



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA**

**ESTUDIO DE FASES Y PARAGÉNESIS DE LA
MINERALIZACIÓN SULFURADA DEL DEPÓSITO DE
ALTA SULFURACIÓN (HS) DE CERRO BÚFALO,
ANTOFAGASTA, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Martín Ignacio Gutiérrez Fuentes

Profesora Guía: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado.

Profesor Co-Guía: Sr. Juan Pablo Castillo Ramírez.

Profesor Comisión: Dr. Germán Enrique Velásquez Acosta.

Concepción, 2024

**Dedicado a mi Nona y mi Mama Gaby
Por su incansable esfuerzo para que yo llegara hasta aquí.**

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero agradecer a todo el personal de la empresa SQM, por la oportunidad que me brindaron de realizar mi memoria junto con ellos y recibirme en Cerro Búfalo de la forma más cálida posible. Agradezco al Sr. Juan Pablo Castillo, no solo por ser mi co-guía y la persona que confió en mi para realizar este trabajo, sino por inculcarme la importancia del desarrollo humano a la par del profesional, haciéndome ver la vida en la faena como la de una familia. Del mismo modo, agradezco a mis colegas geólogos, por hacer más amenas todas las tardes bajo el sol con sus risas, y por el inconmensurable valor de las enseñanzas que me entregaron para mi futura vida laboral. Por último, pero no menos importante, doy gracias a todos los asistentes, operadores, personal de aseo, cocina y campamento, por hacer que cada día me sintiera como en casa.

Agradezco a mi profesora guía, la Dra. Fernanda Álvarez Amado, por la confianza depositada en mi desde el primer minuto y no solo haber estado ahí para apoyarme en el ámbito académico, sino para darme aliento cada vez que se presento una dificultad en el camino. Del mismo modo, valoro la voluntad del Dr. Germán Velásquez de querer formar parte de la comisión de este trabajo, además de ser uno de los responsables de despertar mi interés hacia el bonito mundo de la exploración minera durante la carrera. No puedo dejar pasar la oportunidad de mostrar mi gratitud hacia Don Emiliano y Don Iván, encargados de elaborar los cortes transparentes utilizados en el presente trabajo, quienes además trabajaron con gran rapidez dados los plazos acotados.

Terminar este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de mi novia, Ignacia, quien iluminó mis días cada vez que las cosas se pusieron difíciles. Su sola presencia a mi lado fue siempre suficiente para encontrar motivación cuando esta me faltaba. Agradezco también a su familia, quienes siempre me recibieron en su casa con los brazos abiertos cada vez que lo necesité.

Durante la carrera, conocí a algunos de los mejores amigos que me ha entregado la vida. Llegar aquí no habría sido posible sin ustedes: Oyarzo, Mati, Nico, Álvaro, Maite, Dani, Flaco, David, Nelson, Fer, Espi, Palmo, Nachito, Nat, Benja, Boba, Tico, Tebi, Favio y Joaquito.

Mi familia, por supuesto, es otro pilar vital de este logro. No solo porque todos y cada uno de mis seres queridos se esforzó trabajando arduamente para poder brindarme los recursos necesarios para venir a estudiar a Concepción, sino el amor incondicional que sentí cada vez que regresé a casa. Espero pueda en algún momento futuro, de cualquier modo, retribuirles todo el cariño entregado.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
2. MARCO GEOLÓGICO.....	3
2.1 Contexto morfoestructural	3
2.2 Contexto metalogénico.....	3
2.3 Geología regional.....	4
2.3.1 Litologías.....	4
2.3.1.1 Grupo Caracoles (Jgc, Bajociano-Neocomiano).....	4
2.3.1.2 Formación Quebrada Mala (Ksqm, Cretácico Superior).....	5
2.3.1.3 Batolito Sierra del Buitre e intrusivos asociados (Kssb, ca. 86 Ma.).....	5
2.3.1.4 Formación Cinchado (PaEc, Paleoceno Superior – Eoceno Inferior).....	5
2.3.1.5 Pórfidos Ríolíticos (Epr, ca. 53 Ma.).....	6
2.3.1.6 Depósitos de Gravas Antiguas (Mg, Mioceno Inferior a Medio).....	6
2.3.1.7 Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (Mplia, Mioceno – Plioceno).....	6
2.3.1.8 Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos (PIHa, Pleistoceno-Holoceno)..	7
2.3.2 Geología estructural.....	7
2.3.2.1 Contexto y evolución tectónica.....	7
2.3.2.2 Dominios estructurales.....	7
2.4 Geología local.....	8
2.4.1 Litologías.....	9
2.4.1.1 Nivel andesítico (AND).....	9
2.4.1.2 Secuencias volcanosedimentarias a volcanoclásticas (VOLCSED).....	9
2.4.1.3 Secuencias de tobas dacíticas y de líticos (TDAC).....	9
2.4.1.4 Pórfidos dacíticos, riolíticos y <i>crowded</i> (PDAC).....	9
2.4.1.5 Brechas hidrotermales (BXH).....	10

2.4.1.6 Brechas freáticas (BXF).....	10
2.4.1.7 Pórfidos tardíos (PDACt).....	11
2.4.2 Estructuras.....	11
2.4.2.1 Modelo estructural preliminar.....	11
2.4.2.2 <i>Ledges</i>	11
2.5 Modelo del yacimiento.....	13
2.5.1 Suites de alteración.....	13
2.5.1.1 Alteración argílica supérgena (ARSUP).....	13
2.5.1.2 Alteración argílica avanzada (QZ-ALUN, QZ-KAO, KAO).....	13
2.5.1.3 Alteración propilítica (PROP).....	14
2.5.1.4 Alteraciones transicionales (SGV, SCC, SER, POT).....	14
2.5.2 Mineralización.....	15
2.5.2.1 Mineralización hipógena.....	15
2.5.2.2 Mineralización supérgena.....	16
2.5.2.2 Enriquecimiento secundario y zona mixta.....	17
2.5.3 Leyes minerales.....	17
3. METODOLOGÍA.....	18
3.1 Etapa de gabinete.....	18
3.2 Revisión de sondajes y análisis de muestras.....	18
3.3 Procesamiento de datos.....	19
3.4 Análisis de resultados.....	20
4. RESULTADOS.....	21
4.1 Litologías.....	21
4.2 Zonas de alteración.....	23
4.3 Mineralización sulfurada.....	26
4.3.1 Enargita.....	26
4.3.2 Tenantita.....	26
4.3.2.1 Tenantita bajo la cota 1350 m s.n.m.....	27
4.3.2.2 Tenantita entre las cotas 1450 y 1350 m s.n.m.....	28
4.3.2.3 Tenantita sobre la cota 1450 m s.n.m.....	29
4.3.3 Luzonita.....	29

4.3.4 Famatinita.....	30
4.3.5 Calcopirita y bornita.....	31
4.3.5.1 Calcopirita y bornita profundas.....	31
4.3.5.2 Calcopirita y bornita someras.....	32
4.3.6 Calcosina, digenita y covelina.....	33
4.4 Distribución de sulfuros.....	35
4.4.1 Sulfosales de Cu-As-(Sb).....	36
4.4.2 Calcopirita y bornita.....	37
4.4.3 Calcosina, digenita y covelina.....	37
5. DISCUSIÓN.....	40
5.1 Modelo litológico.....	40
5.2 Modelo de alteración.....	43
5.3 Secuencia paragénetica de sulfuros hipógenos.....	46
5.3.1 Etapa inicial de pirita.....	46
5.3.2 Etapa de sulfuración intermedia.....	47
5.3.2.1 Etapa progradante de calcopirita-bornita.....	47
5.3.2.2 Etapa progradante de tenantita.....	48
5.3.3 Etapa de alta sulfuración.....	51
5.3.3.1 Etapa de enargita.....	51
5.3.3.2 Etapa de calcosina-digenita.....	52
5.3.4 Etapa retrogradante.....	54
5.4 Modelo de mineralización.....	56
6. CONCLUSIONES.....	60
6.1 Conclusiones generales.....	60
6.2 Recomendaciones.....	61
REFERENCIAS.....	63
ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Cerro Búfalo en la franja metalogénica del Paleoceno – Eoceno.....	4
Figura 2.4.2.1. Modelo estructural de emplazamiento tardío (Piquer et al., 2021).....	12
Figura 2.4.2.2. <i>Ledges</i> en Guanaco (Jovic et al., 2021) y Mankayan (Chang et al., 2011)...	12
Figura 2.5.1.2. Fotografías de alteración argílica avanzada en Cerro Búfalo.....	14
Figura 2.5.2.1. Fotografías de mineralización hipógena en Cerro Búfalo.....	16
Figura 3.3.1. Vista en planta (Leapfrog) de la sección diagonal N°12.....	19
Figura 3.3.2. Distribución de las muestras estudiadas en perfil 1:4.000 (Leapfrog).....	20
Figura 4.1.2. Fotografías de litologías observadas en Cerro Búfalo.....	22
Figura 4.2.1. Fotografías y microfotografías de alteración observada en Cerro Búfalo.....	24
Figura 4.2.2. Fotografías de alteraciones profundas observadas en Cerro Búfalo.....	25
Figura 4.3.2.1. Microfotografías de tenantita bajo la cota 1350 m s.n.m.....	27
Figura 4.3.2.2. Microfotografías de tenantita entre la cota 1450 y 1350 m s.n.m.....	28
Figura 4.3.2.3. Microfotografías de tenantita sobre la cota 1350 m s.n.m.....	29
Figura 4.3.3. Microfotografías de luzonita.....	30
Figura 4.3.4. Microfotografías de famatinita.....	31
Figura 4.3.5.1. Microfotografías de calcopirita y bornita (ambiente profundo).....	32
Figura 4.3.5.2. microfotografías de calcopirita y bornita (ambiente somero).....	33
Figura 4.3.6.1. Microfotografías de calcosina y enargita.....	34
Figura 4.3.6.2. Microfotografías de calcosina y otros sulfuros.....	35
Figura 4.4.1. Perfil a escala 1:4.000 (Leapfrog) de distribución de sulfosales de Cu-As.....	36
Figura 4.4.2. Perfil a escala 1:4.000 (Leapfrog) de distribución de calcopirita-bornita.....	38
Figura 4.4.3 Perfil a escala 1:4.000 (Leapfrog) de distribución de calcosina-digenita.....	39
Figura 5.1.1. Modelo litológico a escala 1:2.000 (Leapfrog) de la sección estudiada.....	41
Figura 5.1.2. Esquema comparativo entre ocurrencias de mineralización en Cerro Búfalo..	42
Figura 5.2. Modelo de alteración a escala 1:2.000 (Leapfrog) de la sección estudiada.....	44
Figura 5.3.1. Microfotografía de pirita asociada a la etapa temprana de mineralización.....	47
Figura 5.3.2.1. Esquema comparativo entre Cerro Búfalo y Valeriano (Sillitoe, 2016).....	50
Figura 5.3.2.2 Diagrama $\log fO_2$ vs $\log fS_2$ (Maydagán, 2013) aplicado a Cerro Búfalo.....	50
Figura 5.3.3.1. Diagrama de fases de calcosina-digenita (Chaudhari et al., 2021).....	53

Figura 5.3.3.2. Microfotografías de evidencias de reemplazo en la etapa HS.....	54
Figura 5.3.4. Microfotografías de evidencias de reemplazo en la etapa retrogradante.....	55
Figura 5.4.1. Modelo de mineralización a escala 1:2.000 de la sección estudiada.....	57
Figura 5.4.2. Diagrama de fases (Einaudi et al., 2003) con la curva evolutiva de Búfalo.....	58
Figura 5.4.3. Diagrama de la evolución temporal de Búfalo (Adaptado de Bartos, 1989)...	58
Figura 5.4.2. Cuadro de evolución paragenética de minerales metálicos en Cerro Búfalo...	59

INDICE DE ANEXOS

ANEXO N°1: Descripciones de muestras – Petrografía macroscópica.....	67
M1.....	67
M2.....	67
M3.....	68
M4.....	68
M5.....	68
M6A.....	69
M6B.....	69
M7.....	69
M8.....	70
M9.....	70
M10.....	70
M11.....	71
M12.....	71
M13.....	71
M14.....	72
M15.....	72
M16.....	72
M17.....	73
M18.....	73
M19.....	73
M20.....	74
M21.....	74
M22.....	74
M23.....	75
M24.....	75
M25.....	75
M26.....	76
M27.....	76

M28.....	76
M29.....	77
M30.....	77
M31.....	77
M32.....	78
M33.....	78
M34.....	78
M35.....	79
M36.....	79
M37.....	79
M38.....	80
M39.....	80
M40.....	80
M41.....	81
M42.....	81
M43.....	81
M44.....	82
M45.....	82
ANEXO N°2: Descripciones de cortes transparentes – Petrografía microscópica.....	83
CT03.....	83
CT05.....	84
CT12.....	85
CT13.....	86
CT22.....	87
CT24.....	88
CT25.....	89
CT26.....	90
CT27.....	91
CT30.....	92
CT34.....	93
CT35.....	94

CT36.....	95
CT37.....	96
CT40.....	97
CT41.....	98
CT43.....	99
CT44.....	100
CT45.....	101

RESUMEN

Cerro Búfalo corresponde a un depósito de Cu y Au (-) ubicado en la comuna de Sierra Gorda, Chile. La empresa SQM ha realizado labores de exploración y campañas de sondajes en el yacimiento desde 2018. Desde ese año, hasta la fecha, se ha logrado interpretar las principales características del yacimiento, reconociéndose como un sistema epitermal de alta sulfuración (HS) emplazado en estructuras silicatadas denominadas *ledge*. Los sulfuros más abundantes son pirita y enargita, con menor cantidad de calcopirita, tenantita, calcosina hipógena, bornita, entre otras.

