálicos, lo cual es esperable en este tipo de depósitos. Además, se ve que el cuarzo rompecabeza está presente en todos los niveles, mientras que texturas indicadoras de ebullición se hallan tanto en superficie como en profundidad, siendo esto respaldado con la presencia de Arreglos de Inclusiones Fluidas con evidencia de evaporación y transformación rápida en vapor, Indicando que aún no se ha llegado a la base de la zona de ebullición. Según indican Bodnar et al (1985) y numerosos autores, esta evidencia es una característica favorable para la formación de mineralización en epitermales.

La evidencia de incremento metálico detectado por geoquímica en muestras de esfalerita, también se replica en otro tipo análisis, como el de ablación laser, donde se encuentran inclusiones primarias con mineralización de calcopirita en esfalerita (Arreglos de Inclusiones Fluidas D). Esta calcopirita presenta concentraciones promedio de hasta 8 ppm de Au, 1640 ppm de Ag, 276 ppm de In y 483 ppm de Se. Sin embargo, aunque es evidente el aumento de la concentración de estos elementos en la inclusión, existe un aporte variable dependiendo del elemento por parte del mineral hospedante (esfalerita). Esta variabilidad va entre un 4 y 11% para la Ag, entre un 13-21% para el Se y 27-58% para indio, sin detectarse un aporte de Au o Te en esfalerita (Anexo L). Este aporte puede verse de manera gráfica para el In y Se en Anexo M y Anexo N.

La Figura 46 muestra las concentraciones de Au, Ag, In y Se, ordenadas según la secuencia paragenética de la veta y la temporalidad propuesta en esfalerita. Se observa que el mayor volumen de mineralización ocurrió durante la segunda parte del evento Au-Ag-metales base. Además, se logra desprender que el primer elemento en precipitar habría sido el Au, debido a su asociación directa a pirita. Luego, habría precipitado In vinculado a esfalerita y a calcopirita, seguido de Ag relacionada a calcopirita, donde finalmente se habría supuesto la precipitación de Se asociado a calcopirita hacia final de este evento.

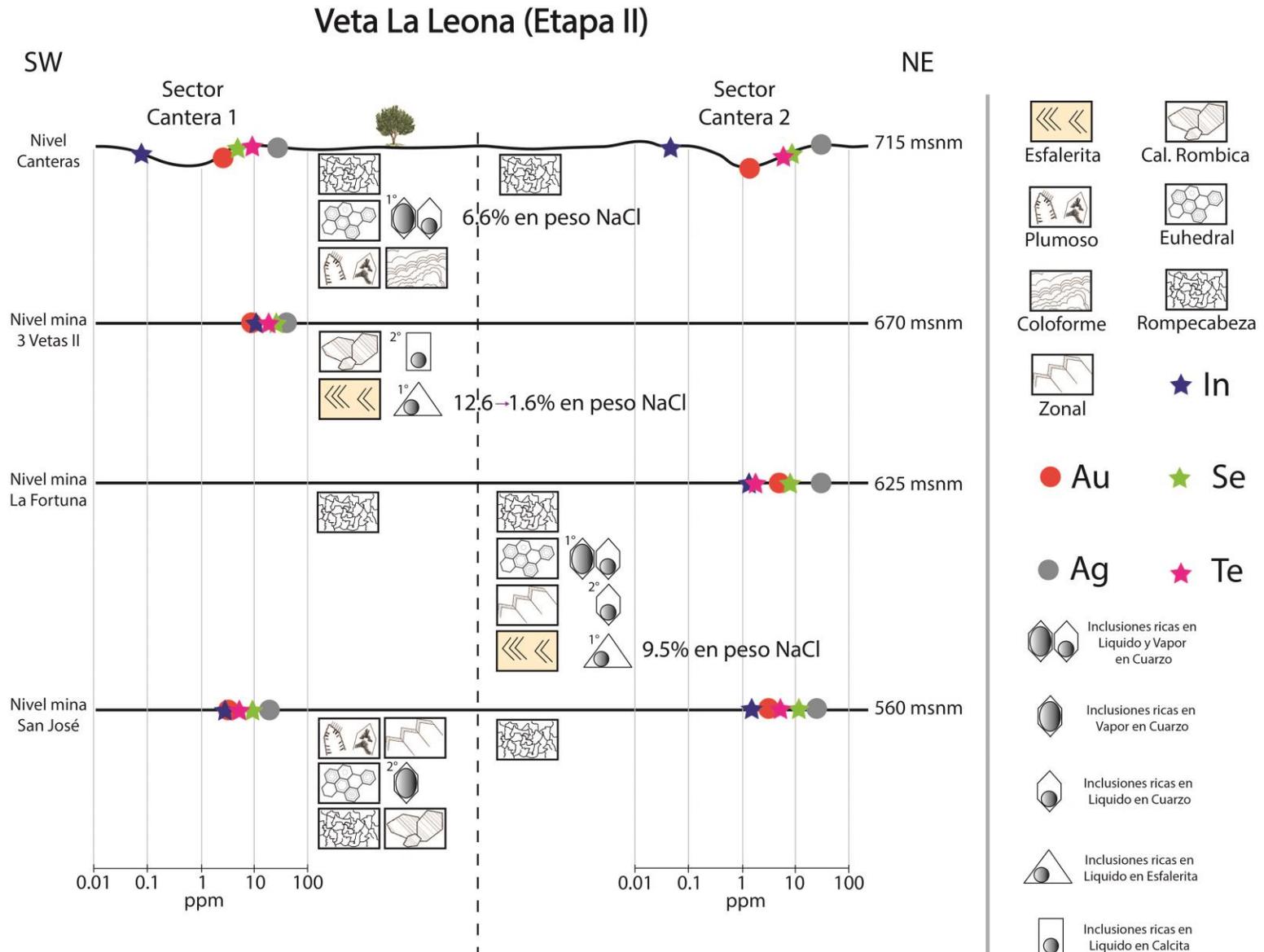


Figura 45: Diagrama resumen en profundidad mostrando las principales texturas, tipos de inclusiones y concentraciones de los elementos explorados de interés.

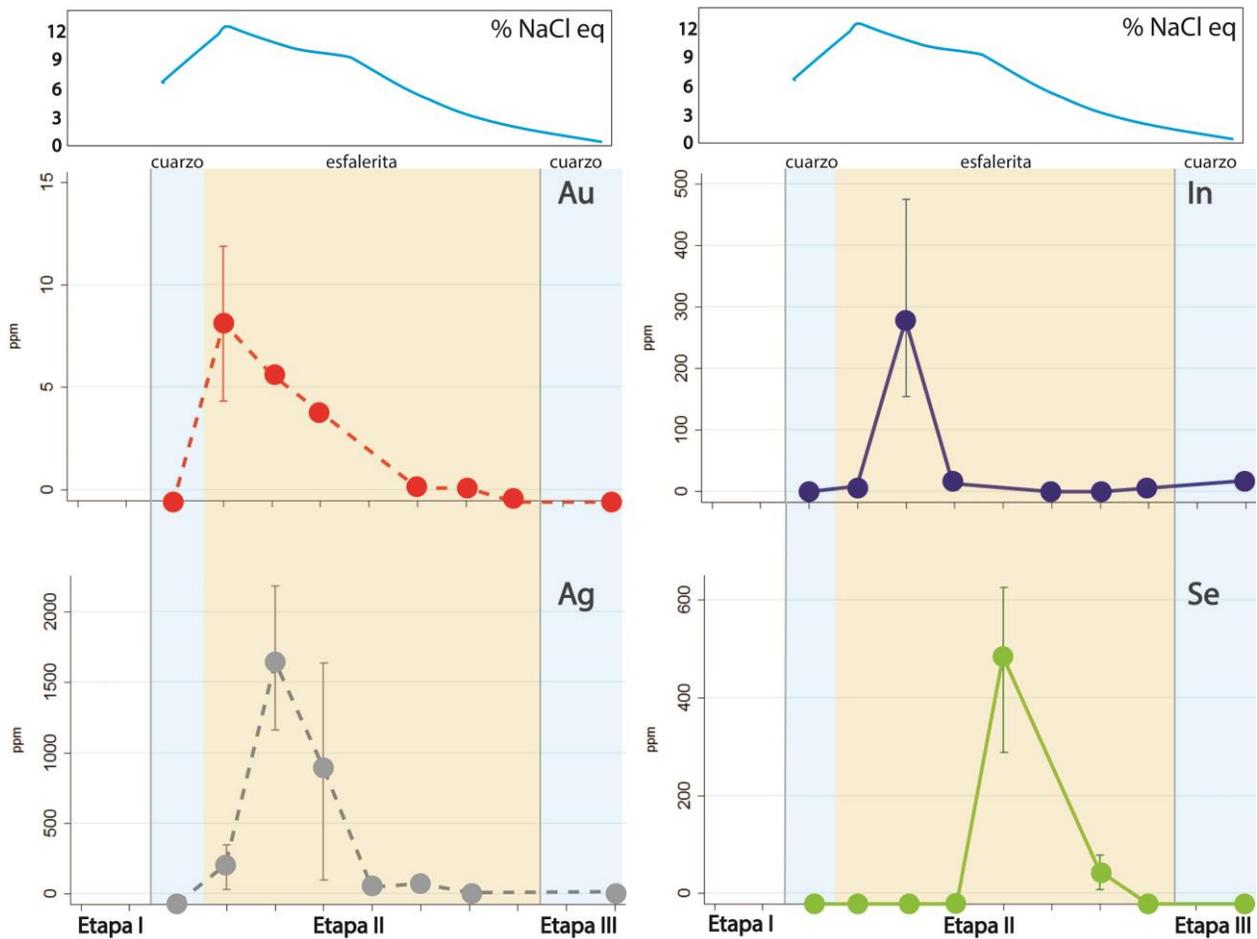


Figura 46: Concentraciones de Au, Ag, In y Se obtenidas por LA-ICPMS para cada Arreglos de Inclusiones Fluidas, ordenadas por la paragénesis.

Este resultado con altas concentraciones de Au, Ag, In y Se debe ser tomadas con precaución debido a que, al realizar una comparación con concentraciones obtenidas en roca total se infiere que, si bien el fluido mineralizador estaba enriquecido en estos elementos, posiblemente no tenía el volumen o las concentraciones suficientes como para enriquecer aún más la veta Leona.

6.5. Comparación con otros depósitos

El Te comúnmente se encuentra en depósitos epitermales de oro asociado a rocas de tipo alcalinas que usualmente son encontradas en vetas, este también puede estar diseminado en la roca caja adyacente (Kelley y Spry, 2016). Aunque no existe presencia de rocas alcalinas en Chancón y no se puede asegurar la asociación de telurio a la roca caja adyacente, este elemento sí se encontró en la veta Leona.

Considerando la geoquímica obtenida en especímenes, se comparó la concentración de Te encontrada en Chancón con otros 6 depósitos epitermales (Figura 47). Esta comparación mostraría que Chancón presentaría concentraciones no despreciables para este elemento desde el punto de vista cualitativo, único análisis que permite la densidad de muestreo del estudio.

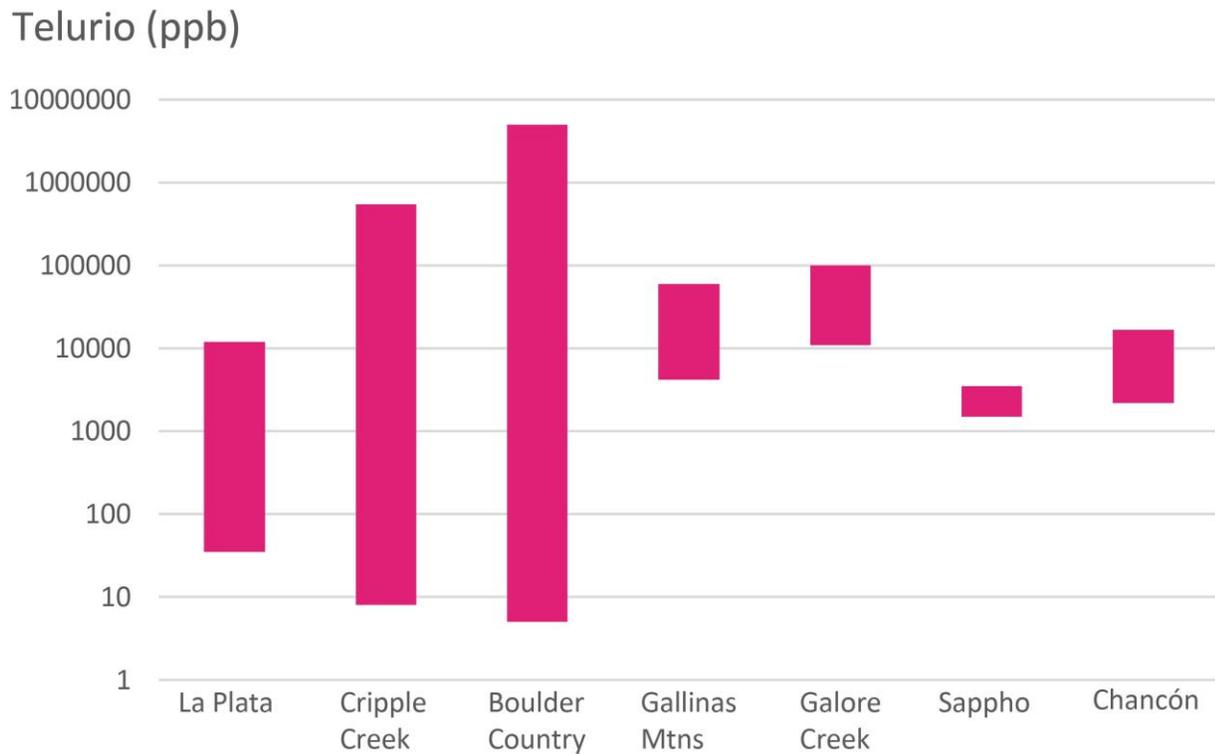


Figura 47: Comparación de concentraciones de telurio de otros depósitos y Chancón (Modificado de Kelley y Spry, 2016).

7. CONCLUSIONES

El propósito de este estudio consistió en caracterizar los fluidos mineralizadores asociados a elementos críticos como In, Te, Se y metales preciosos como Au y Ag en la veta Leona, perteneciente al distrito de Chancón. Este depósito se eligió ya que corresponde a un sistema epitermal de baja sulfuración ubicado en la Cordillera de la Costa de Chile central, emplazado en rocas volcánicas de signatura calcoalcalina ricas en K, del Cretácico Superior.

En las labores de veta Leona se identificó una zonación mineral en profundidad típica de depósitos epitermales de oro-plata-metales base. En su superficie (715 msnm) se encuentra abundante cuarzo en presencia de illita con mineralización de pirita, mientras que en profundidad (670 y 560 msnm) se encontró clorita-epidota, con mineralización de calcopirita, esfalerita y galena.

En esta investigación, se identificaron tres grandes etapas de mineralización en la formación de la veta: (1) etapa Pre-mineralización caracterizada por cuarzo, pirita y calcopirita; (2) etapa de mineralización (Au-Ag-metales base) caracterizada por un enriquecimiento de Au-Ag en cuarzo, pirita y calcopirita, siendo importante además la presencia de illita en superficie y esfalerita-galena en profundidad. Junto a arreglos de inclusiones fluidas (Arreglos de Inclusiones Fluidas) y texturas en cuarzo características de ambientes de ebullición como cuarzo colofome en superficie y cuarzo plumoso en superficie y profundidad. Finalmente, (3) etapa Post-mineralización caracterizado por mineralización de cuarzo, calcita en vetillas y posterior clorita-epidota.

La evidencia petrográfica apunta a la existencia de cinco grupos de Arreglos de Inclusiones Fluidas. Dos de estos, indican la presencia de ebullición en superficie y profundidad (625 y 560 msnm), temperaturas de atrapamiento de alrededor de 250° C, salinidades de 6.6% en peso NaCl eq y una presión hidrostática de alrededor de 38 bares, indicando una profundidad de 420 metros bajo la paleosuperficie. Un tercer grupo de Arreglos de Inclusiones Fluidas en esfalerita con mineralización de calcopirita señalan una evolución del fluido hacia una disminución en la salinidad de 12.6 a 1.6% en peso NaCl eq. y una tendencia a la disminución en la temperatura producto de una hipotética mezcla con aguas meteóricas en sectores más superficiales, sin poder acotarse una presión de atrapamiento por ausencia de un geobarómetro adecuado. Un cuarto y quinto grupo de Arreglos de Inclusiones Fluidas indican la ocurrencia de un evento hidrotermal tardío con temperaturas mínimas de unos 250° C, salinidades de 0.7% en peso NaCl eq. y presiones de al menos 40 bares, seguido de un último evento de calcita rellenando fracturas a temperaturas de 137° C y salinidades de 5.3% en peso NaCl eq.

El análisis geoquímico en roca total para 62 elementos indica concentraciones para In entre 0.04 y 12.5 ppm, Te entre 2.2 y 11 ppm y Se entre 3.7 y 22.8 ppm. A su vez, el análisis con ablación laser realizado en inclusiones fluidas en esfalerita con mineralización de calcopirita, indican rangos de concentraciones para In entre 0.2 y 276.8 ppm, Se entre 44 y 483 ppm y Te entre 0 y 100 ppm. Adicionalmente, las concentraciones

para Au van desde 0 hasta 8 ppm y Ag de 13 a 1641 ppm. En todas estas se detectó un aporte de elementos por parte de la esfalerita, siendo el indio el elemento con mayor aporte en la inclusión en comparación al selenio. Por otro lado, en inclusiones fluidas en cuarzo sólo se encontraron concentraciones promedio de Ag de 11 ppm.

Las salinidades detectadas, junto a concentraciones importantes de Au, Ag, In y Se, junto a presencia de illita, sílica amorfa y pirita, sumada a la evidencia petrográfica en inclusiones fluidas, sugieren que el transporte metálico habría ocurrido como complejo sulfurado y clorurado en condiciones de pH neutro - alcalino, fugacidad de oxígeno (f_{O_2}) inferior a -40 y temperaturas de alrededor de 250° C. Posteriormente, al desestabilizarse este fluido habría ocurrido la mineralización de elementos críticos y preciosos.

Adicionalmente, este estudio permitió detectar una zonación metálica de Au, Ag, In, Te y Se de superficie a profundidad, mostrando concentraciones de hasta un orden de magnitud en labores a niveles intermedios (670 msnm) en comparación a concentraciones halladas en labores a niveles profundos (560 msnm). Sin embargo, evidencia de ebullición en texturas e inclusiones fluidas en profundidad indican que aún no se llega al horizonte de ebullición. Según Bodnar et al. (1985); Moncada et al. (2012); Moncada et al. (2017), esta evidencia es una característica favorable para la formación de mineralización en sistemas epitermales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Adam, S. F. (1920). A microscopic study of vein quartz. *Economic Geology*, 15, 623-664.
- Akinfiyev, N. N. & Tagirov, B. R. (2006). Effect of Selenium on Silver Transport and Precipitation by Hydrothermal Solutions: Thermodynamic Description of the Ag-Se-S-Cl-O-H System. *Geology of Ore Deposits*. 402-413p.
- Albinson, T., Norman, D. I., Cole, D. & Chomiak, B. (2001). Control on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: constraints from fluid inclusion and stable isotope data. *Society of Economic Geologist Special Publication*. Vol. 8: 1-32p.
- Alderton, D. H. & Fallick, A. E. (2000). The Nature and Genesis of Gold - Silver - Tellurium Mineralization in the Metaliferi Mountains of Western Romania. *Economic Geology* Vol. 95: 495-516p.
- Alfantazi, A., & Moskalyk, R. (2003). Processing of indium: a review. *Mineral Engineering*. Vol. 16: 687-694p.
- Andre-Mayer, Leroy, J., Bailly, L., Chauvet, A., Marcoux, E., Grancea, L. & Rosas, J. (2002). Boiling and vertical mineralization zoning: a case study from the Apacheta low-sulfidation epithermal gold-silver deposits, southern Peru. *Mineralium Deposita*. Vol 37(5): 452-464p.
- Baker, T., Mustard, R., Brown, V., Pearson, N., Stanley, C. R., Radford, N. W. & Butler, I. (2006). Textural and chemical zonation of pyrite at Pajingo: A potential vector to epithermal gold veins. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. Vol 6: 283-293p.
- Belevantsev, V. I., Peshchevskii, B. I. & Shamonskaya, G. I. (1981). Gold (I) complexes in aqueous solution. *Invest. Sib. Otd. Akad. Nauk SSSR, Ser. Khim.* Vol 1: 81-87p.
- Bodnar, R. J., Reynolds, T. J. & Kuehn, C. A. (1985). Fluid-inclusions systematics in epithermal systems. *Reviews in Economic Geology*. Vol 2: 73-97p.
- Bodnar, R. J. & Sterner, S. (1985). Synthetic fluid inclusions in natural quartz. II. Application to PVT studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 49: 1855-1859p.
- Bodnar, R. J. (1992). The system H₂O-NaCl. PACROFI IV. 108-111p.
- Bodnar, R. J., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D. & Steele-MacInnis, M. (2014). Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits. H. Holland and K. Turekian, *Treatise on Geochemistry*. Vol 13: 119-142p.
- Brathwaite, R. & Faure, K. (2002). The Waihi Epithermal Gold-Silver-Base Metal Sulphide-Quartz Vein System, New Zealand: Temperature and Salinity Controls on Electrum and Sulfide Deposition. *Economic Geology*. Vol. 97: 269-290p.
- BGS (2017). World Mineral Production 2011-15. British Geological Survey. 96p.
- Bravo, P. (2001). Geología del borde oriental de la Cordillera de la Costa entre los ríos Mataquito y Maule, VII Región. Thesis, Universidad de Chile, Santiago, 113p.
- Brown, R. (1986). Gold deposition from geothermal discharges in New Zealand. *Economic Geology*. Vol 81(4): 997-983p.

- Brugger, J., Etschmann, B., Grundler, P., Liu, W., Testemale, D. & Pring, A. (2012). XAS evidence for the stability of polytellurides in hydrothermal fluids up to 599 °C, 800 bar. *Am. Mineral.* Vol 97: 1519-1522p.
- Buchanan, L. (1979). The Las Torres Mines, Guanajuato, Mexico: Ore controls of a fossil geothermal system. Colorado: Unpublished Ph. D. dissertation, Colorado School of Mines, Golden, Colorado. 138p.
- Charrier, R., Pinto, L. & Rodriguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En T. Moreno, y W. Gibbons, *The Geology of Chile*. The Geological Society, London. 21-114p.
- Comprubi, A., González, E., Levresse, G., Trirlla, J. & Carrillo, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo LVI: 10-18p.
- Cook, N. J. & Ciobanu, C. L. (2005). Tellurides in Au deposits - implications for modelling. En J. W. Mao & F. P. Bierlein (Edits.), *Mineral deposit research - meeting the global challenge*. Berlin - Heidelberg - New York: Springer. 1387-1390p.
- Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Pring, A., Skinner, W., Shimizu, M., Danyushevsky, L. & Melcher, F. (2009). Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 73: 4761-4791p.
- Davies, A. G., Cooke, D. R., Gemmel, J. B., van Leeuwen, T., Cesare, P., & Hartshorn, G. (2008). Hydrothermal breccias and veins at the Kelian gold mine, Kalimantan, Indonesia: Genesis of a large epithermal gold deposit. *Economic Geology*. Vol. 103: 717-757p.
- Díaz, S. (1986). *Geología Económica y Prospección Geoquímica de Suelos del área de la Mina la Leona, Distrito Minero de Chancón, VI Región*. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología. 196p.
- Dill, H. G., Garrido, M. M., Melcher, F., Gomez, M. C., Weber, B., Luna, L. I. & Bahr, A. (2013). Sulfidic and non-sulfidic indium mineralization of the epithermal Au-Cu-Zn-Pb-Ag deposit San Roque (Provincia Rio Negro, SE Argentina) - with special reference to the "Indium window" in zinc sulfide: *Ore Geology Reviews*. Vol 51: 103-128p.
- Dong, G., Morrison, G. & Jaireth, S. (1995). Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. *Economic Geology*. Vol 90: 1841-1856p.
- Duan, Z., Zhang, Z. (2006). Equation of state of the H₂O, CO₂, and H₂O-CO₂ systems up to 10 GPa and 2573.15 K: Molecular dynamics simulations with ab initio potential surface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 70: 2311-2324p.
- Drake, R., Curtiss, G. & Vergara, M. (1976). Potassium argon dating of igneous activity in the central Chileandes-latitude 33°S. *Journal of Volcanology and Geothermal*: Vol 1: 285-295p.
- Drumond, S. & Ohmoto, H. (1985). Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*. Vol 80: 126-147p.
- Einaudi, M. T., Hedenquist, J. W. & Inan, E. (2003). Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. *Society of Economic Geologist Special Publication*. Vol 10: 285-314p.

- Etoh, J., Izawa, E., Watanabe, K., Taguchi, S. & Sekine, R. (2002). Bladed quartz and its relationship to gold mineralization in the Hishikari low-sulfidation epithermal gold deposits. *Economic Geology*. Vol 97(8): 1841-1851p.
- Ewers, G. R. & Keays, R. R. (1977). Volatile and precious metal zoning in the Broadlands geothermal field, New Zealand. *Economic Geology*. Vol 72: 1337-1354p.
- Fock, A. (2005). Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°. Tesis de Magister (Inedito). Santiago: Universidad de Chile, Departamento de Geología. 179p.
- Gammons, C. H. & Barnes, H. L. (1989). The solubility of Ag₂S in near-neutral aqueous sulfide solutions at 25 to 300°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 53: 279-290p.
- Gana, P. & Wall, R. (1997). Evidencias geocronológicas ⁴⁰Ar/³⁹Ar y K-Ar de un hiatus Cretácico Superior-Eoceno en Chile Central (33°-33°30'S). *Revista Geológica de Chile*. Vol 24: 145-163p.
- Gammel, B. J. & Simmons, S. F. (2007). A Group of Papers Devoted to Epithermal Au - Ag Deposits: Preface. *Economic Geology*. 783-783p.
- Giggenbach, W. F. (1997). The origin and evolution of fluids in magmatic - hydrothermal systems. En J. Wiley & Sons (Edits.). New York: Barnes, H. L. 737 - 796p.
- Godoy, E. (1982). Geología del área de Montenegro, Cuesta de Chacabuco, Región Metropolitana. El problema de la Formación Lo Valle. *Proceedings 2nd Congreso Geológico Chileno*. Vol 1: 124-146p.
- Godoy, E., Schilling, M., Solari, M. & Fock, A. (2009). Geología del área Rancagua - San Vicente de Tagua Tagua, región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Escala 1:100.000. *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica*. Vol 118: 50p.
- Goldfarb, R. J., Hofstra, A. H. & Simmons, S. F. (2016). *Critical Elements in Carlin, Epithermal, and Orogenic Gold Deposits*. Society of Economic Geologist. Inc. 217-244p.
- Goldstein, R. H. & Reynolds, T. J. (1994). *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. Oklahoma, USA: SEPM. 198p.
- Grundler, P. V., Brugger, J., Etschmann, B. E., Helm, L., Liu, W., Spry, P. G. & Pring, A. (2013). Speciation of aqueous tellurium (IV) in hydrothermal solutions and vapors, and the role of oxidized tellurium species in Te transport and gold deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 120: 298-325p.
- Haas, J. (1971). The effect of salinity on the maximum thermal gradients of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*. 940-946p.
- Hartley, A. J., May, G., Chong, G., Turner, P., Kape, S. J. & Jolley, E. J. (2000). Development of a continental forearc: A cenozoic example from the Central Andes, northern Chile. *Geology*. Vol 28: 331-334p.
- Henley, R. W. & Brown, K. L. (1985). A practical guide to the thermodynamics of geothermal fluids and hydrothermal fluids and hydrothermal ore deposits. *Reviews in Economic Geology*. Vol 2: 25-44p.
- Henley, R. W. (1990). Ore transport and deposition in epithermal environments, in Herbert, H.K. and Ho, S.E., eds. *Stable isotopes and fluid processes in mineralization*: University of Western Australia, Geology Department Publication. Vol 23: 51-69p.

- Henley, R. W. & Hughes, G. O. (2000). Underground fumaroles: "Excess heat" effects in vein formation. *Economic Geology*. Vol 95: 453-466p.
- ISE. (2016). Photovoltaics Report. Fraunhofer Institute for Solar Energy. Freiburg: PSE AG, 43p.
- Jaffe, R., Price, J., Ceder, G., Eggert, R., Graedel, T., Gschneider, K. & Slakey, F. (2011). Energy Critical Elements: Securing Materials for Emerging Technologies. *APS physics*. 23p.
- John, D. A. & Taylor, R. D. (2016). By-products of porphyry copper and molybdenum deposits. *Reviews in Economic Geology*. Vol 18: 137-164p.
- Jovic, S. M., Guido, D. M., Schalamuk, I. B., Rios, F. J., Tassinari, C. C. & Recio, C. (2011). Pinguino In-bearing polymetallic vein deposit, Deseado Massif, Patagonia, Argentina: Characteristics of mineralization and ore forming fluids. *Mineralium Deposita*. Vol 46: 257-271p.
- Kelley, K. & Spry, P. (2016). Critical Elements in Alkaline Igneous Rock-Related Epithermal Gold Deposits. *Society of Economic Geologist, Inc.* Vol 18: 195-216p.
- Kesler, S. (2005). Ore-Forming Fluids. *Elements*. Vol 1: 13-18p.
- Klohn, C. (1960). *Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó*. Santiago. 95p.
- Kovalenker, V. A. (2004). Metallic Mineralization System of Epithermal Au-Ag Deposits: Concepts, Reality, and Models. *Problems of Ore Geology. Petrology and Geochemistry*. 160-183p.
- Lamadrid, H., Moore, D., Moncada, D., Rimstidt, R., Burrus. & Bodnar, R. J. (2017). Reassessment of the Raman CO₂ densimeter . *Chemical Geology* Vol. 450: 210-222.
- Lindgreen, W. (1933). *Mineral Deposits*. New York: McGraw-Hill. 930p.
- Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C. & Camus, F. (2007). Metallic ore deposits. En T. M. Gibbons, *The Geology of Chile*. The Geological Society, London. 179-201p
- Melfos, V. & Voundouris, P.C. (2012). Geological, mineralogical and geochemical aspects for critical and rare metals in Greece: Minerals. Vol 2: 300-317p.
- Moncada, D. & Bodnar, R. J. (2012). Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the Santa Margarita Vein in the Guanajuato Mining District, Mexico. *Central European Journal of Geosciences*. Vol 4(2): 300-309p.
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T. J., Rimstidt, J. D. & Bodnar, R. J. (2012). Mineral textures and fluid inclusions petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol 114: 20-35p.
- Moncada, D., Baker, D. & Bodnar, R. J. (2017). Structural and fluid controls on epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, Mexico, with applications to exploration. *Ore Geology Reviews* (In Press).
- Munzenmayer, M. (2002). *Procesos de Mineralización y Alteración del Distrito Minero Chancón*. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción, Ciencias de la Tierra, Concepción. 133p.
- Mutchler, S., Fedele, L. & Bodnar, R. J. (2008). Analysis Management System (AMS) for reduction of laser ablation ICP-MS data. *Mineralogical Association of Canada*. Vol 40: 318-327p.