En el presente trabajo, se realizó una labor de revisión de sondajes que concluyó con la descripción macroscópica de 46 muestras, realizándose cortes transparentes pulidos para análisis microscópico de 19 de ellas. La información obtenida de estas labores fue procesada en software Leapfrog, obteniéndose como producto final perfiles a escala 1:2.000 de litología, alteración y mineralización para la sección N°12 del modelo establecido por la empresa, entre las cotas 1.800 y 1.150 m s.n.m. Litológicamente, se comprueba que Cerro Búfalo se emplaza en secuencias volcánicas a volcanosedimentarias de composición daciandesítica, posiblemente asociadas a un ambiente de paleo-caldera, las cuales son intruídas siguiendo un control estructural vertical por brechas freáticas, hidrotermales y pórfidos dacíticos.

En cuanto a la alteración, los *ledges* se disponen también subverticalmente, concentrándose preferencialmente en sus núcleos la mineralización sulfurada junto a cuarzo y alunita. Hacia los bordes, el volumen de sulfuros baja, pasando a zonas de cuarzo-caolinita y caolinita.

La mineralización sulfurada en Búfalo, según evidencian las texturas al microscopio, evoluciona temporalmente desde un ambiente de sulfuración intermedia (IS) en profundidad, con tenantita-calcopirita-bornita, hacia uno de alta sulfuración con enargita-calcosina hacia zonas más someras, aunque ambos pueden estar espacialmente solapados. La fase de alta sulfuración (HS) representa la más importante considerando su distribución y volumen de sulfuros asociado. Una etapa más tardía, en la cual el estado de sulfuración desciende nuevamente, denominada “fase retrogradante” se desarrolla de forma puntual en zonas someras, generándose tenantita, esfalerita, calcopirita y bornita que reemplazan a la etapa HS.

La zona profunda de sulfuración intermedia podría representar la transición hacia un ambiente de tipo pórfido cuprífero, lo que se suma a la evidencia de acotadas zonas con alteraciones propias de este sistema (fílica, potásica) reconocidas en la sección bajo la cota de 1.450 m s.n.m.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El proyecto Cerro Búfalo (Denominado también solo “Búfalo”) corresponde a un sistema mineralizado Au-Cu de alta sulfuración (HS), emplazado a unos 110 km. de la ciudad de Antofagasta, en la comuna de Sierra Gorda. Pertenece a la franja metalogénica del Paleoceno-Eoceno temprano, junto con otros depósitos epitermales cercanos como Guanaco y San Cristóbal, así como de pórfidos cupríferos importantes como Centinela y Lomas Bayas (COCHILCO, 2016). Desde fines de 2010, la propiedad minera del yacimiento pertenece a SQM, empresa que comenzó labores de exploración desde el 2018. Hasta la fecha, se han realizado cuatro campañas de sondajes diamantinos, las cuales reúnen más de 100 perforaciones que alcanzan profundidades de hasta 1.200 metros.

Se ha logrado determinar que la mena de cobre principal del depósito es la enargita, acompañada casi siempre de pirita, siendo esta paragénesis muy característica de fluidos mineralizantes que suceden a la lixiviación intensa inicial de los epitermales de alta sulfuración (Hedenquist et al., 2000). Ambas fases sulfuradas se concentran sobre todo en núcleos de alteración argílica avanzada (cuarzo-alunita), los cuales se emplazan en cuerpos silicatados generados siguiendo un fuerte control estructural, denominados *ledge*.

Si bien tienen una menor abundancia, se han detectado otras fases sulfuradas de importancia económica, como lo son la calcosina (primaria y secundaria), covelina, bornita, digenita, tenantita y calcopirita.

Hasta la fecha, la empresa ha realizado un trabajo de localización de los tramos que contienen estas fases, pero no se ha desarrollado un modelo conceptual que explique la relación entre estas.

El presente trabajo se enmarca en la necesidad de establecer un modelo que explique la distribución lateral y en profundidad de los minerales de mena anteriormente mencionados, considerando también las zonas de alteración a las cuales se asocian, así como sus ocurrencias. De este modo, se pretende interpretar las implicancias genéticas de las diversas asociaciones minerales reconocidas durante el mapeo de sondajes.

1.2 Hipótesis

Siguiendo el modelo clásico de distribución de fases sulfuradas de cobre en ambientes epitermales de alta sulfuración propuesto por Sillitoe (1999), se establece que estas asociaciones minerales poseen condiciones de formación dadas por las características del fluido que las precipita. Esto define no solo la ocurrencia de estas, sino también su distribución espacial dentro del depósito.

En el presente trabajo, se propone caracterizar el comportamiento de los sulfuros en Cerro Búfalo, comparándolo con yacimientos de características similares, esperándose una distribución marcada por fuertes variaciones verticales dada la disposición de las zonas de alteración y el control estructural previamente identificado por la empresa patrocinante.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Establecer un modelo conceptual de la formación del sistema mineralizado de Cerro Búfalo, con especial énfasis en la distribución de las fases minerales sulfuradas presentes.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar y caracterizar petrográficamente las especies sulfuradas de cobre y mineralogía de alteración en Cerro Búfalo.
- Reconocer las zonas de alteración presentes en el depósito, la distribución espacial de estas y su relación con la mineralogía de interés económico.
- Identificar y clasificar el tipo de vetas, vetillas y brechas hidrotermales presentes en el sistema mineralizado.
- Establecer la paragénesis de la mineralización sulfurada y mineralogía de alteración en Cerro Búfalo.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 Contexto morfoestructural

La segunda región de Chile, y específicamente el área comprendida entre las latitudes 23° y 24°S, suele ser dividida en cinco unidades morfoestructurales de oeste a este, siendo estas Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia, Precordillera (que en esta zona recibe el nombre de Cordillera de Domeyko), Cordillera Occidental y Puna (Amilibia et al., 2008). El prospecto minero Cerro Búfalo y sus alrededores se ubican en la zona transicional entre la depresión intermedia y la Cordillera de Domeyko, caracterizándose por elevaciones que puntualmente pueden alcanzar hasta 2.100 m.s.n.m., las cuales no se disponen en un cordón montañoso continuo, sino más bien se observan separadas por zonas topográficamente más bajas las cuales se han rellenado por depósitos cuaternarios (Marinovic, 2007).

2.2 Contexto metalogénico

Cerro Búfalo pertenece a la franja metalogénica del Paleoceno – Eoceno temprano, la cual se extiende ininterrumpidamente desde el extremo norte del país hasta la latitud 29°30´S. En la Región de Antofagasta, varios prospectos mineros importantes se formaron en este rango temporal. Yacimientos de tipo pórfido Cu-(Mo) como Distrito Centinela, Spence y Sierra Gorda son algunos de los más relevantes, ubicándose estos a una distancia de entre 70 y 90 km al norte de Cerro Búfalo. El pórfido Lomas Bayas, por su parte, está a una distancia de tan solo 30 km al noroeste. Existen también depósitos epitermales relevantes cercanos pertenecientes a la franja, como lo son El Peñón (Epitermal de baja sulfuración), y Guanaco (Epitermal de alta sulfuración), 90 y 150 km al sur, respectivamente.

Anteriormente, se postuló la posibilidad de que el sistema epitermal se encontrara más bien ligado a la franja del Eoceno tardío – Oligoceno temprano (Sillitoe, 2019; Documento Interno SQM), a la cual pertenecen varios de los pórfidos cupríferos más importantes del país, siendo el más cercano Gaby, ubicado 60 kilómetros al noreste. Sin embargo, dataciones posteriores (Castillo et al., 2020; Pon & Zapatta, 2022), determinan una edad aproximada para los intrusivos presentes en el depósito cercana a 48 Ma., más cercana al Eoceno temprano a medio.

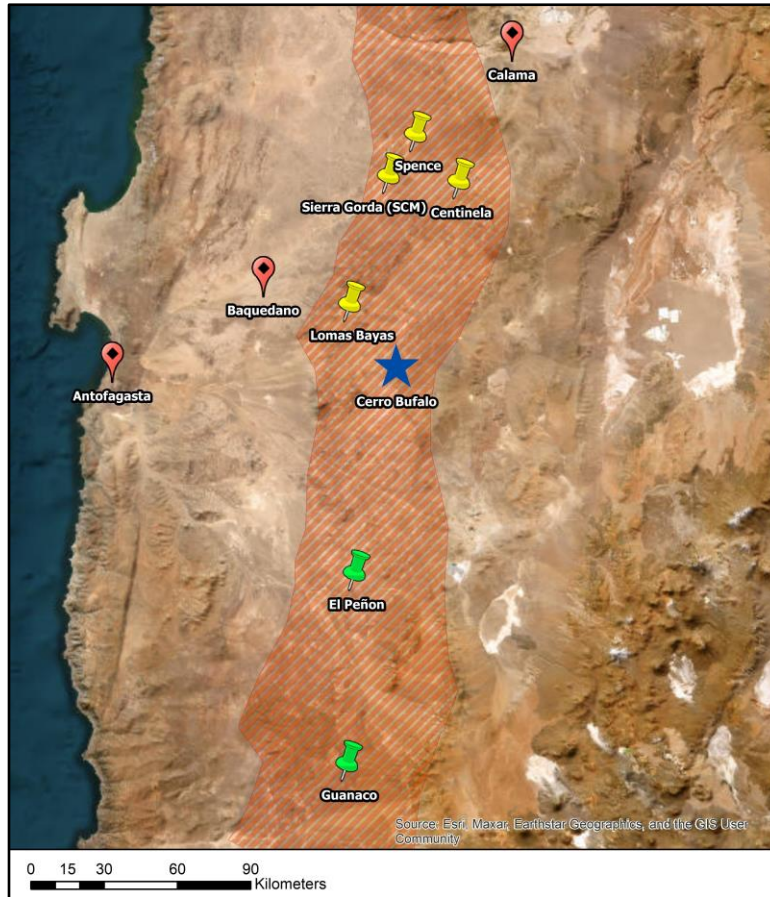


Figura 2.1. El polígono anaranjado corresponde a la franja metalogénica del Paleoceno-Eoceno en la Región de Antofagasta. Los símbolos amarillos marcan la posición de los principales depósitos tipo pórfido cuprífero y los verdes, depósitos epitermales.

2.3 Geología regional

2.3.1 Litologías

2.3.1.1 Grupo Caracoles (Jgc, Bajociano-¿Neocomiano?)

Definido en Cerro Caracoles (Harrington, 1961), al SE de Sierra Gorda, y redefinido posteriormente como un grupo de cinco formaciones marinas (Montaño, 1976). La Carta Oficina Domeyko (2007), dada la escala del trabajo realizado, describe todas estas formaciones de forma conjunta, alcanzando una potencia de 700 metros.

Consiste en un nivel basal conglomerádico, sobre el cual se intercalan areniscas calcáreas a cuarcíferas, margas y calizas oolíticas a coquinoideas, con algunos niveles de yeso macizo.

El contenido fósil del grupo es abundante, destacando braquiópodos, bivalvos, ammonites y gasterópodos, lo que ha ayudado a determinar los límites temporales del grupo en el trabajo de diversos autores (Pérez y Reyes, 1998; Rubilar, 2000).

2.3.1.2 Formación Quebrada Mala (Ksqm, Cretácico Superior)

Definida por Montaña en 1976, en la quebrada homónima al sureste de Sierra Gorda, corresponde a una secuencia volcanosedimentaria que aflora en varios sectores al sur de la Carta Oficina Domeyko (Marinovic, 2007), alcanzando hasta 3.700 metros de potencia.

La formación contiene volcarenitas cuarcíferas a feldespáticas, las cuales alternan con lavas andesíticas afaníticas a porfídicas con fenocristales de piroxeno y anfíboles.

Las dataciones más recientes publicadas respecto a su edad son las registradas en la Hoja Pampa Unión (Marinovic y García, 1999), las cuales comprenden un rango que va de los 86 a los 66 Ma por método K-Ar.

2.3.1.3 Batolito Sierra del Buitre e intrusivos asociados (Kssb, ca. 86 Ma.)

Cuerpos plutónicos que varían en tamaño de stocks a batolitos, siendo los más relevantes en tamaño los aflorantes en la localidad tipo Sierra del Buitre, unos 25 km. al noroeste de Cerro Búfalo, intruyendo estratos de la Formación Quebrada Mala.

Marinovic (2007), separa composicionalmente cuatro facies: I) Monzodioritas cuarcíferas a granodioritas de anfíbol y biotita, II) Monzodioritas cuarcíferas a monzonitas cuarcíferas de piroxeno. III) Granodioritas de biotita y anfíbol y IV) Dioritas de anfíbol, piroxeno y biotita.

Las rocas intrusivas agrupadas en esta unidad han sido datadas por Marinovic y colaboradores (1996) mediante K-Ar en biotitas, obteniéndose edades de 66 ± 2 y 69 ± 2 Ma.

2.3.1.4 Formación Cinchado (PaEc, Paleoceno Superior-Eoceno Inferior)

Definida por Montaña (1976) en la Hoja Pampa Unión, corresponde a una secuencia volcanosedimentaria, depositada en discordancia angular sobre rocas de la Formación Quebrada Mala y que subyace a los Depósitos de Gravas del Mioceno. En el área, sus afloramientos se concentran en el dominio estructural de la Falla Sierra de Varas.

Posee dos niveles principales: El inferior consiste en 20 m de conglomerados volcánicos semiconsolidados, mientras el superior tiene una potencia de más de 500 metros y consiste en lavas andesíticas a dacíticas porfídicas (rara vez amigdaloides) de masa fundamental pilotaxítica, con fenocristales de plagioclasa, piroxeno, hornblenda y/o biotita, las que se intercalan con niveles de tobas soldadas, cristalinas a líticas de lapilli, de composición dacítica, las que se reconocen como parte de ignimbritas asociadas localmente facies de megabrecha (4 km²). Este gran volumen de material volcánico, además del alto espesor total de los niveles tobáceos, generan la idea de una probable caldera de colapso, la cual podría ser parte de un sistema volcánico con múltiples eventos. La Formación Cinchado ha sido datada (K-Ar en biotita) entre los 59 y 50 Ma. con muestras de localizaciones diversas (Boric et al., 1990; Mpodozis et al., 1993a; Marinovic et al., 1996).