- Nasi, C. (1981). *Estatigrafía del Jurásico y Cretácico de la Cordillera de la Costa al sureste de Melipilla (Chile Central)*. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile. Departamento de Geología. 221p.
- Nasi, C., & Thiele, R. (1982). *Estatigrafía del Jurásico y Cretácico de la Cordillera de la Costa al sur del río Maipo, entre Melipilla y Laguna de Aculeo (Chile Central)*. *Revista Geológica de Chile*. Vol 16: 81-99p.
- Obolensky, A. A., L. V. Gushchina, A. S. Borisenko & A. A. Borovikov (2007). Antimony in hydrothermal processes: solubility, conditions of transfer, and metal-bearing capacity of solutions. *Russian geology and geophysics*. Vol 48(12): 992-1001p.
- Portigliati, C. (2005). *El Distrito Minero de Chancón, VI Región: Aspectos Geológicos y Mineros, Reservas y Recursos Minerales*. Rancagua: Subdirección Nacional de Geología. 90p.
- Renders, P. J. & Seward, T. M. (1989). The stability of hydrosulphido- and sulphido-complexes of Au (I) and Ag (I) at 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53: 245-253p.
- Reutter, K. J. (2001). *Le Ande centrali: elemento di un'orogenesi di margine continentale attivo*. *Acta Naturalia de l' Ateneo Parmense*. Vol 37 (1/2): 5-37p.
- Richards, J. P. (1995). "Alcalic-Type Epithermal Gold Deposits-A Review" in *Magmas, Fluid, and Ore Deposits*. Mineral. Assoc. Canada, Short Course Ser. 367-400p.
- Roedder, E. (1984). Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*. Vol 12: 644p.
- Sander, M. V. & Black, J. E. (1988). Crystallization and recrystallization of growth-zoned vein quartz crystals from epithermal systems; implications for fluids inclusion studies. *Economic Geology*. Vol 83: 1052-1060p.
- Sernageomin & JICA/MMAJ. (1982). *Informe de Estudio Geológico Regional y Económico de Area al Este de los 71°W, entre 34° y 35°S. Programa de Exploración Geológico Minera (Fase I)*. Gobierno de Japón - Gobierno de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago - Tokyo. 125p.
- Sernageomin & JICA/MMAJ. (1984). *Informe de Estudios Básicos sobre la Exploración Geológica Minera, Informe Integral de las Tres Fases*. Gobierno de Japón - Gobierno de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago - Tokyo. 83p.
- Seward, T. M. (1973). Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. Vol 37: 370-399p.
- Shenberger, D. M. & Barnes, H. L. (1989). Solubility of gold in aqueous sulfide solutions from 150 to 350°C. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. Vol 53: 269-278p.
- Sillitoe, R. H. & Hedenquist, J. W. (2003). Linkages between volcanotectonic settings, ore fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologist*. 315-343p.
- Simmons, S. F. & Browne, P. (1997). Saline fluid inclusions in sphalerite from the Broadlands-Ohaaki geothermal system: A coincidental trapping of fluids boiled towards dryness. *Economic Geology*. Vol 92: 485-498p.
- Simmons, S. F. (1991). Hydrologic implications of alteration and fluid inclusion studies in the Fresnillo district: Evidence for a brine reservoir and a descending water table during the formation of hydrothermal Ag - Pb - Zn orebodies. *Economic Geology*. Vol 86: 1579-1602p.
- Simmons, S. F. & Christenson, B. W. (1994). Origins of calcite in a boiling geothermal system. *American Journal of Science*. Vol 294: 361-400p.

- Simmons, S. F., White, N. C. & John, D. A. (2005). Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. Society of Economic Geologist, Inc. 100th Anniversary Volume: 485-522p.
- So, C.-S., Dunchenko, V. Y., Yun, S.-T., Park, M.-E., Choi, S.-G. & Shelton, K. L. (1995). Te - and Se - Bearing Epithermal Au - Ag Mineralization, Prasolovskoye, Kunashir Island, Kuril Island Arc. *Economic Geology*. Vol 90: 105-117p.
- Stefánsson, A. & Seward, T. (2004). Gold (I) complexing in aqueous sulphide solutions to 500 C at 500 bar. *Geochemica et Cosmochimica Acta*. Vol 68: 4121-4143p.
- Tagirov, B. R., Seward, T. M. (2010). Hydrosulfide/sulfide complexes of zinc to 250 °C and the thermodynamic properties of sphalerite. *Chemical Geology*. Vol 269: 301 - 311p.
- Talens, L., Villalba, G. & Ayres, R. (2011). Rare and Critical Metals as By-products and the Implications for Future Supply. INSEAD Social Innovation Centre. 63 p.
- Thomas, H. (1958). Geología de la Cordillera de la Costa, entre el valle de La Ligua y la cuesta Barriga. Boletín N°2, Institución de Investigaciones Geológicas. 86p.
- U.S. Geological Survey. (2015). Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. 196p. <http://dx.doi.org/10.3133/70140094>.
- U.S. Geological Survey. (2017). Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. 202p. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.
- Vergara, M. & Drake, R. (1979). Edades Potasio - Argón en Secuencias Volcánicas Continentales Postneocomianas de Chile Central; su Depositación en Cuencas Intermontanas Restringidas. *Asociación Geológica Argentina*. Vol 34: 42-52p.
- Vicente, J. C., Charrier, R., Davidson, J., Mpodozis, A. C. & Rivano, S. (1973). La Orogénesis Subhercínica: Fase mayor de la evolución paleogeográfica y estructural de los Andes Argentino Chilenos centrales. 5th Congreso Geológico Argentino. Vol 5: 81-98p.
- Wagner, W. & Prub, A. (2002). The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. *The Journal of Physical Chemistry*. Vol 21: 388-535p.
- Wall, R., Gana, P. & Gutiérrez, A. (1996). Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla, regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos. Vol 2: 20p.
- White, N. C. & Hedenquist, J. W. (1995). Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *Society of Economic Geologist newsletter*. Vol 23: 1-13p.
- Wood, S. & Samson, I. (1998). Solubility of ore minerals and complexation of ore metals in hydrothermal solutions. *Reviews in Economic Geology*. Vol 10: 33-88p.
- Wood, S. A. & Samson, I. M. (2006). The aqueous geochemistry of gallium, germanium, indium and scandium. *Ore Geology Review*. Vol 28: 57-102p.

ANEXOS

Anexo A

Veta	Cota (msnm)	Th (°C)	n	Tipo	Th prom.	% NaCl eq
El inglés	910	220-340	18	Secundaria	279.3	-
El inglés	910	208-380	33	Secundaria	296.4	-
El inglés	810	216-307	17	Secundaria	256.8	-
El inglés	810	165-380	27	Secundaria	264.5	-
El inglés	720	161-375	27	Secundaria	243.9	-
El inglés	720	130-328	16	Secundaria	217.3	4.2 - 5.8
El inglés	910	164-238	15	Secundaria	196.7	-
El inglés	910	185-375	18	Secundaria	245	-
El inglés	810	134-327	17	Secundaria	264.5	-
El inglés	810	85-257	14	Secundaria	206.1	-
El inglés	720	182-282	16	Secundaria	247	-
El inglés	720	192-317	13	Secundaria	275.8	-
Campana	750	183-305	7	Secundaria	241.9	4.1 - 5.6
Campana	640	145-297	15	Secundaria	211.5	-
La Julia	575	258-380	20	Secundaria	319.1	3.8 - 5.0
La Julia	675	146-260	8	Secundaria	184.3	-
Leona	-	137-297	20	Secundaria	217.4	-
Leona	727	145-316	13	Secundaria	204.5	-
Anita	600	128-293	20	Secundaria	198.1	4.1 - 5.8
Anita	736	195-295	10	Secundaria	239.1	-
N. Fortuna	685	305	1	Secundaria	305	-
N. Fortuna	610	121-251	12	Secundaria	201.4	-
Encanto	970	95-242	11	Secundaria	200.9	-
La Araña	724	162-294	10	Secundaria	211.7	-
Manzano	-	245-361	8	Secundaria	287.1	-

Tabla 9: Datos de microtermometría de otros estudios (Sernageomin y JICA/MMAJ, 1984).

Anexo B

Montar el *linkam* en el microscopio y centrar de manera que solamente se deba ajustar el enfoque con el microscopio y la posición con este.

Conectar el termo con nitrógeno líquido (previamente llenado), el nitrógeno gaseoso, la bomba de agua y el detector del *linkam*. Una vez que todo está conectado se inicia el programa X y se activa en detector de temperatura.

Se destornilla la tapa superior del *linkam* y se revisa que el vidrio que está en esta esté en buenas condiciones. Luego, de manera cuidadosa, se monta el standard de cuarzo en el soporte de este y se cierra la tapa.

Enfocar el Arreglo de Inclusiones Fluidas de interés en el cuarzo estándar, teniendo cuidado que cada inclusión pueda ser bien observada, de manera de poder registrar cualquier cambio al interior de esta.

Se abre la válvula del nitrógeno gaseoso a baja presión, se activa la bomba de agua y se enfría a 0°C, con un rate de 50 °C/min, luego se lleva a -50°C con un rate de 30 °C/min. El siguiente paso consiste en cerrar el nitrógeno gaseoso y calentar la muestra de manera progresiva, pero ahora con el cuidado de registrar la temperatura de temperatura de último fundido o último fundido. Para esto se debe calentar la muestra hasta los -10°C con un rate de 50 °C/min y luego calentar desde los -10°C, hasta los 5°C, con un rate de 10 °C/min. La temperatura registrada de temperatura de último fundido, corresponde a la temperatura estándar, que sirve para corregir posteriores mediciones.

Luego de medir el estándar, se retira y se introduce el portaobjeto de roca. Si el Arreglos de Inclusiones Fluidas está en cuarzo, se debe calentar y luego enfriar, por otra parte, si está en esfalerita, se debe realizar lo contrario. El procedimiento estándar para enfriar es similar al descrito anteriormente, con la salvedad que el enfriamiento hasta los -50°C se realiza con un rate de 30 °C/min, para luego, enfriar hasta -150°C, con un rate de -50°C. Luego de enfriar, se corta el nitrógeno gaseoso y se calienta hasta los -90°C, con un rate de 50 °C/min, después se calienta hasta los -50°C, con un rate de 10 °C/min (registrar la presencia de CO₂ en la inclusión). Posteriormente se calienta con un rate de 50 °C/min hasta los -10°C. Finalmente se calienta hasta los 5°C con un rate de 10 °C/min. El calentamiento no requiere del uso de nitrógeno gaseoso, ni líquido. El primer paso consiste en llevar la muestra hasta 100°C con un rate de 30 °C/min, luego de esto, se puede calentar la muestra con un rate de 50 °C/min hasta registrar la homogeneización de las inclusiones. Esta primera medición sirve para dar un rango de temperatura en la cual se trabajará. Una vez determinado esto, se deja enfriar de manera natural hasta que las burbujas vuelvan a nuclear, cuando esto sucede, se vuelve a calentar con un rate de 50 °C/min hasta unos llegar a unos 20°C debajo del rango de temperatura registrado de homogeneización, luego se continúa incrementando la temperatura, pero con un rate de 10 °C/min, con este rate bajo es posible registrar con mayor exactitud la temperatura de homogeneización de cada inclusión.

Anexo C

El primer paso consiste en fijar el panel de options (Anexo B). Primero se fija el Standard Runs en 4, el Instrument Settings en Counts per second. Luego, en Method, se ingresa la temperatura de último fundido promedio del Arreglo de Inclusiones Fluidas, seleccionando la opción Use microthermometry si se trata de inclusiones fluidas, en caso contrario debe seleccionarse la opción Use normalization to. Finalmente, se fija la sensibilidad del límite de detección (LOD) en 3σ .

El siguiente paso consiste en seleccionar los intervalos de interés de la muestra analizada. En el caso de una inclusión fluida sin mineralización, se deben seleccionar sólo los elementos presentes en la inclusión, ya que el resto corresponderían al host. Se usa como guía el pico de sodio, ya que, todos los picos que se asocien bajo él, corresponden a elementos presentes al interior de la inclusión. Por otro lado, si formando parte de la inclusión hay mineralización, se debe considerar que tanto el pico de sodio, como el pico de la mineralización forman parte de la inclusión. Este caso ocurrió en más del 85% de las inclusiones de tipo primarias en esfalerita. En estas, la mineralización corresponde a calcopirita, por lo que los picos considerados fueron el Na y Cu. La única excepción para esta metodología, se realizó con Au, Ag, In, Te y Se, ya que, estos al ser elementos traza, no interfieren en las señales de elementos mayores (a menos que su presencia en el host fuese evidente) y aportan información significativa del sistema en caso de detectarse. Luego de seleccionar los elementos presentes en la inclusión, se debe acotar la ventana de integración de datos (sample signal) entre el inicio y final del (los) pico(s) de interés (Figura 16).

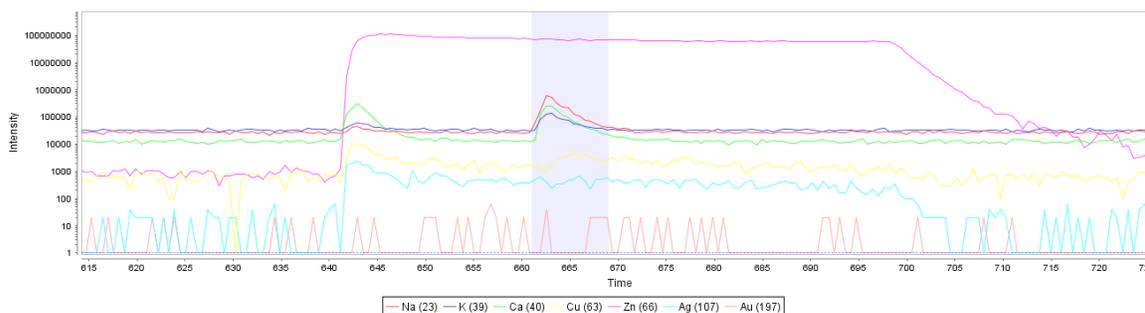


Figura 48: Intervalo de interés seleccionado en AMS, para una inclusión fluida

Una vez que se ha seleccionado el intervalo de interés, se debe acotar background signal del standard NIST SRM-610 entre un segundo y 5 segundos antes que comience la ablación. También, se debe ajustar el sample signal del standard. Es importante que todos los sample signal tengan el mismo tiempo de integración, siendo importante que comiencen 5 segundos después del inicio de la ablación para evitar la contaminación presente en la superficie (Figura 17).

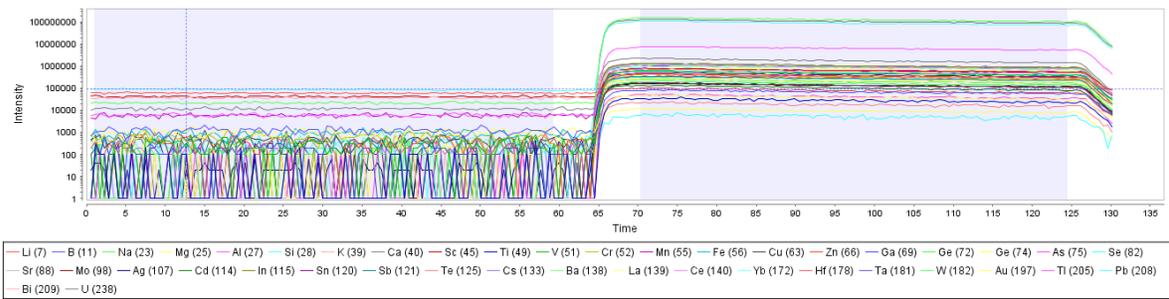


Figura 49: Background signal y sample signal ajustados en AMS para el NIST SRM-610.

Finalmente, una vez que se han ajustado todos los parámetros se selecciona *Analyze*, generándose múltiples archivos en Excel con las concentraciones de los elementos presentes en ppm.

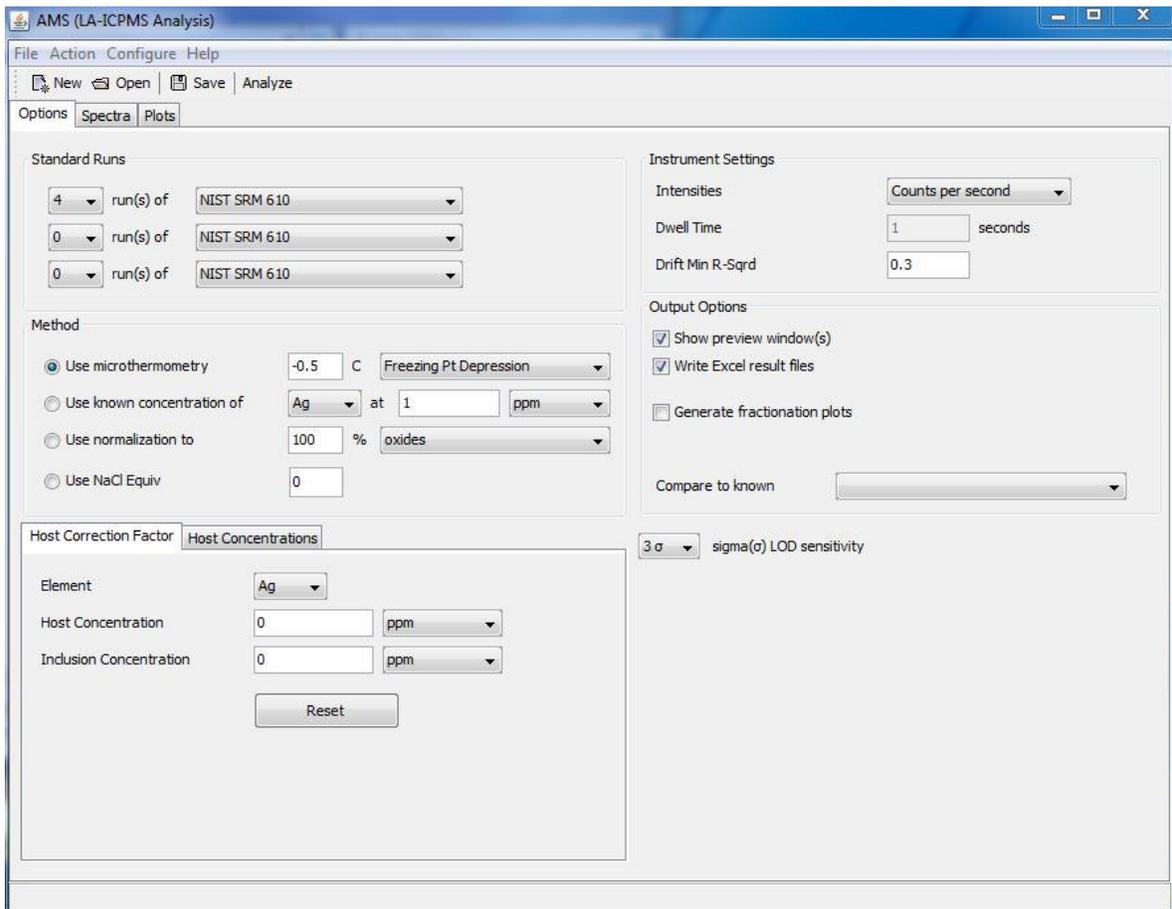
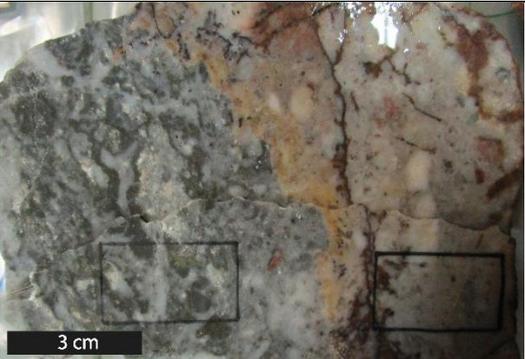
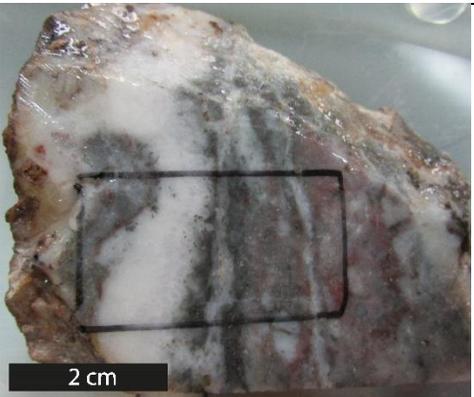
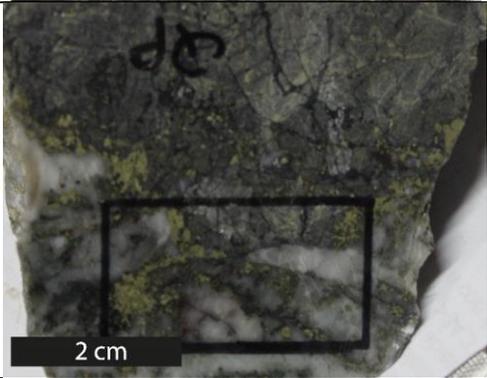
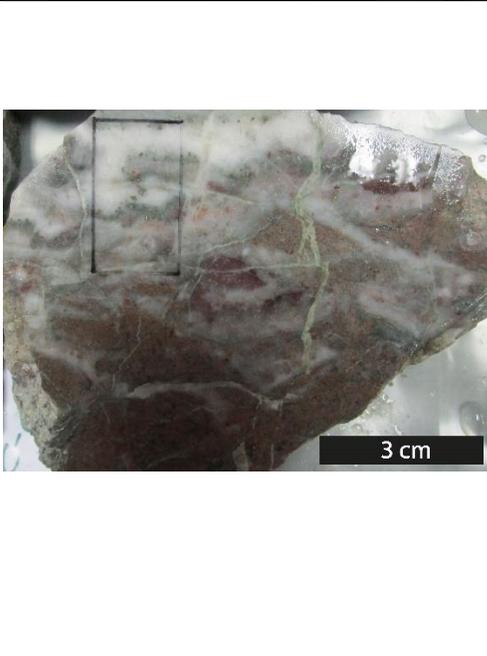


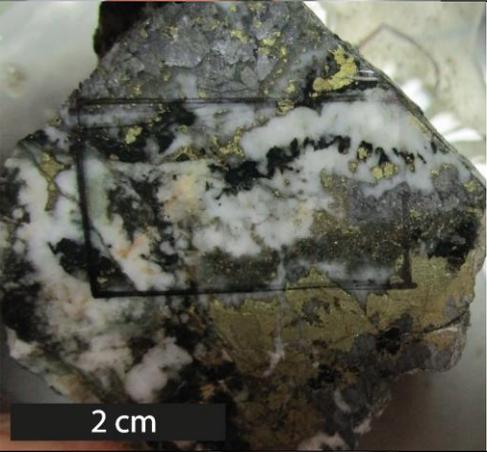
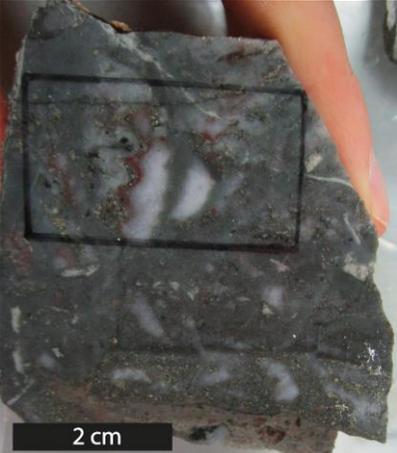
Figura 50: Panel de opciones en del AMS

Anexo D

Muestra	Descripción macroscópica	Imagen
BC-01	Muestra extraída a 715 msnm de un costado de la veta. Brecha H-T de cuarzo, fuertemente fracturada y rellena de óxidos de hierro entre las fracturas, además de la presencia de aparente limonita, sin presencia de mineralización.	 <p>2 cm</p>
BC-02	Aparente calcita hojosa encontrada en superficie, esta tiene una baja reacción al ácido, por lo que podría estar reemplazada por sílice.	 <p>2 cm</p>

<p>BC-03A-B</p>	<p>Muestra con dos brechas H-T diferenciadas en contacto.</p> <p>La primera (derecha) corresponde a una brecha H-T rica en cuarzo (80%), con presencia de jaspe, fracturas rellenas de óxidos y sin mineralización aparente. Los clastos de esta brecha están subredondeados, no presenta mineralización aparente y sus fracturas están rellenas de óxidos supergenos. Además, es notoria la presencia de un halo de alteración de cerca de 1 cm en el contacto con la otra brecha H-T.</p> <p>La segunda (izquierda) corresponde a una brecha H-T con menor cuarzo (50%), con presencia de mineralización de pirita y calcopirita de tipo diseminada a masiva y menor presencia de fracturas y óxidos.</p>	
<p>BC-03C</p>	<p>Brecha H-T de cuarzo (20%) y jaspe, de tipo matriz soportada, cortada por vetillas sub-paralelas de entre 1 mm y 2 cm. La vetilla de mayor tamaño (1-2 cm) presenta textura euhedral hacia los bordes. Se observa presencia de mineralización de sulfuros entre estas vetillas</p>	

<p>BC-04</p>	<p>Brecha H-T de cuarzo (10%) gris oscuro. Presenta vetillas que cortan la brechización y están rellenas de calcopirita masiva. Además, existen ciertos cúmulos de calcopirita en la matriz de la brecha H-T.</p>	
<p>B-03-1016</p>	<p>Esfalerita clara masiva, con planos de clivaje visibles y mineralización de calcopirita. junto con esta esfalerita masiva, se observa una brecha H-T baja en sílice (40%), con matriz de esfalerita y calcopirita masivos.</p>	
<p>BC-06</p>	<p>Brecha H-T de cuarzo rojizo con clastos de cuarzo, sin mineralización aparente. Cortando lo anterior, se encuentran vetillas de cuarzo de 1 cm con un halo de alteración propilítico, con calcopirita en cúmulos y diseminado. La textura de la vetilla hacia los bordes es de tipo diente de perro. Cortando lo anterior, se observan vetillas de cuarzo de entre 0.1 a 0.5 cm sin halo de alteración y sin mineralización aparente. Finalmente, se observan vetillas de clorita-epidota (evento posterior) cortan todo lo anterior (0.1 – 0.2 cm).</p>	

<p>BC-07</p>	<p>Brecha H-T con clastos de roca caja (andesita) y cuarzo. Estos últimos están rodeados de calcopirita diseminada en cuarzo. Cortando esta brecha H-T, se observan vetillas de cuarzo sin mineralización y cortando esto se encuentran vetillas de cuarzo con halo de alteración de sulfuros.</p>	
<p>BC-11</p>	<p>Brecha H-T, con una baja cantidad de cuarzo (10%), la matriz de esta brecha H-T consiste en pequeños cúmulos de cuarzo lechoso, calcopirita, esfalerita y galena en cúmulos. Cortando esta brecha se observan vetillas de cuarzo y calcita de relleno con clorita en su interior y mineralización de calcopirita en los bordes.</p>	
<p>BC-12</p>	<p>Brecha H-T con clastos subredondeados de cuarzo y presencia de jaspe en una matriz de cuarzo grisáceo con pirita y calcopirita diseminada fina, sin identificarse otro mineral sulfurado.</p>	

<p>BC-13</p>	<p>Brecha H-T con clastos de cuarzo y matriz con alteración a clorita, cuarzo y calcopirita en cúmulos. No se aprecian vetillas de ningún tipo en este espécimen.</p>	
<p>BC-14</p>	<p>Brecha H-T con pequeños clastos de cuarzo, con jaspe y en su matriz y sin mineralización aparente. Cortando a esta brecha H-T, se observa una vetilla de cuarzo sin mineralización y una segunda vetilla de mayor tamaño de cuarzo con abundante calcopirita de tipo diseminada a masiva (60%).</p>	

Anexo E

Muestra		BC-01	BC-03	BC-03-1016	BC-04	BC-06	BC-07	BC-11	BC-12	BC-13	BC-14	BC-15	BC-16
Au	ppm	1.41	0.69	8.44	0.23	0.54	1.62	6.11	0.7	3.74	0.45	1.88	1.96
Ag	ppm	36.1	12.25	40.7	8.21	5.46	15.8	34.9	7.42	19.55	4.19	19.65	21.4
Al	%	0.76	0.61	0.16	2.03	1.85	2.33	0.67	2.4	0.79	5.27	1.76	0.57
As	ppm	62.4	24.3	7.26	16.9	21.1	14.1	27.7	20.9	25.7	61.7	195.5	28.5
Ba	ppm	41	43	22	149	46	60	11	118	14	96	35	222
Be	ppm	0.37	0.2	0.08	0.56	0.3	0.5	0.16	0.51	0.22	0.66	0.29	0.21
Bi	ppm	0.792	0.433	4.77	0.139	0.206	1.555	2.4	2.61	5.01	1.505	5.08	0.173
Ca	%	0.03	0.03	4.64	0.66	3.38	2.73	7.39	2.01	2.48	0.2	0.37	0.03
Cd	ppm	0.299	0.228	>1000	170.5	8.46	71.3	574	6.12	12.4	14.45	222	0.38
Ce	ppm	2.52	0.55	4.21	6.81	6.65	6.92	3.49	4.78	1.48	11.4	5.15	0.74
Co	ppm	0.642	6.54	3.66	7.21	5.65	11.3	4.83	12.15	12.05	15.35	43	0.627
Cr	ppm	137	60	17	53.7	94.4	72.5	39.1	75.1	62.9	56.8	31.6	94.5
Cs	ppm	0.59	0.3	0.17	1.85	0.82	1.64	0.24	1.35	0.25	3.34	1.16	0.3
Cu	ppm	193.5	301	>10000	2290	169	7380	>10000	1940	>10000	694	3990	106.5
Fe	%	4.75	2.16	4.05	4.91	1.94	3.61	7.73	3.93	14.3	4.98	15.05	2.1
Ga	ppm	2.57	1.86	6.36	4.17	2.8	7.06	4.82	5.79	3.48	17.65	7.17	1.82
Ge	ppm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	0.05	0.11	<0.05
Hf	ppm	0.085	0.037	0.004	0.601	0.732	0.742	0.008	0.677	0.11	2.4	0.542	0.11
In	ppm	0.042	0.007	12.45	0.029	0.044	0.168	1.54	0.045	1.165	0.192	1.515	0.062
K	%	0.26	0.2	0.05	0.78	0.7	0.89	0.1	0.98	0.14	2.18	0.7	0.18
La	ppm	1.125	0.321	1.82	3.07	2.87	3.57	1.48	2.22	0.633	4.43	2.25	0.419
Li	ppm	36.8	29.4	5	19.7	25.9	23.7	10.4	19.6	14.9	4.8	5.5	29.9
Mg	%	0.03	0.01	0.04	0.25	0.07	0.15	0.22	0.14	0.2	0.13	0.05	0.01
Mn	ppm	97.8	107	1010	491	888	1390	2650	1060	2370	140	208	92.9
Mo	ppm	9.7	6.22	1.1	5.36	5.08	9.7	2.66	10.65	5.79	8.08	4.41	10.9
Na	%	0.009	0.007	<0.001	0.008	0.011	0.01	0.005	0.009	0.005	0.02	0.008	0.006
Nb	ppm	0.108	0.076	0.012	1.11	1.065	1.065	0.023	0.969	0.168	3.03	0.652	0.19
Ni	ppm	1.92	3.32	0.92	5.22	5.72	7.88	1.89	7.05	2.96	8.09	17.45	1.76
P	%	0.014	0.001	<0.001	0.019	0.017	0.028	<0.001	0.024	0.001	0.057	0.043	0.007
Pb	ppm	1395	106	986	>10000	198.5	1360	625	382	353	392	896	217
Rb	ppm	8.5	6.84	2.01	30	27.7	42.3	4.21	44.3	5.12	83.8	27.3	6.57
Re	ppm	<0.002	0.002	<0.002	0.003	<0.002	0.003	<0.002	<0.002	0.002	0.003	<0.002	<0.002