2.3.1.5 Pórfidos Riolíticos (Epr, ca. 53 Ma.)

Rocas de textura porfídica gruesa, compuesta por feldespatos, biotita y anfíbol, con notables ojos de cuarzo. Los afloramientos de esta litología a nivel regional son restringidos, localizándose los más importantes en Cerro Pico de Oro y Cerro Amarillo, unos 30 y 40 km. al sur del Distrito Búfalo, respectivamente, donde intruyen rocas volcánicas cretácicas a paleocenas.

Existe una datación K-Ar en biotita para esta unidad (Marinovic et al., 1996), la cual arrojó una edad de $53,6 \pm 1,5$ Ma.

2.3.1.6 Depósitos de Gravas Antiguas (Mg, Mioceno Inferior a Medio)

Gravas de variada composición, clasto a matriz soportadas, con selección pobre (clastos varían entre 1 y 50 cm). Poseen mala estratificación, grado de consolidación variable, e intercalaciones menores de arenas, limos y capas de ceniza.

Se han realizado múltiples dataciones que indican edades entre 15 y 23 Ma utilizando el método K-Ar en biotita (Marinovic et al., 1995; Gardeweg et al., 1994), lo que las hace correlacionables temporalmente con las Gravas de Atacama (Mortimer, 1973).

2.3.1.7 Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (Mplia, Mioceno Superior-Plioceno).

Capas regularmente estratificadas y mal seleccionadas de gravas, arenas y limos con intercalaciones de ceniza volcánica, las cuales se formaron por eventos fluviales intensos y flujos de barro. Es común reconocer estas facies yaciendo sobre las gravas del Mioceno. Se han podido datar por el método K-Ar en biotita algunas capas de ceniza intercaladas entre depósitos aluviales, obteniéndose edades de $4,4 \pm 0,5$ y $5,9 \pm 0,7$ Ma (Marinovic et al., 1996).

2.3.1.8 Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos (PIHa, Pleistoceno-Holoceno)

Sedimentos mono a policomposicionales, no consolidados, consistentes en gravas, arenas, limos y arcillas. Se han formado debido a corrientes de barro y flujos de detritos comúnmente asociados a eventos fluviales intensos. Debido a que se encuentran asociados a sistemas de drenaje actuales, se reconoce que la depositación de estos es un proceso aún activo (Marinovic, 2007).

2.3.2 Geología estructural

2.3.2.1 Contexto y evolución tectónica

La historia y evolución tectónica del Sector Oficina Domeyko está marcada por el Sistema de Fallas de Domeyko, principalmente representado en el área por las Fallas Sierra de Varas y Pico de Oro. Antes del evento compresivo del Cretácico-Terciario, se reconoce la acción del Sistema de Fallas Sierra del Cobre, el cual se extiende de manera regional entre Calama, por el norte, y el salar de Maricunga, por el sur. La acción de las Fallas Sierra de Varas y Pico de Oro generan, con leve posterioridad, la inversión del borde oriental de la cuenca del Cretácico Superior, sobreimponiéndose al sistema anterior. Ambos eventos son de naturaleza transpresiva, con estructuras de carácter tanto transcurrente como inverso, y a su vez, producen la inversión de las fallas de rifting del Triásico-Jurásico inferior.

Hay evidencias de cambios más recientes en el régimen tectónico. Al norte del área acotada por la Carta, en Distrito Centinela, hay evidencias de desplazamientos normales tardíos en el bloque oriental caído (Marinovic, 2007). Además, se ha propuesto una transición desde un régimen compresivo a uno extensional hace unos 60 Ma., depositándose la Formación Cinchado, asociada a un sistema de calderas, en este contexto.

2.3.2.2 Dominios estructurales

El área circundante a Cerro Búfalo se ha separado en distintas zonas marcadas por las diferencias en su evolución tectónica y características de las estructuras.

Dominio Estructural Occidental: Se encuentra en este la Falla Sierra del Cobre, estructura principal del sistema homónimo, descrita como vertical y de rumbo NS, con un sentido de desplazamiento dextral. Las estructuras del dominio afectan rocas paleozoicas, jurásicas y cretácicas, en las cuales se forman pliegues suavemente buzantes, evidenciándose un evento de deformación dúctil. Se reconocen algunas estructuras NE-SW de carácter inverso dentro del dominio, las cuales pueden haberse formado como respuesta al estrés principal compresivo (Marinovic, 2007).

Dominio Estructural Central: Limitado por la Falla Sierra del Cobre, por el oeste, y la Falla Sierra de Varas, por el este, corresponde al dominio en el cual se encuentra emplazado el Proyecto Cerro Búfalo. Se caracteriza principalmente por la superposición de la acción de ambas estructuras. El evento de deformación asociado a la Falla Sierra del Cobre se postula anterior a los 84-86 Ma. (Marinovic y García, 1996; Mpodozis et al., 2005), mientras que la Falla Sierra de Varas, de rumbo aproximado N10°E y fuerte cinemática transcurrente sinistral (Niemeyer et al., 2000), tendría una edad máxima de acción de 51 Ma. (Mpodozis et al., 1993a). Esta delimita la cuenca deposicional de la Formación Cinchado, y define una zona asociada a varias fallas inversas menores (NS a N30°E, manteo de 45°E), siendo la más destacada la Falla Cerro Pico de Oro (Marinovic et al., 1996).

Dominio Estructural Oriental: Se desarrolla al este de la traza de la Falla Sierra de Varas, en el borde occidental de la Cordillera de Domeyko, y afecta principalmente a rocas paleozoicas y mesozoicas. La estructura más relevante es la Falla Pampa Elvira (Mpodozis et al., 1993a), la cual posee un rumbo N10-30°O, con manteo subvertical y cinemática transcurrente siniestral. Otras estructuras relevantes son la Falla Escondida y el Lineamiento Laguna Seca, de rumbo aproximado NS, las cuales, considerando su actitud y temporalidad, se reconocen como secundarias a la acción de la Falla Sierra de Varas (Mpodozis et al., 1993a, b)

2.4 Geología local

Cerro Búfalo se ubica a unos 2.000 m s.n.m., y geomorfológicamente se describe como un cerro isla, probablemente emplazado por procesos estructurales, altamente alterado de forma supérgena. Las rocas que albergan el depósito corresponden a secuencias volcánicas a volcanosedimentarias del nivel superior de la Formación Cinchado (Marinovic, 2007), las cuales son posteriormente cortadas por pórfidos dacíticos y brechas hidrotermales, además de cuerpos silicatados de tipo *ledge* con alteración cuarzo-alunítica, en los cuales se desarrolla la mineralización sulfurada.

A continuación, se detallan las litologías y rasgos estructurales presentes en el depósito a partir de trabajos realizados por la empresa SQM (Sillitoe, 2019; Castillo et al., 2020; Pon & Zapatta., 2021).

2.4.1 Litologías

2.4.1.1 Nivel andesítico (AND)

Corresponde a la unidad dominante en los niveles profundos del depósito, reconocida en todos los sondeos bajo los 1.700 m s.n.m., superando los 700 metros de espesor. Reúne andesitas porfídicas (más abundantes), afaníticas, amigdaloidales, ocoíticas y niveles tobáceos de composición andesítica.

En las zonas cortadas por brechas y de debilidad estructural se observan rellenos de sílice que puede acompañarse de pirita, anhidrita, clorita, calcita y calcopirita.

2.4.1.2 Secuencias volcanosedimentarias a volcanoclásticas (VOLCSED)

Areniscas tobáceas, brechas volcanoclásticas, y en menor medida, conglomerados volcánicos, cuya ocurrencia común es en cuerpos lenticulares que se encuentran entre capas andesíticas. La potencia de estos niveles puede ser centimétrica hasta de casi 100 metros. Estas intercalaciones son comunes en sistemas de calderas, junto a la presencia de brechas peperíticas, en las que se mezclan material volcánico y sedimentos de cuencas lacustres.

2.4.1.3 Secuencias de tobas dacíticas y de líticos. (TDAC)

Sobreyaciendo a las unidades descritas anteriormente, se reconoce un nivel volcanosedimentario, presente desde la superficie hasta unos 200 metros de profundidad en los sondeos. Consiste en tobas cristalinas de composición dacítica, con fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbol y ojos de cuarzo. Suelen reconocerse líticos de composición microdiorítica. Otras características reconocibles en estudio microscópico son cristales quebrados y fragmentos de pómez aplastados. Corresponde a la principal litología afectada por la alteración argílica supérgena y en la cual se aloja la zona de óxidos y de enriquecimiento secundario.

2.4.1.4 Pórfidos dacíticos, riolíticos y *crowded*. (PDAC)

Diversos hipoabisales subvolcánicos que se ven cortados por las inyecciones de brechas hidrotermales, vetas y vetillas que contienen mineralización de pirita-enargita.

Se propone, por la profundidad a la que son interceptados (entre los 600 y 1.500 metros de sondeo), además de la presencia de alteraciones sericita-clorita-cuarzo y cuarzo-sericita-anhidrita (-), que estos intrusivos serían parte del sistema tipo pórfido cuprífero que daría origen posteriormente al desarrollo del yacimiento epitermal de alta sulfuración.

Se han diferenciado en tres grupos dada su composición y texturas: 1) Pórfidos dacíticos, con ojos de cuarzo de hasta 3 mm. y fenocristales de plagioclasa-anfibol, 2) Pórfidos dacíticos “*crowded*”, composicionalmente muy similares a los anteriores, aunque con textura de alto contraste granulométrico entre fenocristales, y 3) Pórfidos riolíticos con abundantes fenocristales de cuarzo y de plagioclasa (10%).

Se han realizado tres dataciones radiométricas con el método U-Pb en circones para estos pórfidos, obteniéndose edades de entre 49,6±0,7 Ma. y 48,6±0,7 Ma. Si bien no se reconocen cuerpos intrusivos dentro de este rango de edad en la carta regional, los pórfidos de Búfalo se ubican cercanos temporalmente a dataciones recientes de cuerpos mineralizados circundantes, como es el caso de Telégrafo en Distrito Centinela (44.3±1.4 según K-Ar en biotita secundaria; Münchmeyer & Valenzuela, 2009).

2.4.1.5 Brechas hidrotermales (BXH)

Se agrupan en esta unidad brechas polimícticas con fragmentos volcánicos a volcanoclásticos, inmersos en una matriz hidrotermal formada por agregados de sílice-alunita-dickita (-), en la cual suele encontrarse mineralización de enargita-pirita, que puede estar acompañada de otros sulfuros en menor medida.

Poseen una disposición subvertical regulada por un sistema de tipo ledge, reutilizando zonas estrechas de alteración causada por fluidos ácidos.

Durante la última campaña de sondajes se realizó una datación Ar-Ar en alunita, obteniéndose una edad de 48 Ma., ubicándose muy cercana temporalmente al evento de intrusión de los pórfidos dacíticos.

2.4.1.6 Brechas freáticas (BXH)

Se han interceptado a profundidades cercanas a los 1.000 m.s.n.m., brechas parcialmente polimícticas, con clastos subangulosos, de composición volcánica, volcanoclástica, y en ocasiones, de brechas hidrotermales mineralizadas. Dado esto último, sumado a la escasa mineralización que albergan, se infieren como pertenecientes a un evento post-mineral.

2.4.1.7 Pórfidos tardíos. (PDACT)

Siguiendo un fuerte control estructural subvertical, se reconoce la intrusión de pórfidos dacíticos con abundantes ojos de cuarzo, no asociados a mineralización y con alteración incipiente, que cortan a las brechas freáticas e hidrotermales. Según se ha interpretado, estos cuerpos pueden emplazarse tanto reutilizando las estructuras que controlan la mineralización o fallas posteriores (Pon & Zapatta, 2022).

2.4.2 Estructuras

2.4.2.1 Modelo estructural preliminar

Complementando estudios de magnetometría y *Televiwer* con el mapeo en terreno, se elabora un modelo preliminar (Castillo et al., 2020) que refleja una dirección preferencial de las estructuras predominante N40°W a N60°W, con un manteo que tiende a 80°SW, a las que se acoplan una población menor de fallas NE-SW, interpretadas como conjugadas o de transferencia, las cuales incluso pueden haberse formado en una etapa post-mineral.

Bajo estas consideraciones y teniendo en cuenta la tendencia regional que marca el dominio de la Falla Sierra de Varas, se interpreta que en Cerro Búfalo actuó un régimen de cizalle, con desarrollo de estructuras de tensión (T) generadas en el mismo sentido que las fallas normales y paralelas al esfuerzo σ_1 . Estas aperturas tensionales generan el contexto propicio para el emplazamiento de vetas y brechas siguiendo un modelo de tipo ledge, como se detallará en el apartado 2.3.1.2.

Existen evidencias de emplazamiento de sistemas minerales tardíos (epitermales) en ambientes de tipo pórfido siguiendo el esfuerzo σ_1 , descritos incluso en yacimientos cercanos como lo son Spence y Centinela (Piquer et al., 2021).

2.4.2.2 Ledges

El modelo de mineralización de Cerro Búfalo se desarrolla de forma vetiforme, mediante varios cuerpos paralelos subverticales de hasta 90 metros de espesor, continuos en profundidad, que cortan a todas las unidades estratificadas, los cuales se han definido como “*ledges*”. Estos cuerpos se forman debido a la utilización por parte de fluidos hidrotermales ácidos de las estructuras tensionales descritas en el apartado 2.3.2.1, generándose cuerpos silicatados de cuarzo oqueroso dentro de los que se desarrolla alteración argílica avanzada, la cual se zonifica lateralmente desde el núcleo de estos, pasando desde una zona de cuarzo-alunita a un halo dominado por caolinita.