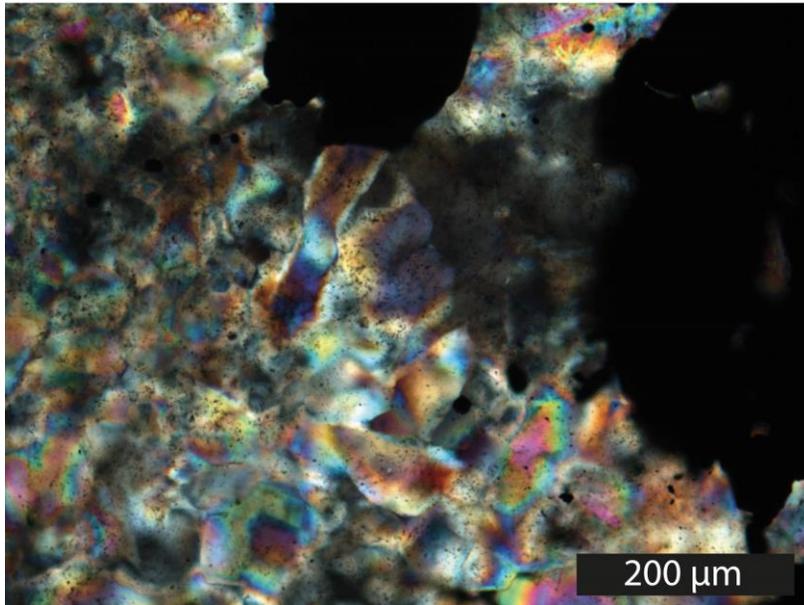
Muestra		BC-01	BC-03	BC-03-1016	BC-04	BC-06	BC-07	BC-11	BC-12	BC-13	BC-14	BC-15	BC-16
S	%	0.08	1.81	>10.0	5.68	1.56	3.58	>10.0	3.55	>10.0	5.32	>10.0	0.1
Sb	ppm	5.2	4.15	1.18	4.04	2.92	2.96	2.55	2.45	2.28	2.06	3.92	3.76
Sc	ppm	0.47	0.39	0.12	3.58	2.82	4.39	0.26	3.62	0.47	18.3	5.06	0.56
Se	ppm	6.9	6.6	22.8	5.3	0.6	2.4	9.8	1.6	9.4	3.6	26.4	3.7
Sn	ppm	1.69	0.36	1.41	0.32	1.02	0.91	0.49	1.11	0.43	0.88	0.62	0.27
Sr	ppm	6.27	5.23	23.6	15.35	25.2	22.4	51.5	21.2	13.2	11.8	10.3	6.34
Ta	ppm	0.01	<0.01	<0.01	0.07	0.07	0.07	<0.01	0.06	0.01	0.23	0.05	0.01
Te	ppm	6.41	3.53	16.6	3.56	2.65	3.37	2.17	2.5	4.95	2.05	10.95	7.1
Th	ppm	0.288	0.248	0.013	1.02	1.09	1.22	0.025	1.33	0.204	3.89	1.085	0.179
Ti	%	0.009	0.008	0.001	0.082	0.098	0.092	0.001	0.085	0.009	0.337	0.069	0.021
Tl	ppm	0.058	0.033	0.018	0.223	0.107	0.196	0.03	0.233	0.041	0.405	0.124	0.024
U	ppm	0.1	0.12	0.01	0.29	0.39	0.44	0.02	0.46	0.07	2.38	1.51	0.16
V	ppm	27.6	8.6	2.7	25.3	35.3	42.1	7.2	41.1	8.6	132.5	51	11.7
W	ppm	0.291	0.404	1.415	0.738	2.43	2.67	0.12	1.61	0.581	6.65	5.01	0.87
Y	ppm	0.63	0.36	7.49	3.03	3.23	4.18	5.31	3.76	1.04	7.94	2.84	0.8
Zn	ppm	53	48.4	>10000	>10000	1560	>10000	>10000	1320	2220	2480	>10000	95.6
Zr	ppm	2.6	1.4	0.3	20.5	27.3	25.1	0.2	24.8	4.3	85.1	19.4	3.8
Cu	%			2.96				4.33		3.46			
Pb	%				1.505								
Zn	%			>30.0	2.21		1.305	10.3				3.94	
Dy	ppm	0.126	0.065	1.275	0.529	0.581	0.763	0.847	0.68	0.166	1.47	0.636	0.125
Er	ppm	0.075	0.04	0.588	0.326	0.353	0.446	0.406	0.447	0.092	0.992	0.337	0.089
Eu	ppm	0.046	0.016	0.144	0.155	0.175	0.283	0.128	0.17	0.051	0.317	0.158	0.031
Gd	ppm	0.17	0.051	1.405	0.611	0.651	0.928	0.818	0.716	0.194	1.67	0.869	0.116
Ho	ppm	0.025	0.013	0.235	0.116	0.119	0.157	0.157	0.139	0.032	0.32	0.112	0.031
Lu	ppm	0.012	0.006	0.038	0.046	0.058	0.062	0.037	0.07	0.016	0.202	0.059	0.013
Nd	ppm	1.615	0.268	3.39	3.4	3.5	3.99	2.39	2.72	0.854	6.87	2.82	0.391
Pr	ppm	0.375	0.064	0.622	0.803	0.797	0.799	0.463	0.67	0.167	1.445	0.644	0.091
Sm	ppm	0.369	0.062	1.16	0.671	0.754	0.875	0.687	0.731	0.232	1.7	0.787	0.1
Tb	ppm	0.023	0.009	0.207	0.091	0.092	0.133	0.13	0.117	0.03	0.244	0.113	0.019
Tm	ppm	0.01	0.005	0.066	0.047	0.055	0.064	0.05	0.061	0.013	0.172	0.05	0.014
Yb	ppm	0.062	0.043	0.326	0.31	0.343	0.41	0.311	0.44	0.09	1.25	0.346	0.085

Tabla 10: Resultados de geoquímica en roca total para 62 elementos

Anexo F

BC-01A

- Mineralogía no metálica: cuarzo
- Texturas: rompecabeza
- Inclusiones: no se observan
- Mineralogía metálica: pirita finamente diseminada en cuarzo, óxidos de hierro
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II, se observa abundante recristalización.



BC-01B

- Mineralogía no metálica: cuarzo
- Texturas: rompecabeza, euhedral
- Inclusiones: no se observan
- Mineralogía metálica: no se observa
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II, se observa abundante recristalización.

BC-02

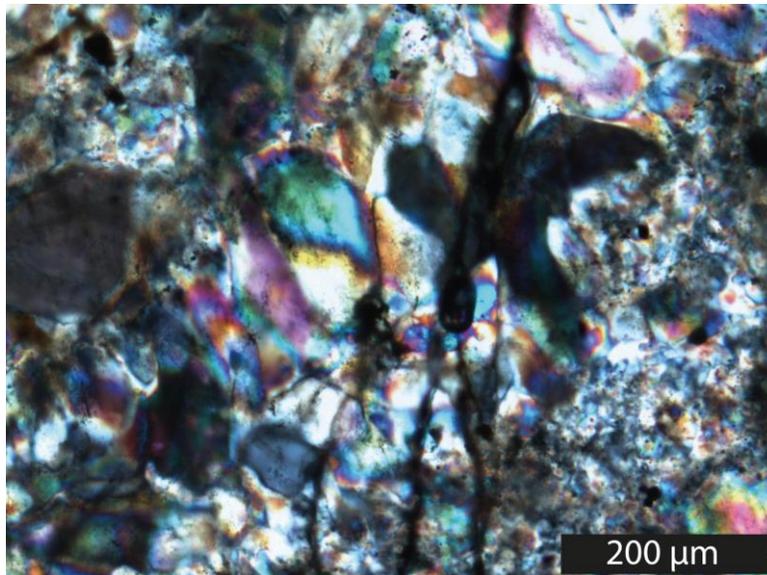
- Mineralogía no metálica: cuarzo
- Texturas: rompecabeza
- Inclusiones: no se observan
- Mineralogía metálica: no se observa
- Eventos: no se observan
- Observaciones: no se observa calcita, ni la textura de calcita hojosa apreciada a muestra de mano, por lo que se descarta a priori la existencia de calcita hojosa.

BC-03A

- Mineralogía no metálica: cuarzo, jaspe
- Texturas: rompecabeza
- Inclusiones: no se observan
- Mineralogía metálica: no se observa
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas I

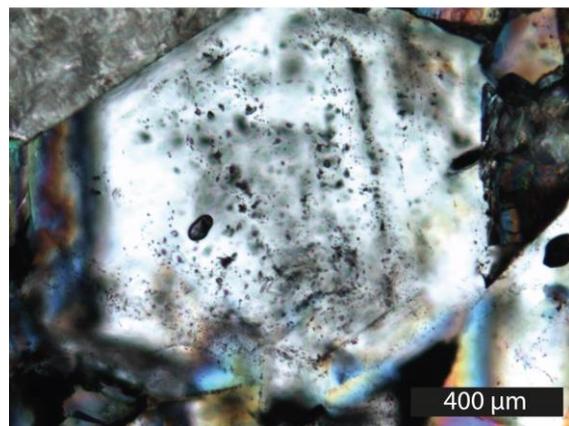
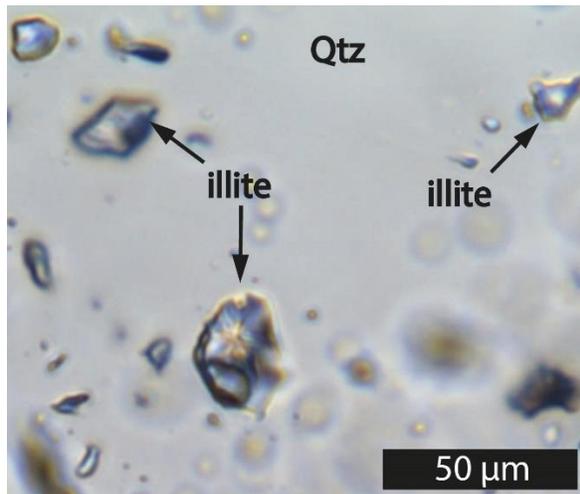
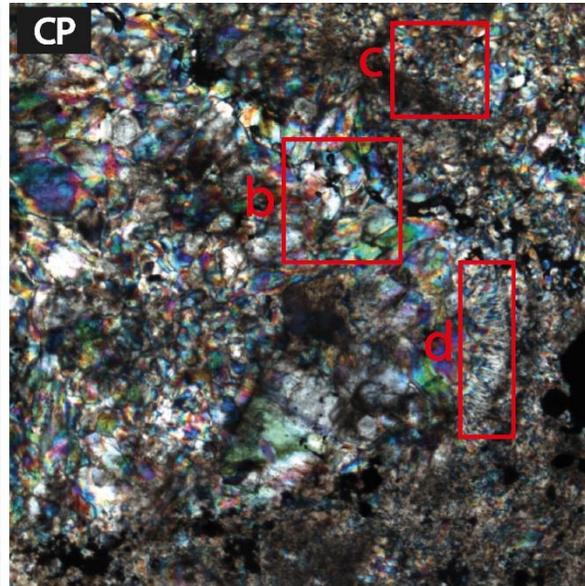
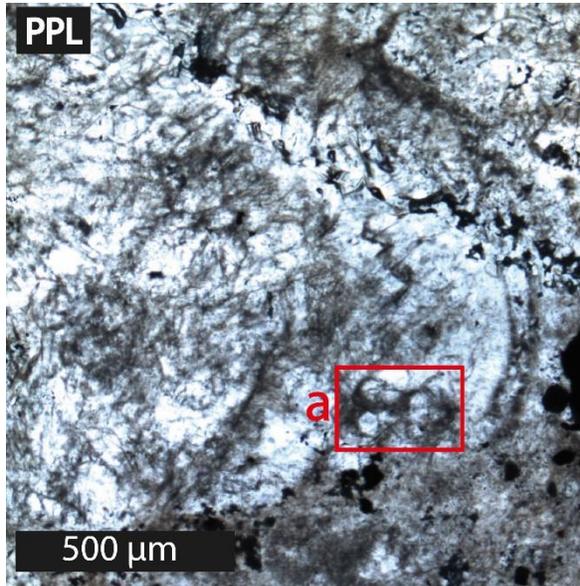
BC-03B

- Mineralogía no metálica: cuarzo
- Texturas: rompecabeza
- Inclusiones: se observan inclusiones de alrededor de 2 μm , ricas en líquido en cuarzo jigsaw.
- Mineralogía metálica: pirita y calcopirita diseminados
- Eventos: vetillas de cuarzo jigsaw
- Observaciones: asociado a Brechas II, se observa abundante recristalización.



BC-03C

- Mineralogía no metálica: cuarzo, jaspe, illita
- Texturas: rompecabeza, euhedral, coliforme, plumosa
- Inclusiones: inclusiones primarias ricas en líquido, coexistiendo con inclusiones ricas en vapor en cuarzo euhedral.
- Mineralogía metálica: pirita diseminada en cuarzo, óxidos de hierro
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II

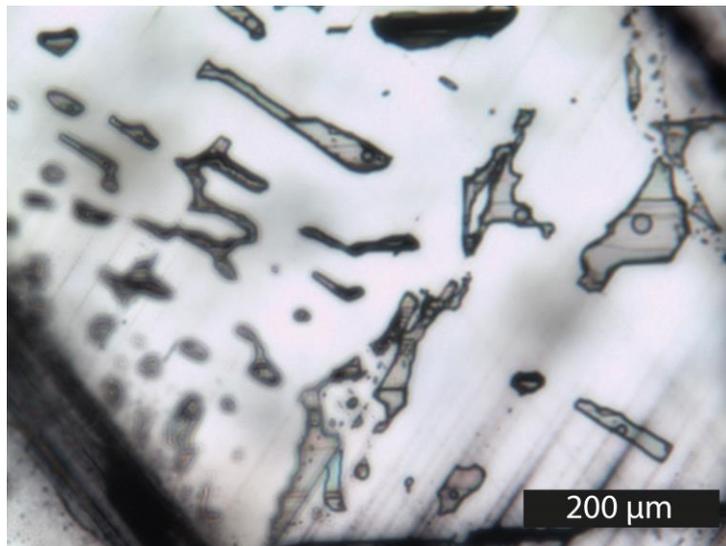


BC-04

- Mineralogía no metálica: cuarzo
- Texturas: rompecabeza
- Inclusiones: no se observan
- Mineralogía metálica: pirita finamente diseminada en cuarzo, óxidos de hierro
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II, se observa abundante recristalización.

B-03-1016A

- Mineralogía no metálica: calcita
- Texturas: rómbica
- Inclusiones: inclusiones primarias ricas en líquido en esfalerita e inclusiones secundarias ricas en líquido en calcita.
- Mineralogía metálica: esfalerita
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II



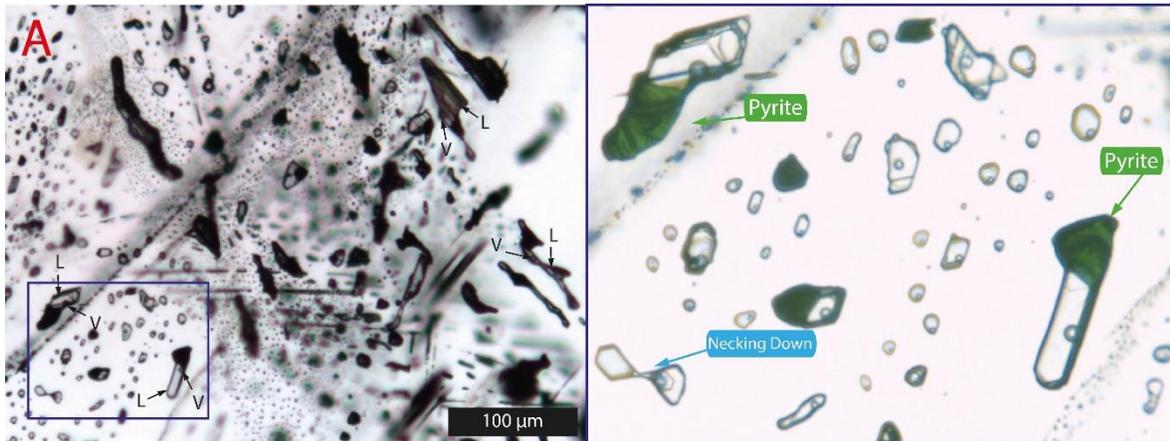
B-03-1016B

- Mineralogía no metálica: cuarzo, calcita.
- Texturas: rompecabeza y calcita rómbica.
- Inclusiones: inclusiones primarias en esfalerita, ricas en líquido, con morfología de cristal negativo, con mineralización de calcopirita.
- Mineralogía metálica: esfalerita, calcopirita como exolución
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II



B-03-1016C

- Mineralogía no metálica: calcita
- Texturas: calcita rombica
- Inclusiones: inclusiones primarias en esfalerita, ricas en líquido, con morfología de cristal negativo, con mineralización de calcopirita.
- Mineralogía metálica: esfalerita masiva, calcopirita, galena y pirita diseminada.
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II



BC-06

- Mineralogía no metálica: cuarzo, calcita, clorita
- Texturas: rompecabeza (numerosas vetillas)
- Inclusiones: no se observan
- Mineralogía metálica: no se observa
- Eventos: no se observan
- Observaciones: roca caja brechizada y obliterada correspondiente aparentemente a una andesita, las plagioclasas están fuertemente alteradas a sericita y la matriz muestra abundante oxido.

BC-07

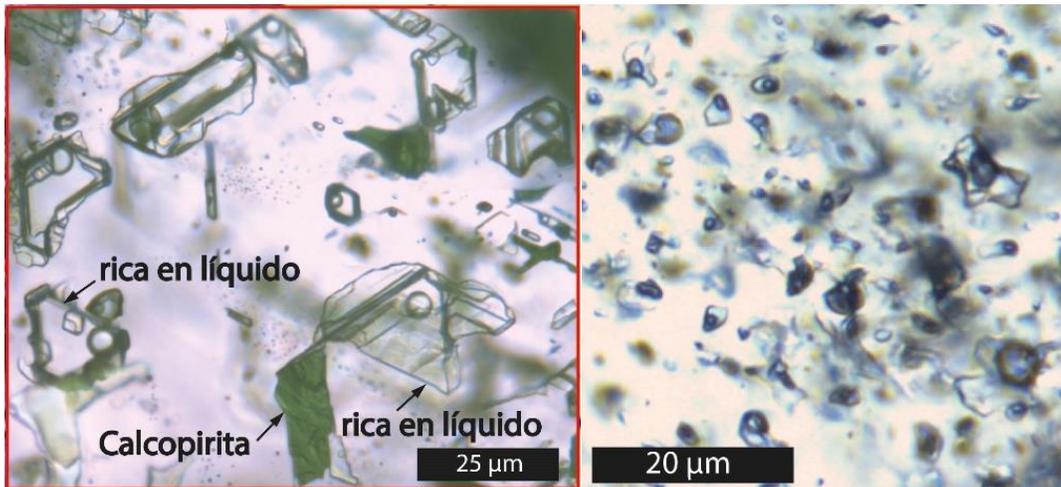
- Mineralogía no metálica: cuarzo
- Texturas: rompecabeza
- Inclusiones: no se observan
- Mineralogía metálica: pirita diseminada y calcopirita en cumulos
- Eventos: no se observan
- Observaciones: Asociado a Brechas I, roca caja brechizada y obliterada, las plagioclasas se encuentran alteradas a sericita (andesita).