Algunos modelos epitermales de tipo *ledge* importantes son Guanaco, también ubicado en la Región de Antofagasta, donde se ha demostrado una relación directa entre el grado de desarrollo de estas estructuras con las leyes minerales del depósito (Jovic et al., 2021), así como Colquijirca, en Perú, donde se describe una distribución simétrica descendente de los minerales de mena desde el núcleo del *ledge* (Bendezú & Fontboté, 2009).

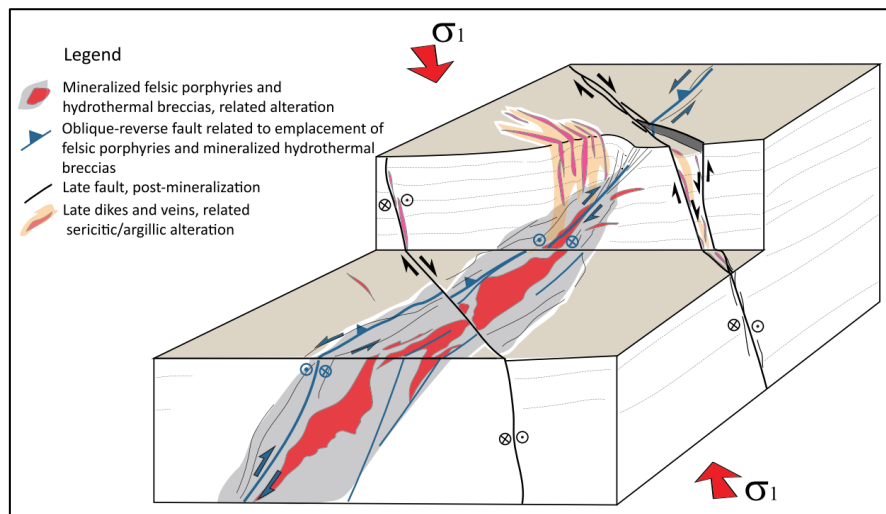


Figura 2.4.2.1. Modelo estructural de Piquer y colaboradores (2021). Se propone, para un contexto transpresivo, el emplazamiento de diques y vetillas mineralizadas tardías mediante estructuras tensionales generadas de forma paralela al esfuerzo σ_1 .

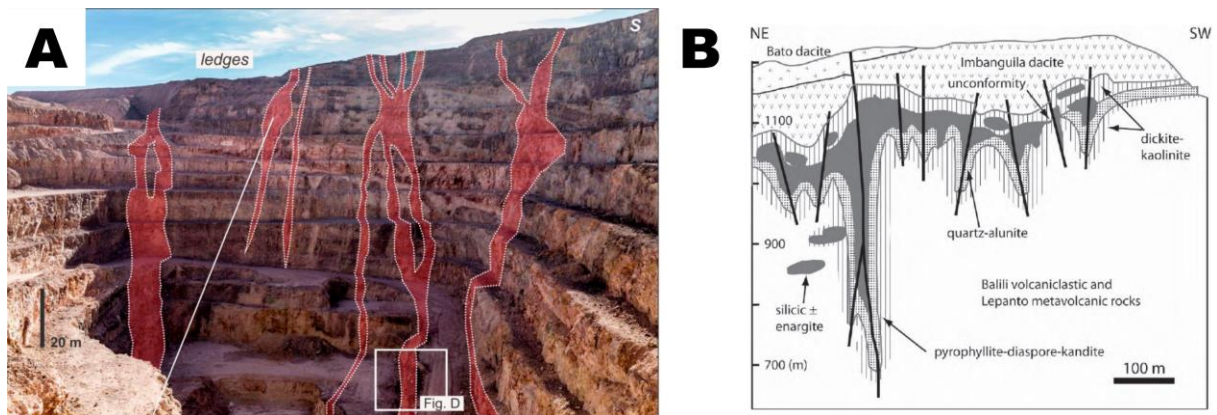


Figura 2.4.2.2. A) Representación esquemática del emplazamiento de los cuerpos ledge en Mina Guanaco (Jovic et al., 2021), presentando una morfología vetiforme que alcanza hasta 20 metros, de forma similar a Búfalo. B) Modelo de alteración del depósito Mankayan, Filipinas (Chang et al., 2011), en el cual los cuerpos cuarzo-aluníticos con enargita se emplazan siguiendo un fuerte control estructural, generándose zonación lateral de la alteración.

2.5 Modelo del yacimiento

Búfalo corresponde a un depósito epitermal de alta sulfuración con varias particularidades que lo distinguen, como lo son su fuerte control estructural, zonación lateral de la alteración y una distribución compleja de las leyes minerales. A continuación, se detalla la caracterización del depósito realizada a partir de las campañas de sondaje desde 2018 hasta la actualidad por parte de la gerencia de exploraciones metálicas de SQM.

2.5.1 Suites de alteración

2.5.1.1 Alteración argílica supérgena (ASUP)

Desde la superficie hasta una profundidad de 100 metros de sondaje (1.900 m s.n.m.) se reconoce sobre rocas volcanoclásticas una alteración pervasiva de arcillas que se han distinguido mediante estudios de difracción como illita y montmorillonita, acompañadas de óxidos de Mn y Cu negros e hidróxidos de hierro. Esta alteración es el resultado de una lixiviación ácida en un ambiente dominado por sulfuros de hierro (Castillo et al., 2020).

2.5.1.2 Alteración argílica avanzada (QZ-ALUN, QZ-KAO, KAO)

Observable desde la superficie, donde es superpuesta por la alteración supérgena, hasta profundidades cercanas a los 1100 m.s.n.m. Tiene su origen en el núcleo de los *ledge*, estructuras silíceas con textura residual (causada por flujos iniciales de pH muy bajo) sobre la se desarrolla un entrecrecimiento microcristalino de sílice-alunita, junto al cual se presentan las principales concentraciones de sulfuros. Particularmente, estudios químicos han confirmado una convergencia entre las condiciones de precipitación óptimas de la alunita y la enargita, que es la principal mena de cobre del depósito (Knight, 1977).

Debido al descenso del pH y temperatura luego de la formación de esta paragénesis (Hedenquist et al., 2000; Duan et al., 2022), se reconoce rodeando al *ledge* un halo de cuarzo-caolinita, seguido de una zona de solo caolinita. La dickita y la pirofilita son otras fases presentes, principalmente más cerca del núcleo del *ledge*, aunque su distribución es muy irregular. En general, la mineralización sulfurada es más escasa hacia estas zonas periféricas, aunque ocasionalmente pueden encontrarse leyes importantes de forma local asociadas a brechas hidrotermales o vetillas.

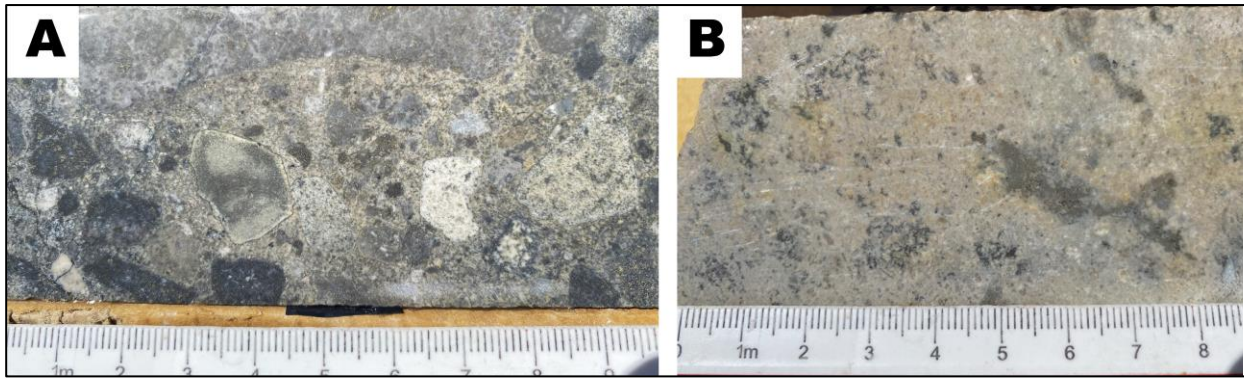


Figura 2.5.1.2. A) Brecha freática asociada a alteración cuarzo-alunitica (agregado masivo rosaceo en la matriz). B) Andesita alterada pervasivamente a cuarzo-caolinita con cúmulos locales verdosos de dickita. (Muestrario de Alteración SQM).

2.5.1.3 Alteración propilitica (PROP)

Alteración con dominante clorita y menor calcita en vetillas, celadonita en cúmulos, arcillas verdes (que se han reconocido como illita-montmorillonita) y menor epidota. Las rocas afectadas por esta paragénesis son cortadas a todas profundidades por los sondajes, pero como es común, dominan en la periferia del depósito o rodeando a la zona caolinitica.

2.5.1.4 Alteraciones transicionales (SGV, SCC, SER, POT).

Sondajes profundos realizados por la empresa han cortado varios tramos con alteraciones que podrían indicar la transición hacia un ambiente de tipo pórfido.

Sericita gris verde se reconoce desde los 700 metros de profundidad, la cual se ha descrito también en Radomiro Tomic (Bulnes, 2013). Por otro lado, alteración SCC (sericita-clorita-caolinita), aparece a más de 1000 metros de profundidad y es cortada por los ledges, además de asociarse a vetillas de anhidrita-calcopirita (-).

En particular, el sondaje DDHBUF-17 corta entre los 1.520 y 1.320 m s.n.m. una zona que se ha interpretado como remanente de un ambiente profundo, a la cual no se ha superpuesto la alteración argílica avanzada (Pon & Zapatta, 2022, Informe interno SQM), que consiste en un ápice de cuarzo-pirofilita, seguido por alteración cuarzo-sericítica que afecta un pórfido no mineralizado, y muy localmente cúmulos potásicos, definidos por la presencia de biotita secundaria, asociados a una brecha ígnea con mineralización de pirita-magnetita-calcopirita (Cornejo, 2021, Informe interno SQM). Otras zonas de alteración cuarzo-sericítica con menor anhidrita y ocasional mineralización de calcopirita-bornita se reconoce en otros sondajes profundos por debajo de los 1.100 m.s.n.m.

2.5.2 Mineralización

2.5.2.1 Mineralización hipógena

La mineralización sulfurada comienza a predominar en los sondajes bajo la cota 1850 m.s.n.m., y consiste predominantemente en pirita, la cual es casi omnipresente, con un contenido que alcanza hasta un 30% en volumen en la zona central de los ledges y se reduce a solo trazas en la zona propilítica. En general, siempre que el contenido de la pirita supera el 10% en volumen, esta se ve acompañada de enargita, siendo esta una paragénesis común a profundidades intermedias en los depósitos de alta sulfuración (Sillitoe, 1999). La ocurrencia de estos sulfuros puede darse tanto en forma masiva o diseminada como en vetas, vetillas y en la matriz, clastos y cementando brechas hidrotermales.

La presencia de la enargita suele verse relacionada estrechamente a zonas con abundante alunita, y en ciertos casos pirofilita-dickita (Sillitoe, 2019; Informe Interno SQM). Esta asociación está bien documentada, relacionándose a factores de oxidación y temperatura del fluido mineralizador (Knight, 1977), ocurriendo en este caso en el núcleo de la alteración argílica avanzada zonada lateralmente.

Tenantita acompaña a las dos fases previamente descritas, principalmente entre los 1.450 y 1.200 m s.n.m., aunque en zonas muy restringidas, con un volumen relativamente bajo en comparación a la enargita. La presencia de esta indicaría un descenso en el estado de sulfuración del fluido rico en As, lo que ocurre en depósitos como Summitville (Stroffegen, 1987; Bethke et al., 2005).

Es posible reconocer calcosina, digenita y menor covelina hipógenas, fases de sulfuración alta a muy alta (Hedenquist et al., 2000), a profundidades bajo los 1.700 m.s.n.m., asociadas a vetas de pirita en la zona cuarzo-alunítica.

Bajo los 1.200 m s.n.m. comienzan a aparecer con más abundancia calcopirita y bornita, sobre todo acompañando vetas de sílice-dickita, aunque con un volumen muy bajo.

En los halos de alteración más externos, pueden encontrarse blenda y galena en pequeñas cantidades, detectándose puntualmente leyes elevadas de Pb y Zn (Castillo et al., 2020).

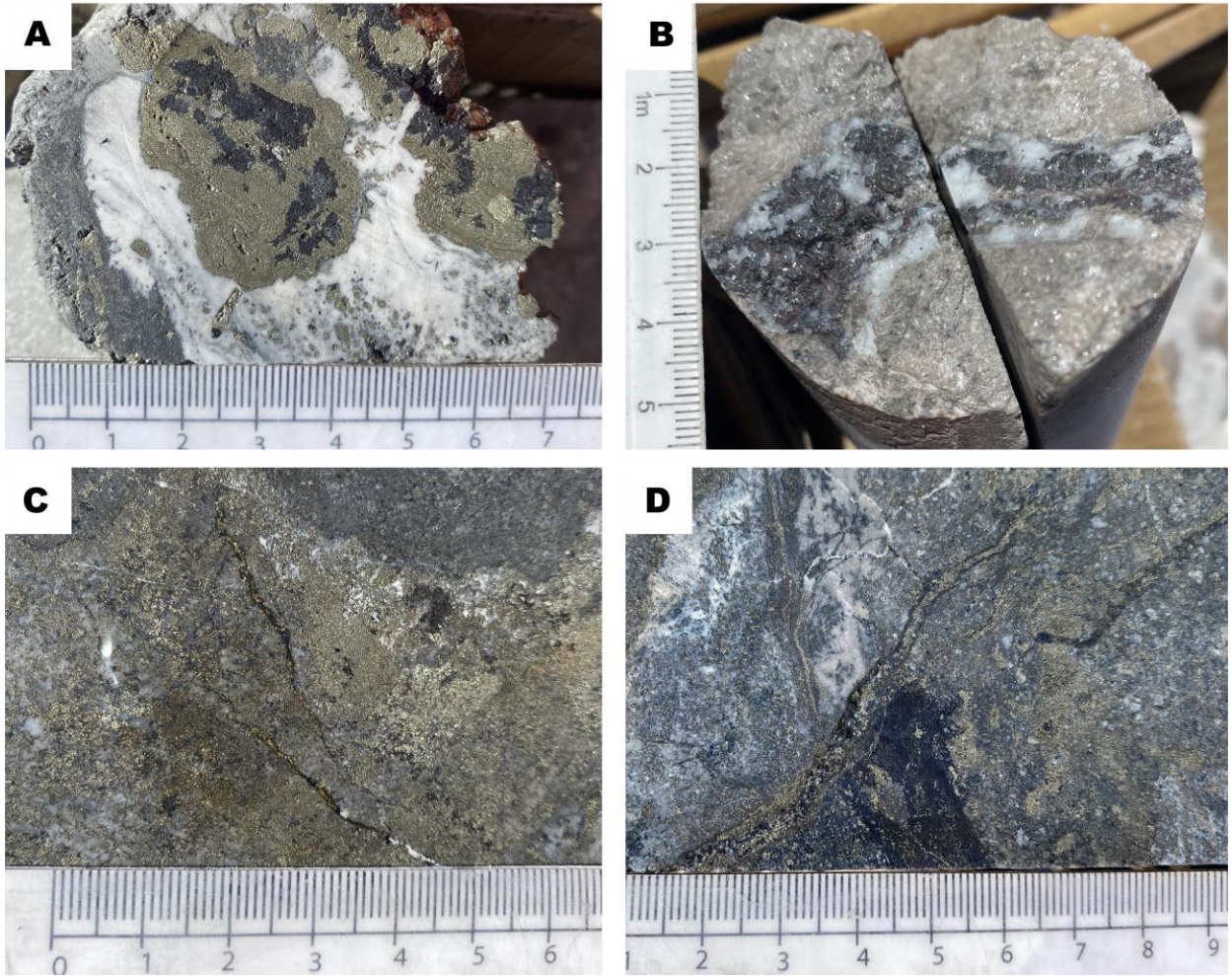


Figura 2.5.2.1. A) Cúmulos de pirita-enargita asociados a pirofilita y sílice. B) Veta de tenantita>enargita y cuarzo. C) Vetillas finas de calcopirita-digenita. D) Cúmulos y vetillas de enargita-bornita-calcosina.

2.5.2.2 Mineralización supérgena

Desde la superficie hasta los 1.700 m s.n.m., relacionado a los ápices superficiales de los cuerpos *ledge* cuarzo-aluníticos, se desarrollan zonas de un espesor variable entre 10 y 40 metros que contienen brochantita, crisocola, chenevixita, atacamita, antlerita y óxidos negros de cobre, con una ley media de 0,1% Cu.

La aparición de estas menas se correlaciona con una intensa lixiviación ácida de los sulfuros primarios, producto de una alteración supérgena que genera una capa remanente hematítica.

2.5.2.3 Enriquecimiento secundario y zona mixta

Múltiples sondajes interceptan cerca de los 1.800 m s.n.m., zonas en las cuales se desarrolla calcosina secundaria tanto reemplazando pirita como rellenando fracturas y diseminada. Los cuerpos que presentan enriquecimiento secundario no son continuos lateralmente, sino que se asocian a la cercanía de los ledges, y su espesor puede variar entre pocos centímetros hasta 60 metros, con leyes medias de 1%Cu por tonelada.

Escasamente, puede desarrollarse también una zona mixta, con presencia conjunta de calcosina secundaria, óxidos de Cu, relictos de pirita-enargita y cobre nativo.

2.5.3 Leyes minerales.

2.5.2.1 Leyes de cobre

Los estudios realizados indican que un volumen cercano al 1% de enargita en la muestra estudiada, se relaciona a una ley de cobre de entre 0,2 y 0,4%, mientras que al superar un 5% en volumen las leyes alcanzan entre 1,5 y 2%. Tanto los tramos estériles dentro de los ledge, como en general los halos caoliníticos circuncidantes donde la enargita está presente únicamente como traza, poseen leyes en su mayoría inferiores a 0,1%. La aparición anómala de vetillas que contienen bornita, covelina, calcosina o digenita elevan localmente las leyes, superando el 3%, mientras en las zonas de enriquecimiento secundario varios tramos superan el 1%, aunque estos también son restringidos espacialmente.

2.5.2.2 Leyes de oro

Durante el año 2020, un estudio realizado por GEOASMIN mediante la técnica QEMSCAN-PMA identificó la presencia de oro nativo ocluido principalmente en pirita y otros sulfuros, así como en minerales de ganga en menor medida. Se reconoce, de igual manera diseminada en otros minerales, la presencia de calaverita (AuTe₂) y electrum (Au-Ag), aunque en cantidades casi indetectables.

Así, se reconoce que el oro principalmente se encuentra de forma libre. En el núcleo de los ledge, así como en la zona lixiviada y en zonas de enriquecimiento secundario se pueden alcanzar valores altos de entre 0,8 y 3 g/t. Por otro lado, en ocasiones se detectan valores entre 0,2 y 0,6 g/t cuando el volumen total de sulfuros del tramo ronda el 15%, pero esto no es una generalidad, ni tampoco se cumple a profundidades determinadas o se asocia directamente con la abundancia de otros elementos afines como el As y el Cu.

3. METODOLOGÍA

3.1 Etapa de gabinete

El trabajo comienza con una etapa investigativa, en la cual se recopila el material bibliográfico referida a distritos mineros presentes en la Región de Antofagasta, así como de otros depósitos epitermales de características similares alrededor del mundo.

Posteriormente, se revisa la documentación asociada a las labores de exploración por parte de la empresa SQM, la cual incluye tantos reportes de avance, descripciones petrográficas de sondajes y data química asociada a estos. En base a la información disponible, se define acotar el estudio a un perfil diagonal (denominada sección N°12, Castillo et al., 2020) perpendicular al lineamiento estructural principal N35°W, dentro de la cual se incluyen 10 sondajes diamantinos inclinados. Este posee una traza de 750 metros y se considera un área de influencia de 150 metros hacia el noroeste y sureste, proyectándose la información hacia el eje central, considerando la correlación espacial entre los sondajes. Adicionalmente, el estudio considera únicamente la sección entre las cotas 1.800 y 1.150 m.s.n.m., al ser esta la zona con más información sobre la mineralización sulfurada.

3.2 Revisión de sondajes y análisis de muestras.

Entre agosto y diciembre de 2023, se realiza la etapa de trabajo presencial en Cerro Búfalo, en turnos de 14 días trabajados por 14 descansados. Se realiza la revisión detallada de 762 metros totales distribuidos entre los 10 sondajes seleccionados, en tramos espaciados seleccionados por su volumen de sulfuros y relación con zonas de alteración argílica avanzada, así como por las leyes minerales entregadas por el análisis de laboratorio. La revisión de los tramos considera un mapeo a detalle de las fases sulfuradas, registrándose la abundancia de cada especie presente, además de su ocurrencia y relaciones texturales entre sí. De la misma manera, se realiza para la totalidad del tramo una descripción litológica y de la mineralogía de alteración presente, todo esto apoyado por la información previa registrada por la empresa a modo de comparación.

Durante esta etapa, se extraen 46 muestras para descripción en muestras de mano, las cuales se detallan en el Anexo N°1. A partir de estas, se confeccionan 19 cortes transparentes pulidos en el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción, los cuales son revisados en microscopio binocular Olympus CX23 (DCT, UdeC). La descripción de las 19 muestras revisadas en el microscopio se presenta en el Anexo N°2 de este trabajo.

3.3 Procesamiento de datos

Una vez obtenidas las descripciones, estas son trabajadas e integradas con la finalidad de obtener modelos restringidos a la sección escogida que representen la distribución de fases sulfuradas.

La información es procesada utilizando software Leapfrog, mediante una base topográfica satelital de 20 pixeles por metro, sumado a la información de ubicación geoespacial de los 10 sondajes considerados. Se marcan dentro del software los tramos revisados, ingresándose en ellos información referida a la litología, alteración y mineralización registrada durante la etapa anterior, además de las leyes de laboratorio entregadas por la empresa, generándose a partir de esto modelos bidimensionales acotados a la sección previamente definida.

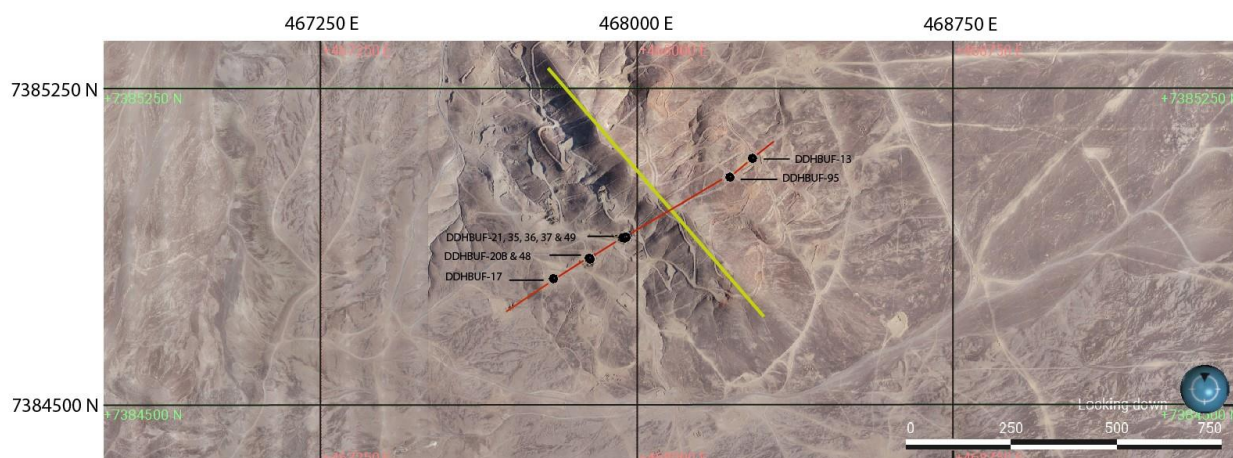


Figura 3.3.1. Vista en planta de la traza de la sección N°12 (en rojo), la cual corta perpendicularmente al lineamiento principal de Cerro Búfalo (en amarillo). Además, se representan en superficie los collares de los sondajes utilizados.

Los productos generados durante esta etapa del proyecto de tesis son:

- Perfiles de distribución de las fases minerales en el depósito, a escala 1:4.000, en la cual se representa la ubicación de las muestras estudiadas y la paragénesis reconocida en ellas
- Modelos de alteración y litología para la sección N°12, a escala 1:2.000, con un tamaño de triangulación para los polígonos de 5 metros. Los cuerpos son dibujados siguiendo la interpolación dada por lo observado en cada una de las muestras.
- Un modelo de mineralización en escala 1:2.000, en el cual se agrupa la información obtenida a partir de los perfiles de distribución, generando polígonos que son posteriormente suavizados y corregidos en Adobe Illustrator.

3.4 Análisis de resultados

La etapa final del proyecto de tesis consiste en la elaboración de diagramas y figuras que ayuden a representar las interpretaciones obtenidas a partir de las etapas anteriores. Se desarrollan así un diagrama de la evolución de la mineralización respecto a la temperatura y el estado de sulfuración (Adaptado de Einaudi et al., 2003), un diagrama sobre la variación en el tiempo de la mineralización respecto a los factores más determinantes (Adaptado de Bartos, 1989), un cuadro paragenético que separa la aparición de sulfuros en etapas, y esquemas comparativos entre Cerro Bufalo y otros depósitos epitermales de características similares.