BC-07-RC

- Mineralogía no metálica: plagioclasa, hornblenda
- Texturas: no se observan
- Inclusiones: no se observan
- Mineralogía metálica: se observa calcopirita rellenando sectores fracturados.
- Eventos: fracturamiento debido a la formación de una brecha H-T.
- Observaciones: roca caja brechizada y obliterada correspondiente aparentemente a una andesita, las plagioclasas están fuertemente alteradas a sericita y la matriz muestra abundante óxido.

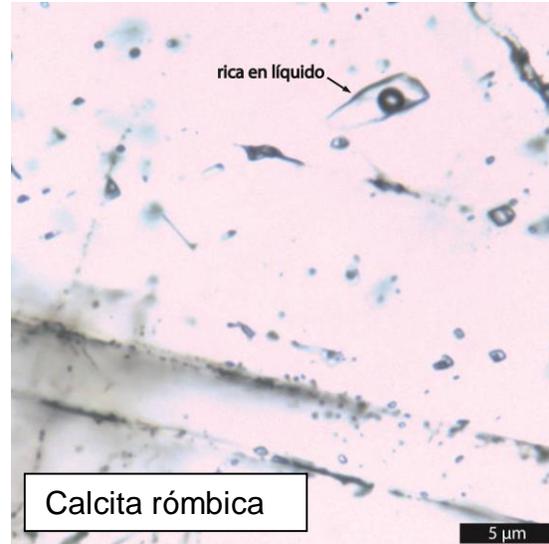
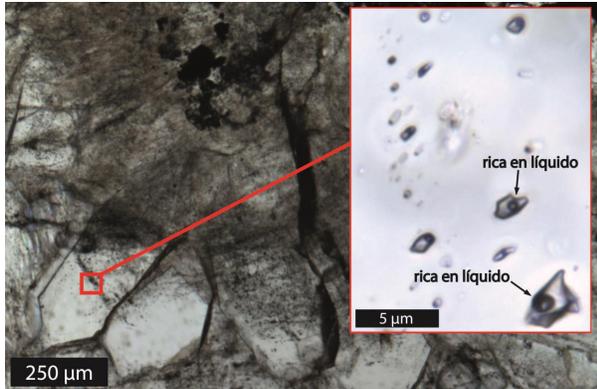
BC-11

- Mineralogía no metálica: cuarzo, calcita
- Texturas: rompecabeza, euhedral
- Inclusiones: inclusiones primarias ricas en líquido coexistente con inclusiones ricas en vapor en cuarzo euhedral. Inclusiones primarias ricas en líquido con mineralización de calcopirita en esfalerita. Mineralogía metálica: esfalerita masiva, galena y pirita
- Eventos: no se observan
- Observaciones: Asociado a Brechas II



BC-11-T3

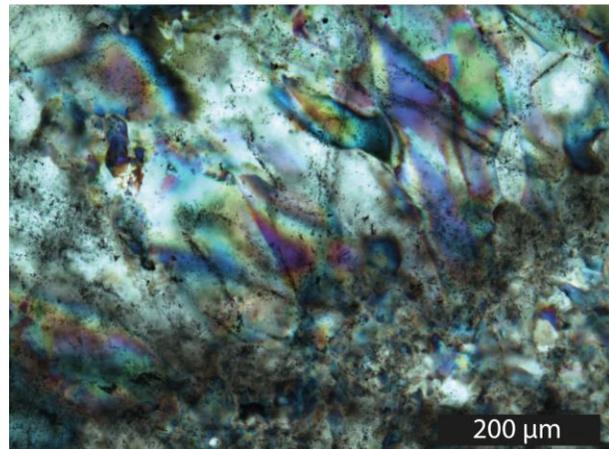
- Mineralogía no metálica: cuarzo, calcita
- Texturas: rompecabeza, zonal, calcita rombica
- Inclusiones: Inclusiones fluidas secundarias consistentes en cuarzo zonal.
- Mineralogía metálica: calcopirita masiva
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II



Calcita rómbica

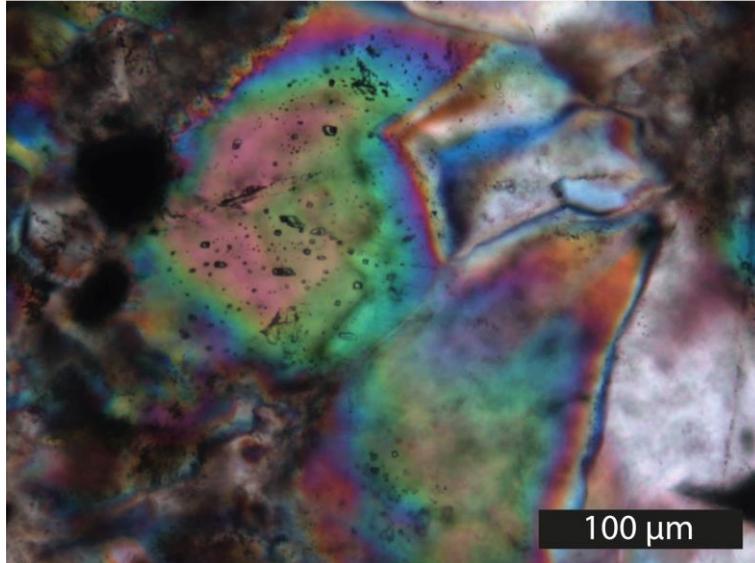
BC-12

- Mineralogía no metálica: cuarzo
- Texturas: rompecabeza, zonal
- Inclusiones: inclusiones de tipo vapor pequeñas ($< 2\mu\text{m}$), no es posible determinar su razón de líquido - vapor
- Mineralogía metálica: pirita finamente diseminada en cuarzo, óxidos de hierro
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II, se observa abundante recristalización.



BC-13

- Mineralogía no metálica: cuarzo
- Texturas: rompecabeza, plumosa, zonal
- Inclusiones: no se distinguen
- Mineralogía metálica: calcopirita masiva a diseminada
- Eventos: no se observan
- Observaciones: asociado a Brechas II



BC-14

- Mineralogía no metálica: cuarzo, jaspe
- Texturas: rompecabeza
- Inclusiones: inclusiones pequeñas ($<2\mu\text{m}$), no es posible identificar la razón líquido-vapor
- Mineralogía metálica: vetilla de calcopirita masiva con cuarzo rompecabeza corta la brecha H-T de cuarzo y jaspe.
- Eventos: vetilleo de calcopirita
- Observaciones: Brecha H-T se asociaría a Brechas I, mientras que la vetilla de calcopirita se asociaría a las Brechas II.

Anexo G

Muestra	Mina	FIA	Tipo de inclusión	host	T _h	T _m	T _m corrected	T _m prom	NaCl eq
B031016B	3 Vetas II	T1	rico en liquido (I)	Sph	137.8	-0.3	-1.2	1.875	3.1
			rico en liquido (I)	Sph	140.7	-2.6	-3.5		
			rico en liquido (I)	Sph	142.3	-0.2	-1.1		
			rico en liquido (I)	Sph	155.2	N/D	N/D		
			rico en liquido (I)	Sph	148.2	0	-0.9		
B031016B	3 Vetas II	T2	rico en liquido (I)	Sph	131	-0.1	-1	1.52	2.6
			rico en liquido (I)	Sph	130	-0.5	-0.6		
			rico en liquido (I)	Sph	N/D	-0.2	-0.9		
			rico en liquido (I)	Sph	125	-2.4	-3.5		
			rico en liquido (I)	Sph	154	-1.2	-2.3		
			rico en liquido (I)	Sph	135	-0.9	-1.7		
B031016A	3 Vetas II	T3A	rico en liquido (I)	Sph	148.1	-5.8	-6.7	6.875	10.4
			rico en liquido (I)	Sph	157.2	-4.6	-5.5		
			rico en liquido (I)	Sph	149.2	N/D	N/D		
			rico en liquido (I)	Sph	144.7	N/D	N/D		
			rico en liquido (I)	Sph	146.2	-7	-7.9		
			rico en liquido (I)	Sph	N/D	-6.5	-7.4		
			rico en liquido (I)	Sph	152.9	N/D	N/D		
			rico en liquido (I)	Sph	152.9	N/D	N/D		
	T3B	rico en liquido (I)	Sph	117.8	-0.2	-1.1	0.9	1.6	
		rico en liquido (I)	Sph	134.9	0.3	-0.6			
		rico en liquido (I)	Sph	132.3	N/D	N/D			
		rico en liquido (I)	Sph	134.2	-0.1	-1			
		rico en vapor?	Sph	132.4	N/D	N/D			
BC11	La Fortuna	T1.2	rico en liquido (I)	Sph	240	-5.3	-6.1	6.26	9.5
			rico en liquido (I)	Sph	235	-5.4	-6.2		
			rico en liquido (I)	Sph	247	-5.7	-6.5		
			rico en liquido (I)	Sph	236	-5.4	-6.2		
			rico en liquido (I)	Sph	239	-5.5	-6.3		
			rico en liquido (I)	Sph	239.4	-5.46	-6.26		
BC11	La Fortuna	T3	rico en liquido (II)	Qtz	250	-0.4	-0.4	0.4	0.7
			rico en liquido (II)	Qtz	N/D	-0.3	-0.5		
			rico en liquido (II)	Qtz	250	-0.5	-0.3		
			rico en liquido (II)	Qtz	N/D	-0.4	-0.4		
			rico en liquido (II)	Qtz	249	-0.3	-0.5		
BC03C	Cantera 1	T1	rico en liquido (I)	Qtz	250	-2.9	-3.7	4.1	6.6
			rico en liquido (I)	Qtz	248	-4	-4.8		
			rico en liquido (I)	Qtz	N/D	-3.6	-4.4		
			rico en liquido (I)	Qtz	246	-3	-3.8		
			rico en vapor(I)	Qtz	248	N/D	N/D		
			rico en vapor(I)	Qtz	248	N/D	N/D		
			rico en liquido (I)	Qtz	246	-3	-3.8		
B031016A	La Fortuna	T1	rico en liquido (II)	Cal	136	-2.2	-3	3.18	5.2
			rico en liquido (II)	Cal	135	-2.7	-3.5		
			rico en liquido (II)	Cal	136	-2.3	-3.1		
			rico en liquido (II)	Cal	138	-2.2	-3		
			rico en liquido (II)	Cal	138	-2.5	-3.3		
B031016A	La Fortuna	T2	rico en liquido (I)	Sph	120	-7.7	-8.5	8.84	12.7
			rico en liquido (I)	Sph	122	-7.9	-8.7		
			rico en liquido (I)	Sph	126	-8.4	-9.2		
			rico en liquido (I)	Sph	125	-7.7	-8.5		
			rico en liquido (I)	Sph	130	-8.5	-9.3		

Tabla 11: Datos obtenidos en microtermometría.

Anexo H

Muestra	Altitud	Host	FIA's	Min.	Rango T _h	Prom.	Rango T _m	Prom.
BC03C	715	Qtz	A	no	245 - 250	248	-3.7 to -4.8	-4.1
B-T1	670	Sph	D	si	138 - 155	145	-0.9 to -3.5	-1.7
B-T2	670	Sph	D	si	125 - 154	135	-0.6 to -3.5	-1.7
A-T1	670	Cal	E	no	135 - 138	137	-3.0 to -3.5	-3.2
A-T2	670	Sph	D	si	120 - 130	125	-8.5 to -9.3	-8.8
A-T3A	670	Sph	D	si	145 - 157	150	-5.5 to -7.9	-6.9
A-T3B	670	Sph	D	si	118 - 135	130	-0.6 to -1.1	-0.9
T1.2	625	Sph	D	si	235 - 247	239	-6.1 to -6.5	-6.3
BC11-T3	625	Qtz	C	no	249 - 250	250	-0.3 to -0.5	-0.4
BC13	560	Qtz	B	no	-	-		

Tabla 12: Tabla resumen de los datos de microtermometría. Muestra BC13 corresponde a un arreglo de inclusiones fluidas con únicamente inclusiones ricas en vapor. Altitud: en metros sobre el nivel del mar, Min: presencia de mineralización presente en las inclusiones, T_h: temperatura de homogenización, T_m: temperatura de último fundido.

$$\text{Salinidad (\% en peso)} = 1.78 \cdot T_m - 0.0442 \cdot T_m^2 + 0.000557 \cdot T_m^3 \text{ (Bodnar, 1992)}$$

Anexo I

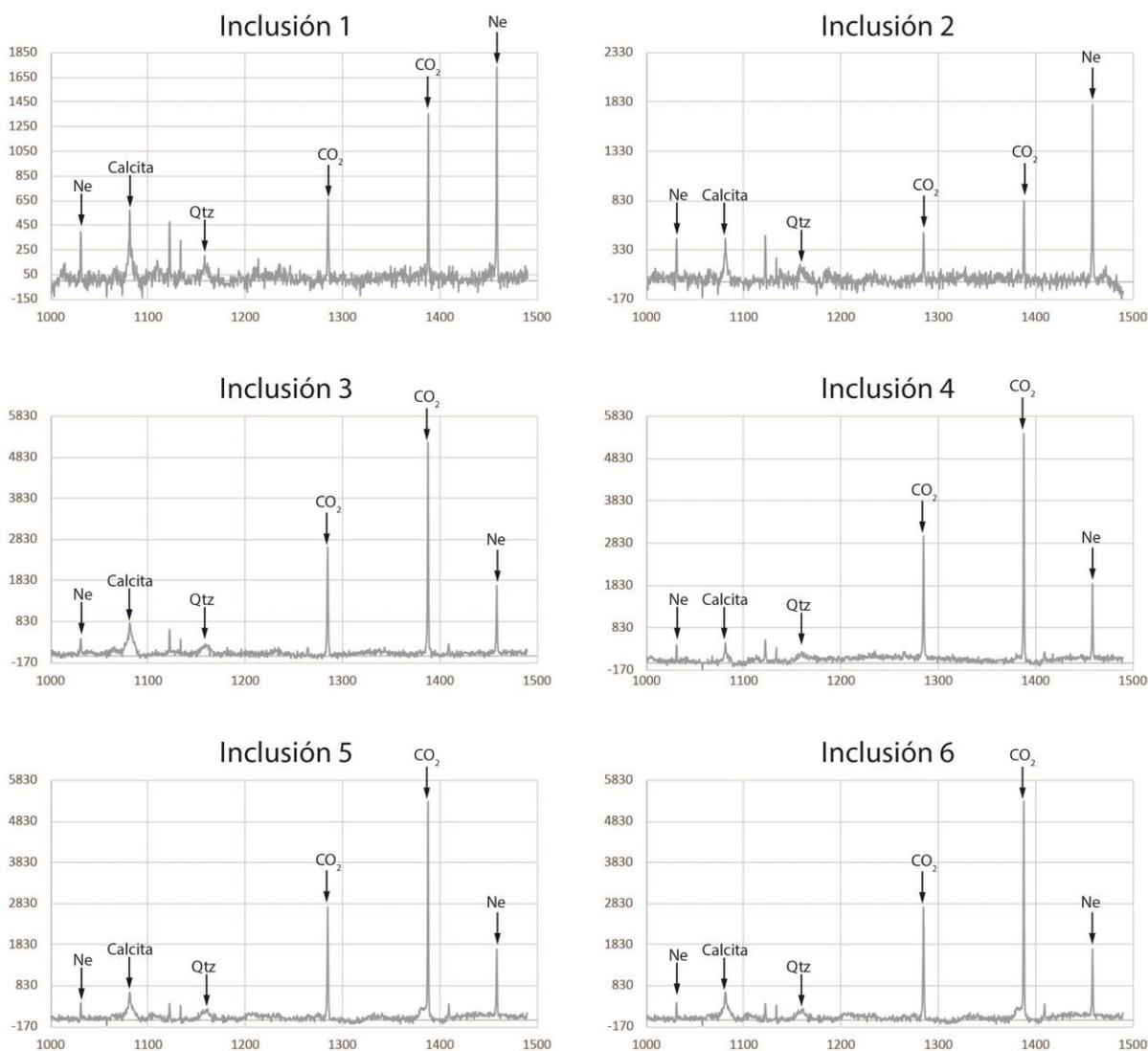


Figura 51: Raman obtenido en arreglo de inclusiones fluidas secundarias en cuarzo zonal

BC11-T3	W_1 (cm ⁻¹)	W_2 (cm ⁻¹)	Δ	d (g/cm ³)	P_{psi}
Inc 1	1285.006	1387.921	102.915	0.09	567.896
Inc 2	1285.006	1387.921	102.915	0.09	567.896
Inc 3	1284.520	1387.443	102.923	0.10	580.223
Inc 4	1284.520	1387.443	102.923	0.10	580.223
Inc 5	1284.520	1387.443	102.923	0.10	580.223
Inc X1	1284.520	1387.443	102.923	0.10	580.223
Inc X2	1285.006	1387.921	102.915	0.09	567.896
Avg	1284.728	1387.648	102.920	0.10	575.626

Tabla 13: Valores de fermi doublet, densidad y presión de CO₂ en Arreglos de Inclusiones Fluidas secundarias en cuarzo zonal.