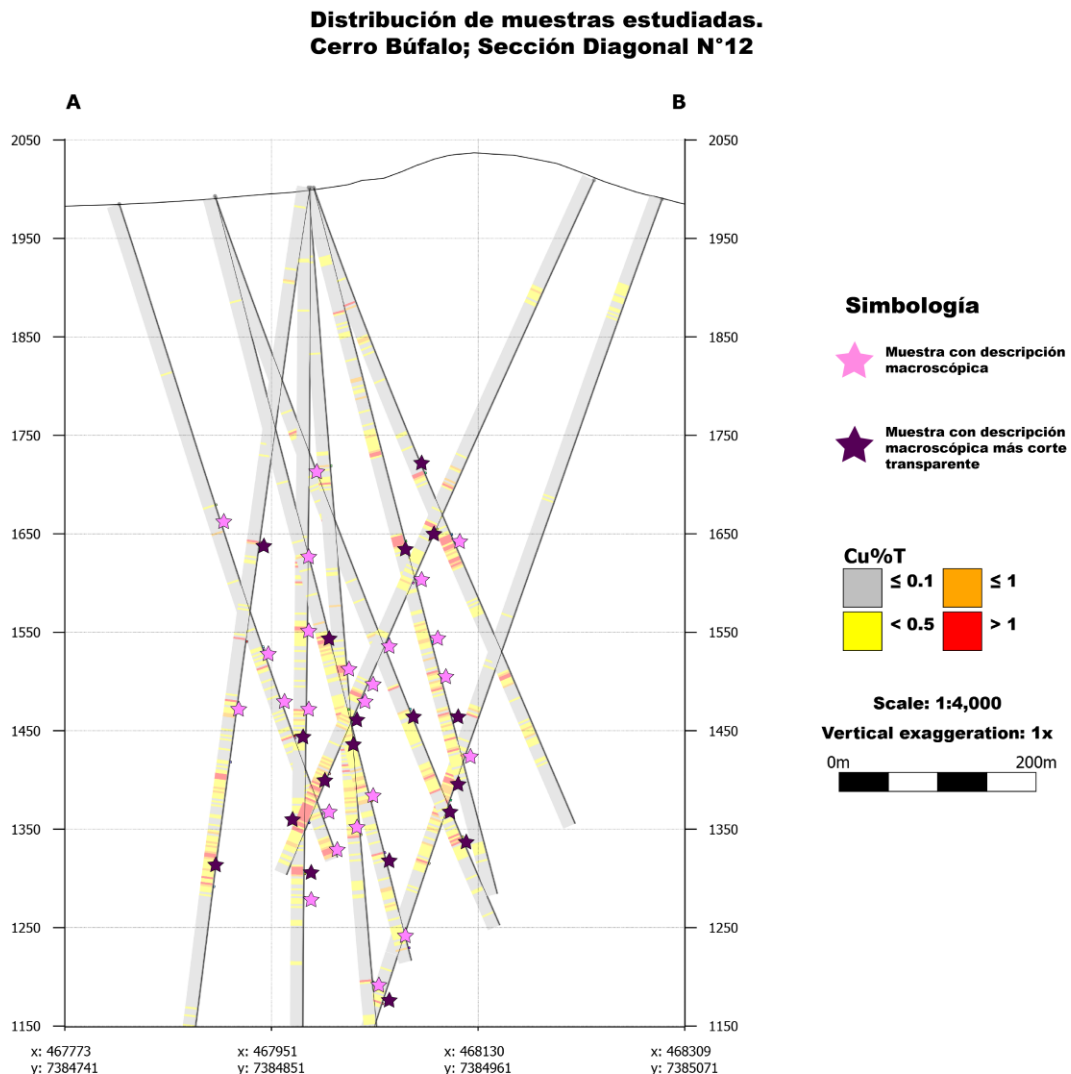


Figura 3.3.2. Distribución de las muestras estudiadas en el presente proyecto.

4. RESULTADOS

La revisión de las muestras extraídas a partir de los sondajes estudiados tanto en petrografía macroscópica como microscópica permitió caracterizar de mejor manera las litologías, zonas de alteración y minerales sulfurados presentes en el depósito. A continuación, se presentan las observaciones más relevantes.

4.1 Litologías

En términos generales, Cerro Búfalo entre los 1.800 y 1150 m.s.n.m. consiste en una secuencia volcánica a volcanosedimentaria dominada por niveles andesíticos, dentro de los cuales abundan andesitas porfídicas con un porcentaje que ronda el 20 a 40% de fenocristales de plagioclasa de tamaño medio 2 mm, y ocasionales fenocristales de anfíbol aciculares (hasta 10%). Se reconocen en menor medida andesitas de tipo amigdaloidal, ocoíticas (fenocristales de tamaño cercano a 1 mm) y andesitas rojizas con abundante contenido de máficos. Muy localmente es posible observar brechas volcánicas (Anexo I, M19) monomícticas con líticos andesíticos.

Los niveles volcanosedimentarios en general se presentan con espesores métricos a decimétricos, a modo de intercalaciones entre las lavas, y consisten principalmente en volcarenitas feldespáticas a levemente cuarcíferas, con contenido variable de líticos andesíticos y tamaño de grano fino. Otras litologías presentes son brechas volcanosedimentarias polimícticas (Anexo I, M7) a monomícticas (Anexo I, M35 y M36), con clastos de hasta 7 cm de diámetro. Escasas tobas cristalinas de composición dacítica (Anexo I, M26) también se reconocen como parte de estas secuencias.

Las brechas freáticas reconocidas en el depósito varían considerablemente en sus características. Pueden ser monomícticas a altamente polimícticas, con clastos subredondeados a angulosos, los cuales suelen variar entre 1 y 6 cm. de diámetro. Las observaciones realizadas confirman en consideración de la ocurrencia y texturas de la mineralización que existen al menos tres eventos diferentes de intrusión de estas litologías: Una premineral (Anexo I, M10, M30 y M45) donde se observan sulfuros cortando en vetillas a la brecha o reemplazando sus clastos, sin diseminación ni desarrollo de cúmulos en la matriz; una sinmineral, que es la más abundante, en la cual la mineralización sulfurada se observa directamente relacionada a la intrusión de esta litología tanto en su matriz, clastos o cementando y rellenando; y finalmente, una etapa post-mineral, donde las brechas intersectan otras litologías previamente mineralizadas sin observarse en ellas desarrollo importante de minerales de cobre (Anexo I, M21 y M37).

Las brechas hidrotermales son en su mayoría altamente polimícticas, y se relacionan directamente tanto con las zonas de alteración de cuarzo-alunita como con las zonas de mayor ley del depósito. El volumen de sulfuros asociado a estas puede alcanzar localmente en tramos de 2 metros hasta un 20% en volumen, presentándose diseminado, en cúmulos, vetillas finas o a modo de rellenos. Las rocas de textura porfídica presentes en Cerro Búfalo son de composición dacítica con un contenido de ojos de cuarzo que varía entre un 5 y 12%, presentando también heterogeneidad en cuanto al tamaño de sus fenocristales (alcanzando en ocasiones hasta 1 cm). Todas las rocas de este tipo observadas en los sondajes revisados son aparentemente pórfidos tempranos pre-minerales del depósito (Pon & Zapatta, 2022), a excepción de un único tramo restringido asociado a alteración sericítica con leve desarrollo de calcopirita (Anexo I, M42), el cual es seguido en profundidad por una brecha ígnea con alteración potásica y mineralización de calcopirita-magnetita (Anexo I, M39).

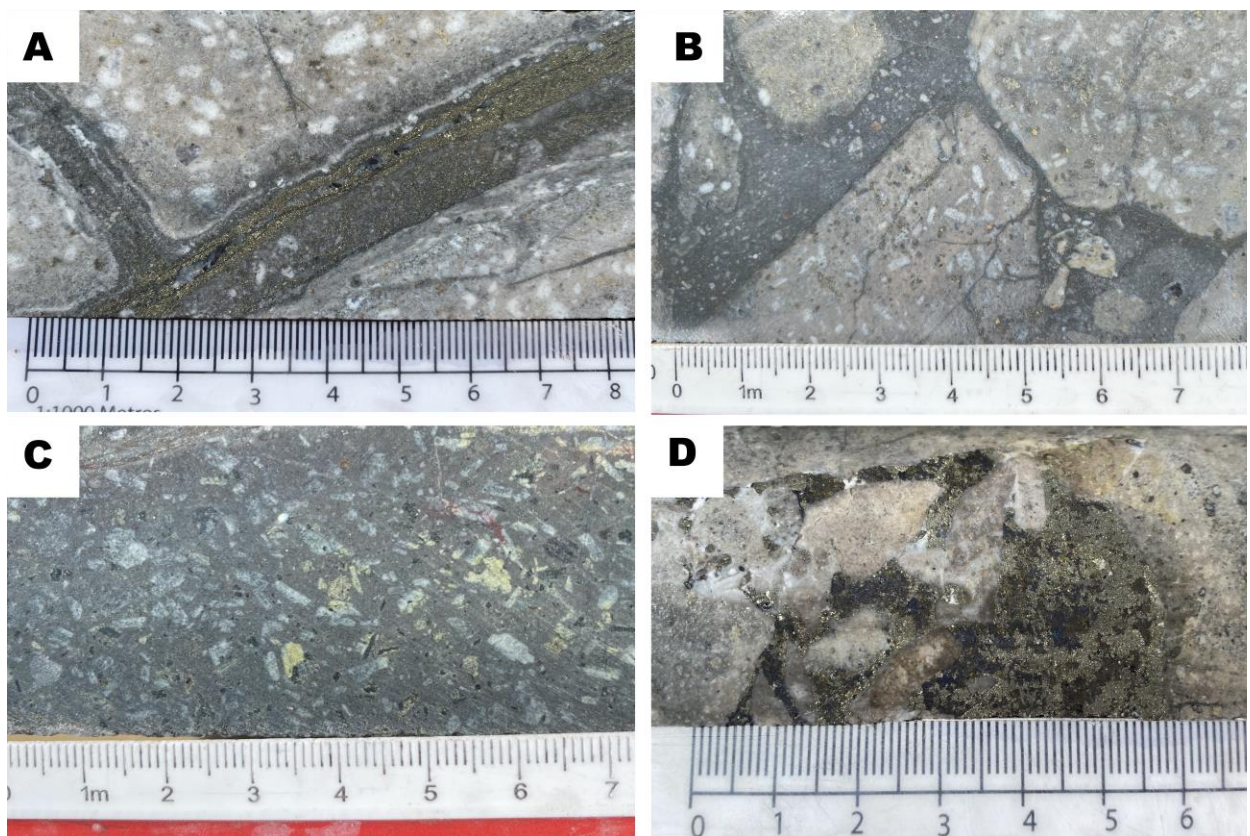


Figura 4.1.2. A) Pórfido dacítico cortado por vetillas mineralizadas de una brecha hidrotermal, B) Brecha freática con clastos de pórfido dacítico; C) Andesita porfídica de anfíbol con alteración propilítica; D) Brecha hidrotermal con abundante mineralización de pirita-enargita>bornita-calcocina como cemento, en la matriz y reemplazando clastos.

4.2 Zonas de alteración

Cerro Búfalo representa un modelo de alteración argílica avanzada con zonación lateral, lo cual tiene relación directa con el comportamiento de las fases de interés económico y su ubicación en el depósito.

Primeramente, el núcleo de alteración se ve representado por la presencia de alunita, la cual puede encontrarse en general estrechamente ligada a sílice en agregados cristalinos que en petrografía macroscópica se caracterizan por su coloración beige a rosácea, y que en el análisis con microscopio óptico se observan como cristales cortos a aciculares alargados de alunita que acompañan a cristales amorfos de cuarzo secundario con un tamaño inferior a 10 μm . En general, la caolinita y arcillas asociadas también son abundantes (15% aprox.) en la sección central, en general hacia zonas periféricas respecto a los agregados cristalinos centrales (Figura 4.2.1 B)

A su vez, es común la presencia de pirofilita y dickita acompañando la paragénesis previamente descrita. El primer mineral se reconoce en muestra de mano por su color blanco y brillo platinado, mientras en microscopía se observan cristales hojosos cortos a aciculares, muy puntualmente tabulares gruesos con tamaño de hasta 150 μm , los cuales poseen colores altos de birrefringencia en nicoles cruzados y extinción oblicua. La dickita, por su parte se distingue durante el mapeo de sondajes debido a su brillo y textura cerosa, mientras que en el estudio de cortes transparentes se reconoce por su coloración blanca, alta reflectividad y bajo relieve, con un hábito de masas cristalinas microscópicas. Ambos minerales pueden reconocerse tanto con una ocurrencia de reemplazo sobre feldespatos como más comúnmente en vetillas, cúmulos y matriz de brechas freáticas a hidrotermales, junto a cuarzo microcristalino a masivo con una textura de relleno (Figura 4.2.1 D), lo cual suele observarse también acompañado por mineralización sulfurada. Sin embargo, no es posible establecer una relación directa entre la aparición de estas fases y el volumen de mineralización sulfurada, pues se presentan de igual manera en varias zonas estériles, además de poseer en si mismas una distribución bastante irregular dentro de los *ledge*.

Las zonas cuarzo-caoliníticas a caoliníticas se caracterizan por agregados micrométricos de fases argílicas y sílice que reemplazan parcial a totalmente la roca original, concentrándose particularmente la mineralización sulfurada en estos casos más bien de forma diseminada o muy puntualmente en vetillas o cúmulos asociados a vetas de mayor tamaño o brechas cercanas.

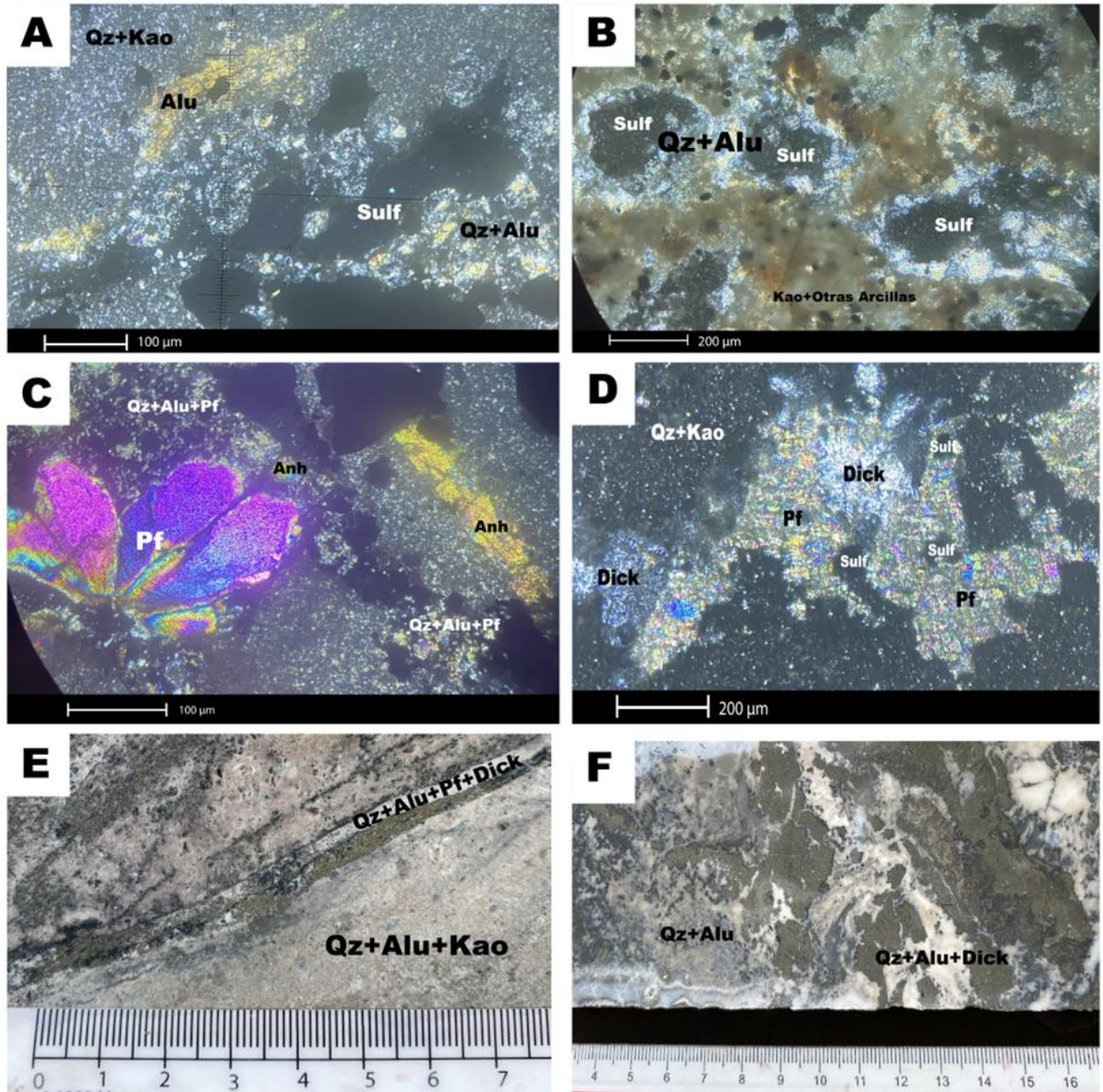


Figura 4.2.1. A) Vetilla de sulfuros en zona de alteración cuarzo-alunita>caolinita. B) Cúmulos de sulfuros envueltos por agregados de cuarzo-alunita. C) Vetillas mineralizadas junto a cuarzo-alunita-pirofilita y locales cristales de pirofilita y anhídrita de mayor tamaño. D) Rellenos de pirofilita-dickita asociados a pequeños cúmulos mineralizados. E) Vetilla de cuarzo-alunita-pirofilita-dickita con sulfuros en ledge. F) Cúmulos sulfurados asociados a veta de cuarzo-alunita-dickita.

Halos de alteración asociados a probables ambientes más profundos pudieron ser identificados durante el presente estudio. Particularmente, en el tramo final del DDHBUF-17, ubicado en el centro de la sección estudiada, se reconoce, primero, entre los 1.500 y 1.370 m s.n.m., una zona en la cual la abundancia de pirofilita alcanza hasta un 10% del total de la roca, acompañada de cuarzo cristalino, asociándose tanto a inyecciones de brechas freáticas, concentrándose en su matriz, como en vetillas de la roca caja andesítica. Seguido a esto, y hasta los 1.320 m s.n.m., se reconoce una zona en la cual un pórfido de composición dacítica con alteración de cuarzo-sericita>caolinita intruye andesitas porfídicas, para finalmente pasar a 10 metros de brecha de origen probablemente ígneo, previamente revisada en estudios de la empresa (Cornejo, 2021; Informe Interno SQM), y en la cual se aprecia una alteración potásica marcada por la presencia de biotitas secundarias. La mineralización presente en la zona de alteración de cuarzo-pirofilita, así como en la de sericita, es escasa. Segmentos acotados cuarzo-alunínicos a cuarzo-caolinínicos entre estas zonas pueden concentrar sulfuros, o muy puntualmente se observan vetillas finas de calcosina-enargita que los cortan (Ver Anexo I, M42; Figura 4.2.2 G), pero no se reconoce mineralización diseminada ni cúmulos, a excepción de muy escasa calcopirita en andesitas con alteración sericítica. Por su parte, los tramos potásicos concentran calcopirita-magnetita en cúmulos y diseminada con un volumen total de hasta 8% con respecto a 2 tramos de roca, generándose una zona con leyes de cobre promedio de 0,8%.

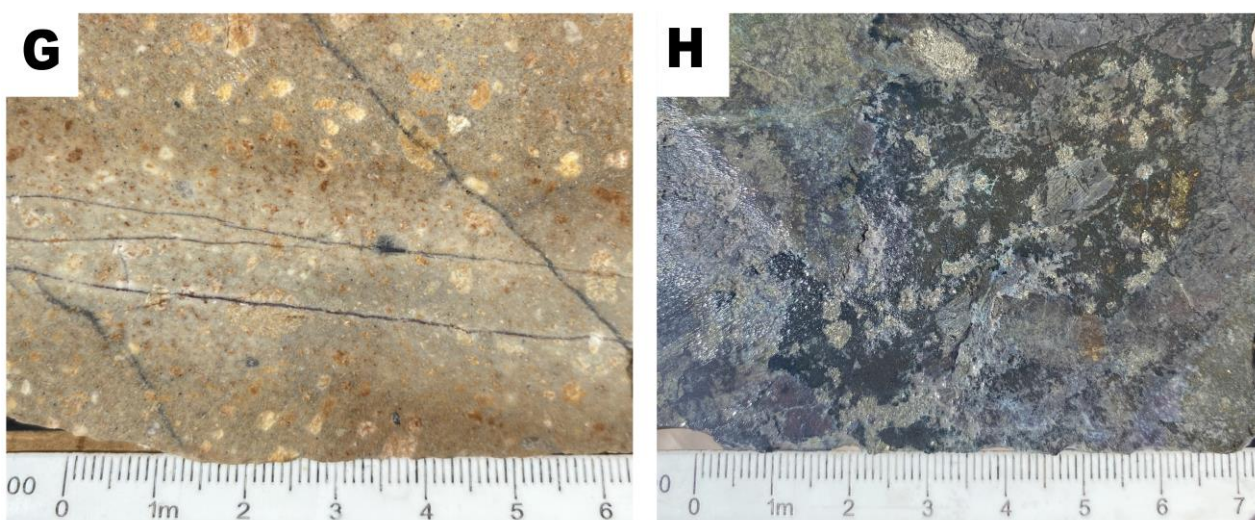


Figura 4.2.2. G) Pórfido dacítico afectado por alteración de cuarzo-sericita-caolinita cortado por vetillas finas de calcosina. H) Brecha ígnea con alteración potásica marcada por la asociación biotita secundaria-magnetita-calcopirita, presentándose en cúmulos sobre los clastos.

4.3 Mineralización sulfurada

4.3.1 Enargita

Como bien se ha descrito en los trabajos anteriores de la empresa SQM (Castillo et al., 2020; Cornejo, 2021; Sillitoe, 2019), la mena de cobre más abundante en el depósito Cerro Búfalo es la enargita. La ocurrencia reconocida para ella es diseminada, en vetillas, vetas, cúmulos, diseminada y asociada a la matriz, clastos y cemento de brechas. Puede tener tanto texturas de relleno como de reemplazo, sobre todo en clastos de brechas hidrotermales y freáticas.

Este mineral se detectó en todos los cuerpos de cuarzo-alunita entre los 1.800 y 1.150 m s.n.m., con una distribución que abarca la totalidad la sección diagonal estudiada tanto en profundidad como lateralmente, aunque en proporciones de volumen bastante variables, encontrándose los mayores entre los 1.300 y 1.400 m s.n.m., donde pueden observarse algunas vetas masivas y abundantes cúmulos junto a pirita y ocasionalmente calcosina. Este último mineral se reconoce asociado a la enargita en varias muestras estudiadas, en proporciones que varían entre 9:1 hasta incluso 1:1 en casos puntuales. Se logra reconocer en ocasiones texturas de reemplazo de la calcosina sobre la enargita. Puntualmente, aparece también digenita como parte de esta paragénesis.

Si bien se reconoce de forma clara una asociación estrecha entre la aparición de la enargita y los cuerpos ledge cuarzo-aluníticos, pueden encontrarse también cuerpos sulfurados con este mineral (\pm calcosina/digenita) en zonas de cuarzo-caolinita, sobre todo en vetillas finas (Ver Anexo 1: M35, M38, M40, M42, M43), representando zonas de alta ley en la lateral del núcleo de los ledge.

Otras sulfosales de cobre-arsénico-antimonio presentes en el depósito son la tenantita, famatinita y luzonita (polimorfo de baja temperatura de la enargita), cuyas relaciones paragenéticas con la enargita y distribución se detallan en los apartados siguientes.

4.3.2 Tenantita

La tenantita aparece en Cerro Búfalo aproximadamente desde la cota 1.450 m.s.n.m. hacia profundidad, y tanto su abundancia como hábito, asociaciones paragenéticas y relaciones texturales con la enargita presentan diferencias variaciones significativas en la vertical de la sección.

A continuación, se separan tres segmentos según profundidad para detallar las observaciones realizadas mediante microscopía óptica.

4.3.2.1 Tenantita bajo la cota 1.350 m.s.n.m.

Las muestras más profundas (Anexo 2; CT 3,12,13, 22 y 34) presentan la tenantita con un hábito de masas de cristales finos subhedrales (en el sistema cúbico) que pueden disponerse tanto en cúmulos que rellenan espacios o asociados a la matriz de brechas, como también en vetillas. Puede desarrollarse por si sola, asociada a pirita-esfalerita, o incluso junto a la paragénesis calcopirita-bornita, tanto en intercrecimiento conjunto (CT13) dentro de vetillas como bordeándolas en presunta textura de reemplazo (CT12).

La relación textural de la tenantita y la enargita en este segmento indica en la mayoría de los casos reemplazo del segundo mineral sobre el primero, generándose cristales prismáticos subhedrales de enargita a partir de los bordes de la tenantita, o como masas cristalinas anhedralas que se introducen a través de fracturas en los agregados de tenantita-pirita±calcopirita±bornita±blenda. En general los cúmulos de tenantita junto a otras fases de sulfuración intermedia pueden alcanzar tamaños de hasta 5 mm, mientras los cristales de enargita no suelen superar los 100 micrómetros.

La tenantita suele alcanzar bajo esta profundidad cerca de un 8-10% del volumen total de sulfuros, siendo mucho más abundante que en zonas más someras. La relación enargita:tenantita en estas muestras suele rondar entre 7:3 y 1:1, siendo esta la paragénesis dominante en las zonas de *ledge*.

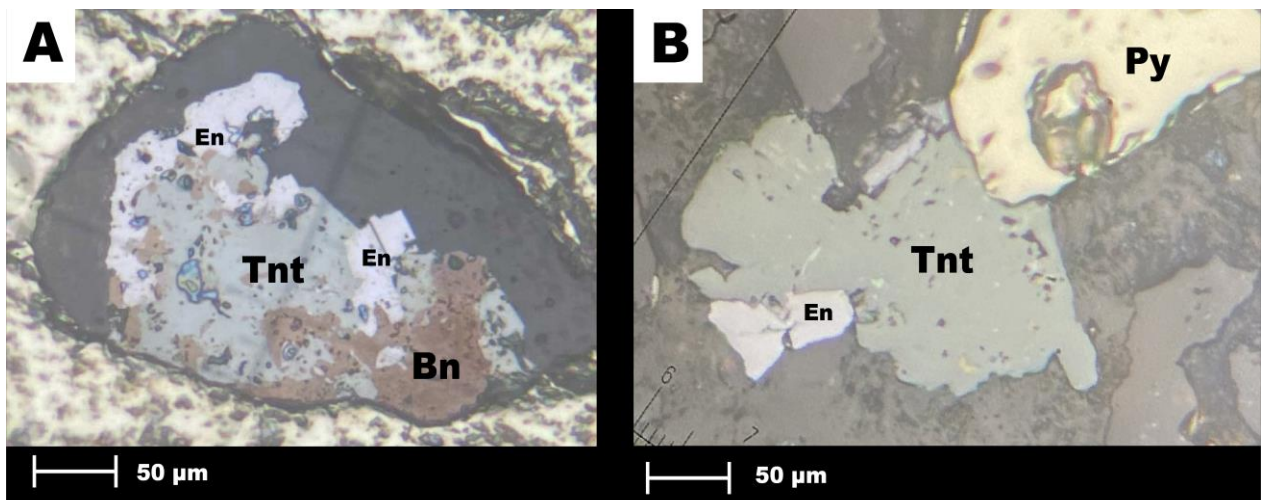


Figura 4.3.2.1. A) Agregado de bornita y tenantita siendo reemplazado por enargita en los bordes y en las zonas más fracturadas. B) Cristales subhedrales prismáticos de enargita desarrollándose desde el borde de un cristal de tenantita.

4.3.2.2 Tenantita entre las cotas 1.450 y 1.350 m.s.n.m.

Las muestras contenidas entre estas profundidades (Anexo 2, CT26, CT30, CT35, CT41, CT45) se caracterizan por un dominio en volumen de la enargita sobre la tenantita, y de esta última sobre otras fases de sulfuración intermedia como la esfalerita, calcopirita y bornita.

La paragénesis tenantita+bornita+calcopirita+esfalerita sigue estando presente, aunque en contraste con las muestras más profundas, mayormente aparece como remanentes o “huéspedes” en cristales de enargita (Anexo 2, CT30) o bien a modo de intercrecimiento con esta dentro de una única masa de sulfuros (Anexo 2, CT41). Texturalmente, las evidencias indican que la enargita (o luzonita en ciertos casos) es posterior, sobre todo debido a que domina los bordes de los agregados minerales y que en ocasiones se desarrolla cortando o rellenando espacios entre los minerales de sulfuración intermedia.