Anexo J

Muestra	Mina	FIA	Na (23)	K (39)	Ca (40)	Mn (55)	Fe (56)	Cu (63)	Ga (69)	Se (82)	Sr (88)	Ag (107)	
B031016B	3 Vetas II	T1	2056.2	NM	986.7	NM	NM	8220.7	NM	535.1	NM	56.4	
			1926.4	NM	704.9	NM	NM	7854.9	NM	625.0	NM	63.5	
			5482.9	NM	1711.1	NM	NM	853.8	NM	287.6	NM	34.6	
			5763.6	NM	1644.9	NM	NM	899.9	NM	LOD	NM	26.1	
B031016B	3 Vetas II	T2	4450.7	1140.2	1611.6	NM	NM	430.5	NM	LOD	NM	80.4	
			7632.4	101.6	780.3	NM	NM	1935.1	NM	LOD	NM	83.8	
			2982.9	692.9	1297.3	NM	NM	3826.9	NM	LOD	NM	27.3	
B031016A	3 Vetas II	T3A	10572.6	1714.8	5461.8	NM	NM	8437.8	NM	LOD	324.5	581.0	
			7792.2	990.7	2274.2	NM	NM	28563.7	NM	LOD	105.2	1633.4	
			19470.1	3950.0	6297.7	NM	NM	6397.1	NM	LOD	270.3	1226.1	
			20910.5	4821.1	9287.6	NM	NM	6561.1	NM	LOD	409.4	96.0	
			T3B	2468.3	693.0	862.1	NM	NM	311.7	NM	42.9	43.7	9.3
				2670.9	503.1	845.3	NM	NM	224.2	NM	48.8	51.9	25.0
				152.9	28.2	52.9	NM	NM	7001.3	NM	7.0	2.8	4.0
				649.1	36.1	280.0	NM	NM	6213.6	NM	LOD	3.5	2.6
			3395.3	772.9	1115.6	NM	NM	236.3	NM	77.8	35.7	24.6	
BC11	La Fortuna	T1.2	19376.7	5549.7	2820.3	NM	NM	9712.3	NM	LOD	427.9	1379.6	
			15235.7	3621.6	1228.6	NM	NM	19182.9	NM	LOD	314.9	1310.4	
			17184.3	3477.9	1725.4	NM	NM	13229.0	NM	LOD	237.1	2167.8	
			15058.0	4516.2	2136.6	NM	NM	14852.9	NM	LOD	150.7	2182.9	
			12177.7	3684.6	1369.6	NM	NM	22457.4	NM	LOD	90.8	1162.6	
BC11	La Fortuna	T3	1751.4	1086.6	153.7	LOD	25.1	NM	LOD	LOD	15.0	LOD	
			1539.6	1183.3	LOD	LOD	LOD	NM	3.0	LOD	413.9	5.6	
			1856.8	352.1	LOD	LOD	LOD	NM	13.5	LOD	729.9	16.6	
			1617.9	1518.9	LOD	LOD	LOD	NM	LOD	LOD	11.3	LOD	
BC03C	Cantera 1	T1	15319.6	10339.2	2402.4	42.4	126.5	NM	10.3	LOD	106.9	LOD	
			14631.4	9804.4	3119.3	LOD	264.7	NM	LOD	LOD	98.6	LOD	
			13433.8	9697.9	3964.2	258.8	645.2	NM	LOD	LOD	97.9	LOD	
B031016A	La Fortuna	T1	17353.9	1097.9	NM	NM	NM	NM	NM	NM	3372.8	NM	
B031016A	La Fortuna	T2	5017.7	NM	1919.8	NM	NM	45922.5	138.7	NM	102.6	27.9	
			16027.5	NM	5774.8	NM	NM	30422.8	1180.6	NM	321.6	213.3	
			14839.8	NM	3789.2	NM	NM	32880.6	2046.1	NM	286.9	347.9	

Datos (ppm) obtenidos en LA-ICPMS en inclusiones fluidas. NM: No Medido en AMS por alto nivel de ruido, LOD: bajo el límite de detección

Muestra	Mina	FIA	Cd (114)	In (115)	Sb (121)	Te (125)	Cs (133)	Ba (138)	Au (197)	Pb (208)	Bi (209)
B031016B	3 Vetas II	T1	NM	NM	NM	LOD	NM	10.8	LOD	41.9	NM
			NM	NM	NM	LOD	NM	7.4	LOD	LOD	NM
			NM	NM	NM	LOD	NM	LOD	LOD	63.8	NM
			NM	NM	NM	LOD	NM	LOD	LOD	66.7	NM
B031016B	3 Vetas II	T2	NM	LOD	NM	LOD	1.6	8.2	LOD	NM	LOD
			NM	LOD	NM	LOD	LOD	0.4	LOD	NM	1.5
			NM	0.2	NM	LOD	0.6	7.4	0.1	NM	0.3
B031016A	3 Vetas II	T3A	NM	LOD	NM	LOD	LOD	NM	LOD	5661.5	NM
			NM	8.9	NM	LOD	8.6	NM	LOD	7398.6	NM
			NM	19.4	NM	LOD	26.4	NM	LOD	6862.5	NM
			NM	2.2	NM	LOD	17.6	NM	LOD	413.4	NM
		T3B	NM	LOD	NM	NM	0.3	NM	LOD	55.1	NM
			NM	LOD	NM	NM	0.5	NM	LOD	144.2	NM
			NM	0.1	NM	NM	0.1	NM	0.0	14.6	NM
			NM	LOD	NM	NM	LOD	NM	0.0	7.9	NM
BC11	La Fortuna	T1.2	NM	165.9	NM	99.5	21.9	157.3	LOD	2670.4	NM
			NM	202.2	NM	LOD	14.1	123.5	5.6	2271.5	NM
			NM	474.5	NM	LOD	LOD	144.8	LOD	4869.6	NM
			NM	387.1	NM	LOD	8.7	107.8	LOD	4621.7	NM
			NM	154.5	NM	LOD	5.9	62.8	LOD	2531.4	NM
BC11	La Fortuna	T3	NM	LOD	LOD	LOD	NM	LOD	LOD	NM	NM
			NM	LOD	LOD	LOD	NM	70.3	LOD	NM	NM
			NM	15.7	24.5	LOD	NM	67.1	LOD	NM	NM
			NM	LOD	LOD	LOD	NM	7.1	LOD	NM	NM
BC03C	Cantera 1	T1	NM	0.5	NM	LOD	2.9	NM	LOD	LOD	NM
			NM	LOD	NM	LOD	31.1	NM	LOD	LOD	NM
			NM	LOD	NM	LOD	3.0	NM	LOD	22.1	NM
B031016A	La Fortuna	T1	NM								
B031016A	La Fortuna	T2	NM	0.4	NM	NM	2.0	31.2	LOD	107.8	NM
			NM	9.4	NM	NM	7.4	156.1	4.3	890.2	NM
			NM	11.7	NM	NM	LOD	161.8	11.9	1730.6	NM

Tabla 14: Datos (ppm) obtenidos en LA-ICPMS en inclusiones fluidas. NM: No Medido en AMS por alto nivel de ruido, LOD: bajo el límite de detección

Anexo K

Muestra	Mina	ID	Mineral	B (11)	Na (23)	Mg (25)	Al (27)	Si (28)	K (39)	Ca (40)
B031016B	3 Vetas II	T1	Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	67.3	1.8	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	57.2	LOD	LOD
			Sph	LOD	2.8	LOD	LOD	45.5	LOD	1.7
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	39.0	LOD	LOD
			Sph	LOD	2.1	LOD	LOD	81.6	LOD	1.8
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	81.4	LOD	4.4
B031016A	3 Vetas II	T3AT3B	Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	83.7	LOD	1.3
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	68.1	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	61.3	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	27.4	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	28.6	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	31.6	1.2	LOD
			Qz	LOD	188.6	LOD	434.6	466417.1	169.6	105.8
BC11		T1.2	Cpy	3.4	126.4	LOD	13.6	71.6	34.3	34.2
			Cpy	LOD	40.6	LOD	6.1	60.6	10.3	10.7
			Sph	2.5	25.0	LOD	LOD	72.8	8.7	2.7
			Cal	LOD	34.7	6170.0	201.6	812.6	53.6	480305.2
			Cpy	3.3	426.6	LOD	LOD	64.6	73.2	20.2
			Py en Qtz. Jig	3.2	LOD	LOD	4.7	40.6	3.8	LOD
			Qtz Euh.	LOD	541.4	LOD	4908.9	460907.1	2243.6	94.0
BC11		T3	Cpy	LOD	39.4	LOD	196.6	102.7	17.6	18.8
			Cpy	LOD	86.6	LOD	LOD	101.3	19.2	11.3
			Sph	LOD	33.8	LOD	LOD	108.7	7.9	12.0
			Sph	LOD	2.2	LOD	LOD	104.6	LOD	1.3
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	103.4	LOD	LOD
			Qtz	LOD	205.4	LOD	1604.7	465414.0	328.8	131.5
			B031016A		T2	Ga	LOD	13.6	LOD	LOD
Ga	LOD	LOD				LOD	LOD	32.7	LOD	LOD
Ga	LOD	0.8				LOD	LOD	30.2	LOD	0.7
Sph	LOD	LOD				LOD	1.7	86.0	LOD	1.3
Ca	LOD	LOD				128.4	LOD	170.6	LOD	710231.5
Sph	LOD	1.2				LOD	4.2	75.3	4.8	3.3
Sph	LOD	6.0				LOD	LOD	80.9	2.1	1.0
Ga	LOD	1.6				LOD	LOD	34.4	LOD	0.4
Sph	LOD	LOD				150.3	218.5	362.7	LOD	1.3

Datos obtenidos en LA-ICPMS en minerales. LOD: bajo el límite de detección (tabla 1 de 6).

Muestra	Mina	ID	Mineral	Sc (45)	Ti (49)	V (51)	Mn (55)	Fe (56)	Cu (63)	Zn (66)
B031016B	3 Vetas II	T1	Sph	LOD	109.7	0.4	403.5	14110.1	70.5	785085.9
			Sph	LOD	111.3	0.4	401.1	14354.5	176.2	784594.8
			Sph	LOD	111.3	0.3	201.5	11765.1	2273.0	785754.2
			Sph	LOD	112.4	0.4	377.1	12663.6	74.4	786991.2
			Sph	LOD	105.4	0.4	386.6	13266.4	88.3	785839.4
			Sph	LOD	107.4	0.2	434.4	13625.7	95.1	785273.8
B031016A	3 Vetas II	T3AT3B	Sph	LOD	89.6	0.3	303.6	5404.9	8.9	793770.3
			Sph	LOD	92.3	0.4	336.9	5874.8	20.8	793134.1
			Sph	LOD	91.4	0.4	401.6	4935.8	15.9	794493.8
			Ga	LOD	36.5	0.2	LOD	0.2	9.9	39.7
			Ga	LOD	36.0	LOD	LOD	1.2	6.1	164.7
			Ga	LOD	37.1	0.2	LOD	1.4	9.1	229.1
			Qz	144.4	LOD	LOD	LOD	10.4	LOD	77.9
BC11		T1.2	Cpy	LOD	132.6	0.4	9.9	336783.3	451868.2	60.9
			Cpy	LOD	134.9	LOD	1.5	345212.1	443419.5	47.7
			Sph	LOD	89.2	0.3	27.4	3877.5	1331.4	794193.7
			Cal	LOD	34.1	3.6	48618.1	98259.5	97097.0	3352.4
			Cpy	LOD	137.6	0.4	1.7	346191.4	441898.8	69.9
			Py en Qtz. Jig Qtz Euh.	LOD 135.8	270.6 30.9	0.8 LOD	LOD 7.5	776791.4 40.5	5.1 LOD	LOD 214.1
BC11		T3	Cpy	LOD	195.2	0.6	4.4	359524.8	428165.7	59.0
			Cpy	LOD	194.9	0.6	1.8	360358.4	427594.4	72.5
			Sph	LOD	126.7	0.4	18.9	6315.2	4567.0	788324.6
			Sph	LOD	125.3	0.4	31.8	4323.9	617.3	794517.6
			Sph	LOD	122.1	0.4	26.7	3827.4	784.9	794754.8
			Qtz	119.0	11.1	LOD	4.9	24.5	9.1	81.6
B031016A		T2	Ga	0.6	40.1	0.2	LOD	0.4	1.3	21.5
			Ga	LOD	42.1	0.1	LOD	0.3	2.0	34.7
			Ga	LOD	40.3	0.1	LOD	0.3	2.1	26.4
			Sph	LOD	105.3	0.4	401.2	4041.6	603.2	794851.6
			Ca	LOD	LOD	LOD	3763.4	270.6	LOD	5.5
			Sph	LOD	105.6	0.4	1272.1	4920.0	22.0	793349.1
			Sph	LOD	108.2	0.4	1468.5	4760.9	9.5	793575.2
			Ga	LOD	40.6	0.1	0.3	0.6	1.0	8.1
			Sph	LOD	108.0	0.5	182.7	9441.2	6059.7	783195.0

Datos obtenidos en LA-ICPMS en minerales. LOD: bajo el límite de detección (tabla 2 de 6).

Muestra	Mina	ID	Mineral	Ga (69)	Ge (72)	Ge (74)	As (75)	Se (82)	Sr (88)	Mo (98)
B031016B	3 Vetas II	T1	Sph	0.6	LOD	0.3	LOD	23.8	LOD	LOD
			Sph	8.3	0.3	0.2	LOD	15.9	LOD	LOD
			Sph	0.3	LOD	0.3	LOD	11.2	0.0	LOD
			Sph	0.4	0.3	0.3	LOD	13.6	LOD	0.1
			Sph	18.0	0.6	0.3	LOD	13.7	0.0	0.1
			Sph	11.5	LOD	0.3	LOD	17.4	0.1	0.1
B031016A	3 Vetas II	T3AT3B	Sph	2.7	0.3	LOD	LOD	4.6	0.0	LOD
			Sph	11.2	0.3	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	12.1	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	9.2	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	3.7	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	0.2	LOD	24.6	0.0	LOD
			Qz	1.7	LOD	1.8	LOD	LOD	4.3	LOD
BC11		T1.2	Cpy	LOD	1.0	LOD	5.9	LOD	2.5	LOD
			Cpy	LOD	0.8	LOD	LOD	5.8	0.4	LOD
			Sph	3.4	LOD	LOD	1.5	LOD	0.2	LOD
			Cal	0.8	LOD	LOD	LOD	7.1	248.7	LOD
			Cpy	0.3	0.8	LOD	LOD	19.5	2.5	LOD
			Py en Qtz. Jig Qtz Euh.	LOD	LOD	LOD	5.4	33.1	LOD	LOD
BC11		T3	Cpy	0.1	1.8	0.4	5.0	13.4	0.3	LOD
			Cpy	LOD	1.2	LOD	3.8	9.5	1.0	LOD
			Sph	12.0	LOD	LOD	LOD	5.0	0.6	LOD
			Sph	7.3	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	14.2	LOD	LOD	LOD	4.6	LOD	LOD
			Qtz	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	7.5	LOD
B031016A		T2	Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	6.8	0.4	LOD
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	5.7	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	20.6	0.0	LOD
			Sph	5.3	LOD	LOD	LOD	LOD	0.0	LOD
			Ca	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	366.7	LOD
			Sph	9.9	LOD	LOD	LOD	2.1	LOD	LOD
			Sph	2.7	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	10.4	LOD	LOD
			Sph	0.3	LOD	LOD	LOD	9.7	LOD	LOD

Datos obtenidos en LA-ICPMS en minerales. LOD: bajo el límite de detección (tabla 3 de 6).

Muestra	Mina	ID	Mineral	Ag (107)	Cd (114)	In (115)	Sn (120)	Sb (121)	Te (125)
B031016B	3 Vetas II	T1	Sph	3.2	3042.0	119.6	5.9	LOD	LOD
			Sph	1.5	3071.7	227.1	27.0	LOD	LOD
			Sph	4.8	2873.0	53.7	10.8	0.4	LOD
			Sph	2.2	2684.2	104.5	20.1	LOD	LOD
			Sph	1.8	3148.9	92.3	19.8	LOD	LOD
			Sph	2.3	3243.9	132.7	14.8	LOD	LOD
B031016A	3 Vetas II	T3AT3B	Sph	1.2	3714.2	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	2.4	3849.6	0.0	LOD	LOD	LOD
			Sph	1.2	3372.1	0.6	0.3	LOD	LOD
			Ga	320.0	27.3	0.0	0.2	119.6	172.1
			Ga	301.4	29.6	0.0	0.1	129.4	193.2
			Ga	525.0	22.8	0.0	0.2	121.1	307.4
BC11		T1.2	Qz	0.4	3.9	LOD	LOD	LOD	LOD
			Cpy	230.4	1.8	2.7	1.0	9.6	1.6
			Cpy	218.3	LOD	2.8	0.9	6.2	0.8
			Sph	33.4	3749.4	6.6	0.4	2.8	0.2
			Cal	45.0	25.8	1.4	0.3	LOD	LOD
			Cpy	216.8	0.7	2.3	1.2	3.0	0.8
BC11		T3	Py en Qtz. Jig	2.8	LOD	LOD	LOD	LOD	26.4
			Qtz Euh.	LOD	LOD	LOD	LOD	2.4	2.3
			Cpy	238.1	1.3	1.3	1.0	10.7	2.1
			Cpy	246.1	1.2	1.4	1.0	10.4	1.9
			Sph	44.2	3682.0	3.0	0.4	4.9	1.0
			Sph	13.5	3637.7	3.0	1.5	1.5	LOD
B031016A		T2	Sph	10.0	3767.5	4.6	LOD	0.4	LOD
			Qtz	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Ga	263.4	21.6	0.0	0.1	119.5	137.2
			Ga	245.7	24.4	0.0	0.1	130.9	141.9
			Ga	281.8	16.9	0.0	0.1	113.4	165.3
			Sph	3.1	3266.7	1.2	0.2	1.1	LOD
			Ca	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	2.8
			Sph	2.0	3577.3	0.2	LOD	LOD	LOD
			Sph	1.0	3304.6	0.3	LOD	LOD	LOD
Ga	298.9	24.0	0.0	0.2	124.0	204.5			
Sph	7.1	2989.4	48.8	4.9	LOD	LOD			

Datos obtenidos en LA-ICPMS en minerales. LOD: bajo el límite de detección (tabla 4 de 6).

Muestra	Mina	ID	Mineral	Cs (133)	Ba (138)	La (139)	Ce (140)	Yb (172)	Ta (181)
B031016B	3 Vetas II	T1	Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	0.0	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	0.0	LOD	LOD	LOD
B031016A	3 Vetas II	T3AT3B	Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	0.0	0.0
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	0.0	0.0
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	0.0	0.0
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	0.0	0.0
			Ga	LOD	LOD	LOD	LOD	0.0	0.0
			Ga	LOD	0.0	LOD	LOD	0.0	0.0
BC11		T1.2	Cpy	0.1	0.9	LOD	LOD	LOD	LOD
			Cpy	LOD	0.2	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	0.1	LOD	LOD	LOD	LOD
			Cal	LOD	11.4	5.7	10.7	0.5	LOD
			Cpy	0.2	1.5	LOD	LOD	LOD	LOD
			Py en Qtz. Jig Qtz Euh.	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
BC11		T3	Cpy	0.0	0.1	LOD	LOD	LOD	LOD
			Cpy	0.1	0.5	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	0.2	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Qtz	0.2	18.2	8.0	LOD	LOD	LOD
B031016A		T2	Ga	LOD	0.0	LOD	LOD	LOD	LOD
			Ga	LOD	0.0	0.0	LOD	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	0.0	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Ca	LOD	1.0	0.0	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	0.0	LOD	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
			Ga	LOD	LOD	0.0	LOD	LOD	LOD
			Sph	LOD	0.0	LOD	LOD	LOD	LOD

Datos obtenidos en LA-ICPMS en minerales. LOD: bajo el límite de detección (tabla 5 de 6).

Muestra	Mina	ID	Mineral	W (182)	Au (197)	Tl (205)	Pb (208)	Bi (209)	U (238)
B031016B	3 Vetas II	T1	Sph	LOD	LOD	LOD	3.0	0.0	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	1.7	0.0	LOD
			Sph	LOD	0.0	LOD	9.5	0.4	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	1.6	0.3	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	4.1	0.0	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	25.1	0.0	LOD
B031016A	3 Vetas II	T3AT3B	Sph	LOD	LOD	LOD	5.3	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	5.1	LOD	LOD
			Sph	LOD	LOD	LOD	2.6	LOD	LOD
			Ga	LOD	0.0	10.1	927312.0	138.6	LOD
			Ga	LOD	0.0	10.4	927208.9	87.8	LOD
			Ga	LOD	0.1	10.6	926438.6	394.4	LOD
BC11		T1.2	Qz	0.9	LOD	LOD	83.3	LOD	LOD
			Cpy	LOD	0.0	LOD	23.4	1.7	LOD
			Cpy	LOD	LOD	LOD	41.4	2.1	LOD
			Sph	LOD	0.1	LOD	24.9	0.8	LOD
			Cal	LOD	LOD	LOD	101.5	0.7	LOD
			Cpy	LOD	LOD	LOD	14.1	1.7	LOD
BC11		T3	Py en Qtz. Jig	LOD	0.6	LOD	4.6	1.4	LOD
			Qtz Euh.	LOD	LOD	LOD	233.3	LOD	LOD
			Cpy	LOD	0.0	0.1	79.9	5.5	0.0
			Cpy	LOD	LOD	LOD	36.5	3.1	0.0
			Sph	LOD	0.1	LOD	50.4	2.2	0.0
			Sph	LOD	0.0	LOD	14.1	0.8	0.0
B031016A		T2	Sph	LOD	LOD	LOD	13.5	0.2	0.0
			Qtz	LOD	LOD	LOD	27.1	LOD	0.0
			Ga	0.0	0.1	14.2	927418.7	108.2	LOD
			Ga	0.0	0.0	14.4	927481.5	69.8	LOD
			Ga	0.0	0.0	13.8	927355.8	150.8	LOD
			Sph	0.0	0.0	LOD	17.1	LOD	LOD
			Ca	0.1	LOD	LOD	4.9	LOD	LOD
			Sph	0.0	0.0	LOD	9.0	0.0	LOD
			Sph	0.0	LOD	0.0	8.7	LOD	LOD
Ga	0.0	0.1	14.7	927400.8	52.4	LOD			
Sph	0.0	0.0	LOD	21.4	LOD	LOD			

Tabla 15: Datos obtenidos en LA-ICPMS en minerales. LOD: bajo el límite de detección (tabla 6 de 6).

Anexo L

ppm	Muestra Mineral	B-T1 Sph	B-T2 Sph	A-T2 Sph	A-T3A Sph	A-T3B Sph	T1.2 Sph	Aporte (%)
Au	Inclusión	LOD	0.11	8.09	LOD	0.04	5.65	
	Host	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	0
Ag	Inclusión	45.1	63.8	196.4	884.1	13.1	1640.6	
	Host	2.1	6.2	8.3	43.6	1.1	181.4	4-11
In	Inclusión	LOD	0.2	7.2	10.2	0.3	276.8	
	Host	LOD	0.1	4	3.2	0.1	130	27-58
Te	Inclusión	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	99.5	
	Host	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	0
Se	Inclusión	482.6	LOD	LOD	LOD	44.1	LOD	
	Host	101.2	LOD	LOD	LOD	5.6	LOD	13-21

Tabla 16: Relación de aporte (% ppm) del host sobre la inclusión. Sph: esfalerita.

Anexo M

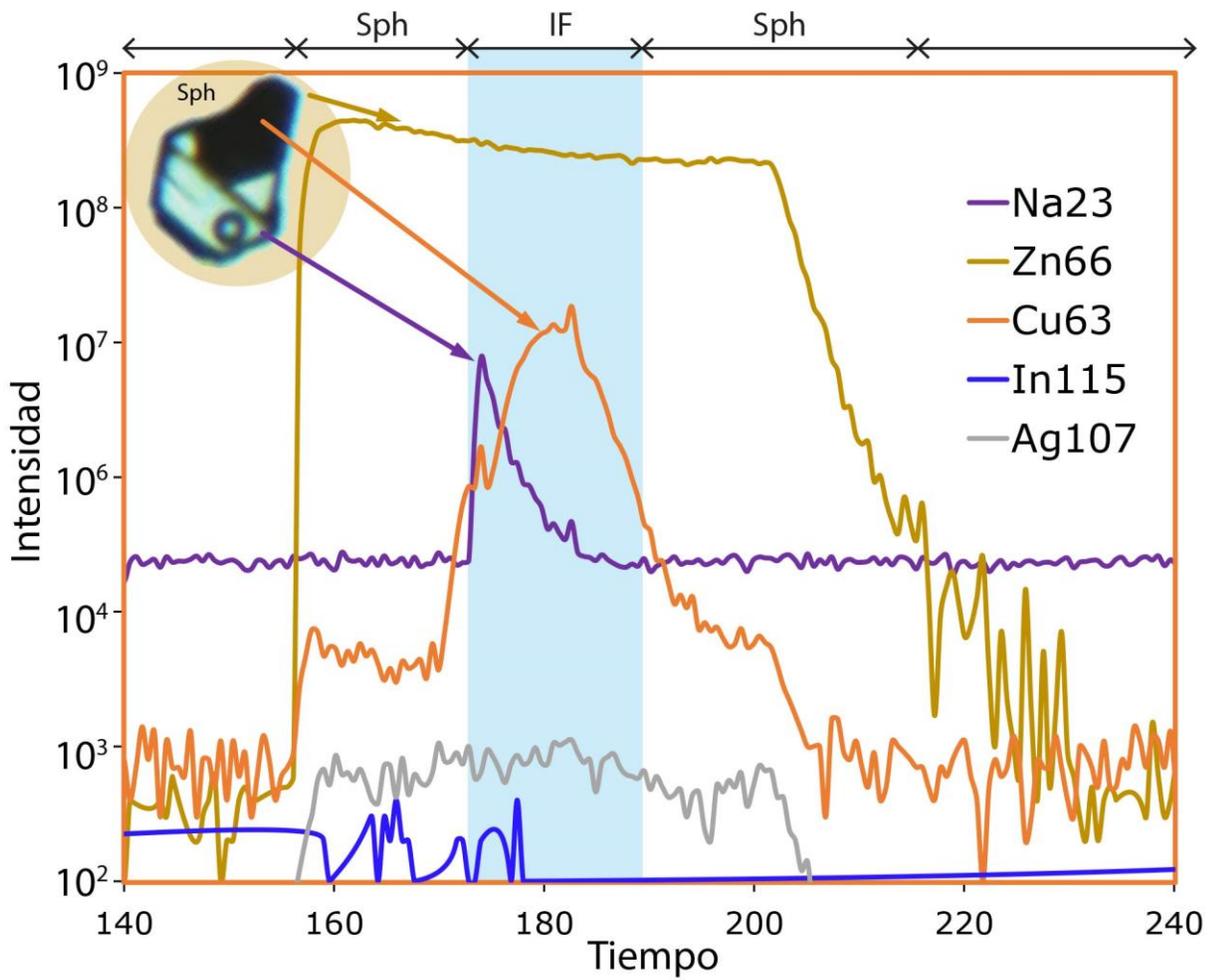


Figura 52: Ablación láser correspondiente a una inclusión del arreglo A-T2

Anexo N

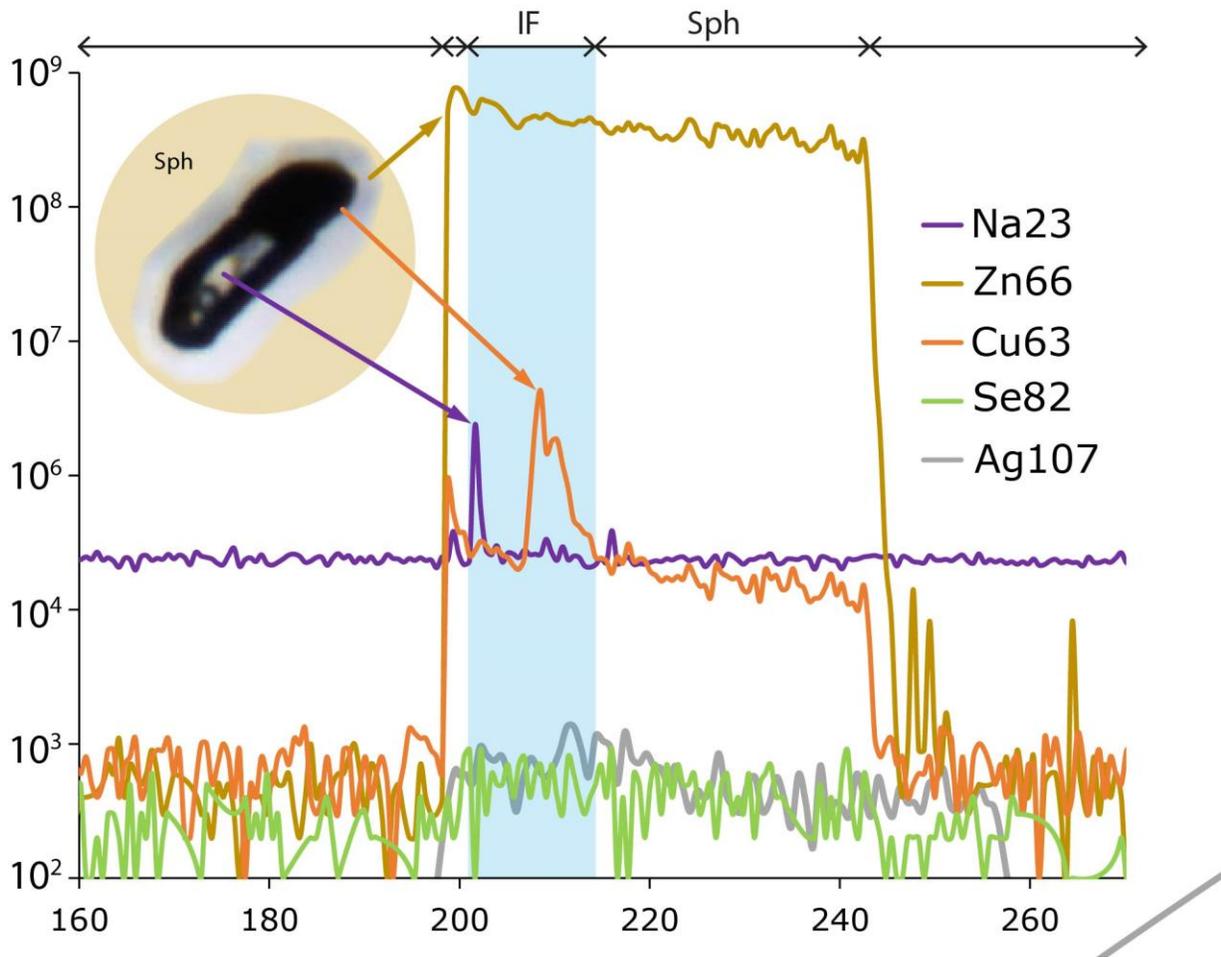


Figura 53: Ablación láser correspondiente a una inclusión del arreglo B-T1