Una diferencia significativa con las observaciones realizadas bajo la cota 1.350 m s.n.m. se relacionan al hábito de la tenantita, pues es mucho menos común observar cristales bien formados, restringiéndose más bien a pequeñas masas irregulares, mientras la enargita se desarrolla en cristales prismáticos mejor definidos, con tamaño de hasta 2 mm. Del mismo modo, el volumen de tenantita es mucho más restringido, rondando el 3-5% del volumen total de sulfuros.

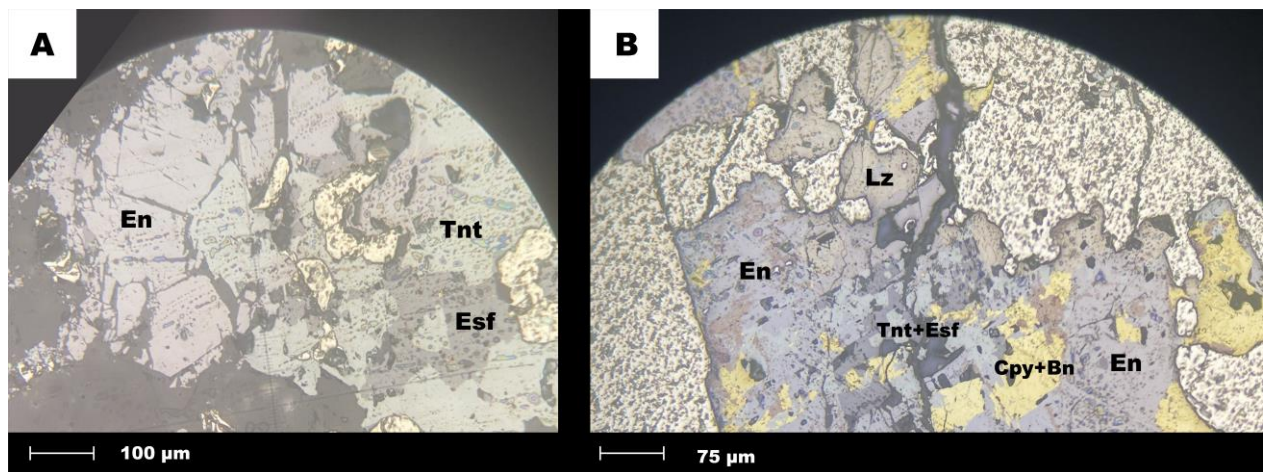


Figura 4.3.2.2. A) Cristales de enargita subhedrales prismáticos generándose en el borde de un cúmulo de tenantita-esfalerita. B) Agregado masivo de sulfuros en el cual tenantita, esfalerita y calcopirita se observan en las zonas centrales con bordes angulosos hacia la enargita, la cual se desarrolla preferentemente hacia los bordes junto con luzonita, que además cubre los bordes de la fractura central.

4.3.2.3 Tenantita sobre la cota 1.450 m.s.n.m.

Las muestras más someras en las cuales se reconoce tenantita en Cerro Búfalo presentan como diferencia con respecto a los tramos descritos anteriormente el reemplazo de enargita por tenantita y otras fases de sulfuración intermedia asociadas, como esfalerita, calcopirita y bornita.

Este proceso de reemplazo puede observarse mayormente a modo de inyecciones por fracturas de tenantita hacia el centro de cristales de enargita, aunque puede reconocerse también pseudomorfismo (Anexo 2, CT37), relleno de cavidades y bordes, los cuales pueden desarrollarse incipientemente o envolviendo totalmente cristales prismáticos (Anexo 2, CT44). Como parte del mismo proceso, se reconoce también en varias ocasiones desarrollándose por sobre calcosina/digenita asociada a la enargita.

La tenantita asociada a este proceso es masiva y se desarrolla siempre asociada a cristales previos de enargita. Del mismo modo, se reconoce distinta genéticamente a la reconocida en profundidades mayores dada la secuencia temporal observada con respecto a este último mineral.

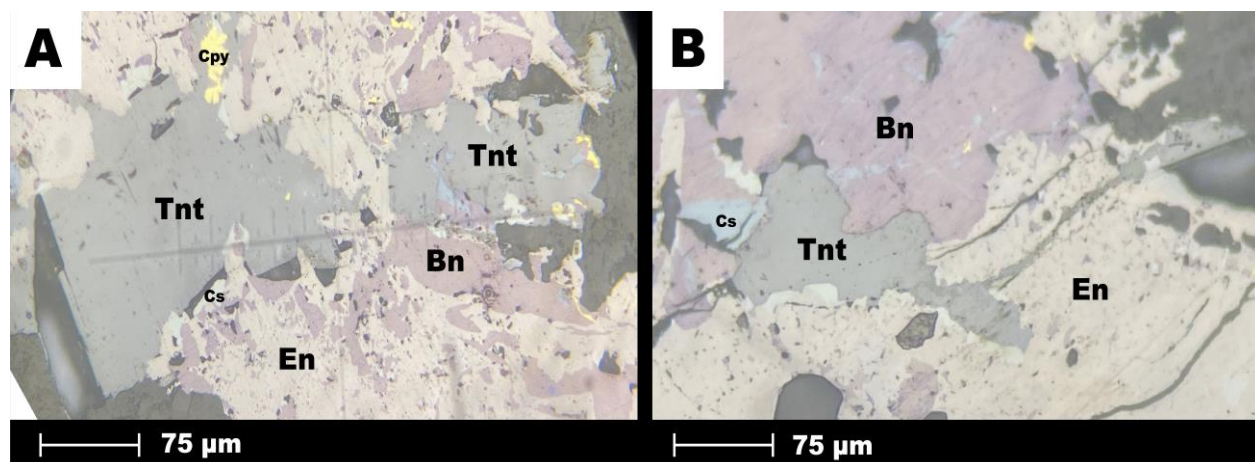


Figura 4.3.2.3. A) Pseudomorfismo de tenantita con trazas de calcopirita en un cristal de enargita prismático, e inyección de bornita desde los bordes por fracturas. B) Tenantita corta cristal previo desde el borde, reemplazando enargita y calcosina.

4.3.3 Luzonita

La luzonita, dimorfo de baja temperatura de la enargita, puede reconocerse, en general, cerca de la cota 1.450 m.s.n.m. (Anexo 2, CT35, 41, 44), con la excepción de la muestra M43 (Anexo 2, CT43), cercana a la cota 1.650.

Siempre se reconoce en solución sólida con enargita, ya sea como un intercrecimiento masivo o como una exsolución lineal. Es también común que la luzonita se ubique hacia el borde de los cristales (Anexo 2, CT41), lo que parece indicar una temporalidad más tardía. Esto coincide con la relación que esta fase puede presentar con los agregados de sulfuración intermedia que reemplazan enargita sobre la cota 1.450 m s.n.m., descritos anteriormente en el punto 4.3.2.3. En particular, en estos casos se observa como pequeños agregados masivos que rodean cristales de enargita, asociados a bordes gruesos de esfalerita+tenantita (Anexo 2, M44).

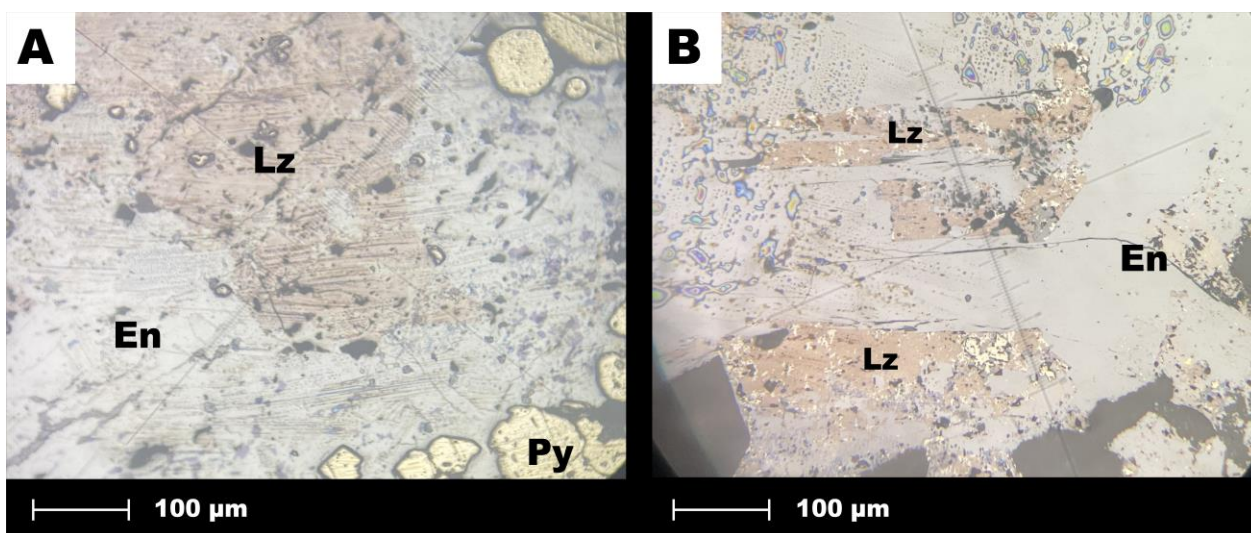


Figura 4.3.3. A) Intercrecimiento de luzonita-enargita. B) Exsolución lineal en el sentido de la exfoliación de luzonita en enargita.

4.3.4 Famatinita

Esta sulfosal de cobre y antimonio puede reconocerse muy puntualmente en Cerro Búfalo, en dos muestras estudiadas (Anexo 1, M24 y M32), entre las cotas 1.750 y 1.650 m s.n.m., es decir, muy someramente, cerca del techo de sulfuros.

Se reconoce en entrecrecimiento con enargita; en ocasiones, mediante exsoluciones lamelares de cristales prismáticos, aunque también puede estar reemplazándola, al desarrollarse en agregados cristalinos finos que envuelven cristales prismáticos (Anexo 2, CT24). Esta relación textural indicaría leve posterioridad con respecto a su contraparte rica en arsénico.

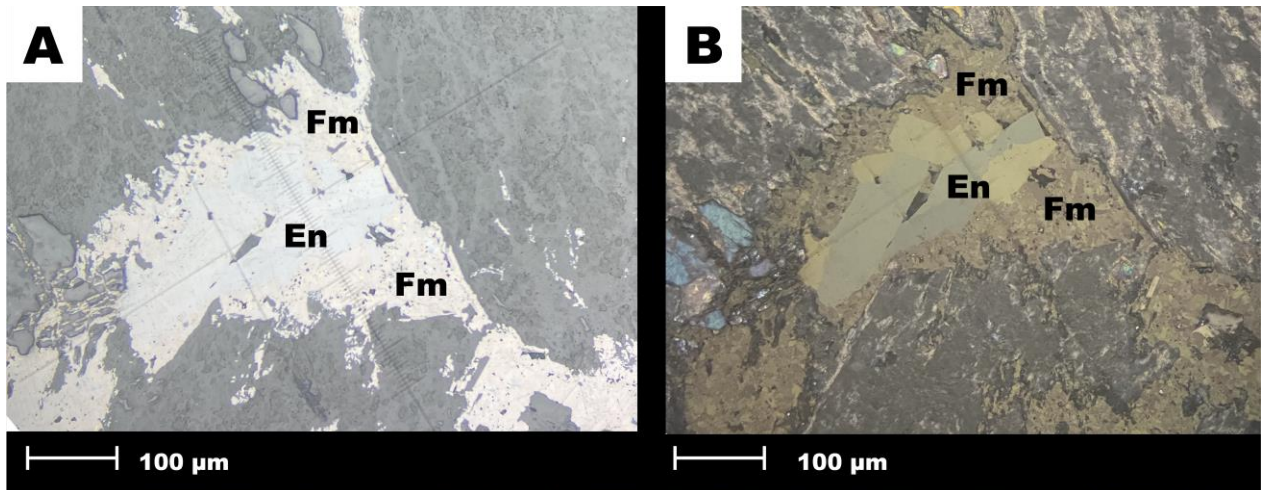


Figura 4.3.4. A) Famatinita en agregados cristalinos finos rodeando cristales prismáticos de enargita. B) Mismo caso que A, pero en nicoles cruzados.

4.3.5 Calcopirita y bornita

Durante el estudio realizado se reconoce la presencia de sulfuros de cobre y hierro en zonas bastante restringidas espacialmente y con volúmenes relativamente bajos, que en general rondan el 5% del total de sulfuros en soportes de 2 metros de sondaje. Entre ambas, la bornita es la fase más abundante, alcanzando en algunos casos hasta un 25-30% del volumen total de sulfuros (Ver Anexo 2, CT12, CT13).

En términos generales, pueden distinguirse en base a las relaciones texturales y la distribución de ellas en el depósito dos etapas paragenéticas diferentes, las cuales se describen a continuación.

4.3.5.1 Calcopirita y bornita profundas

En gran parte de los cuerpos ledge cuarzo-aluníticos, predominantemente bajo la profundidad de 1.400 m s.n.m., pueden reconocerse varias muestras (Anexo 2, CT3, CT12, CT13, CT26, CT41) que presentan estas fases, predominantemente a modo de agregados masivos, que se desarrollan en vetillas, cúmulos o asociadas a brechas hidrotermales. En general ambos minerales se presentan en un intercrecimiento, con texturas de interdigitación y solución sólida que parecen indicar formación contemporánea, aunque en casos particulares, en ciertas vetillas, puede encontrarse bornita bordeando calcopirita, indicando cierta posterioridad (Anexo 2, M13).

Esfalerita, pirita y tenantita son minerales que comúnmente acompañan esta paragénesis. La abundancia de esfalerita es bastante variable, y en general se presenta siempre como parte de los agregados masivos en solución sólida, especialmente albergando *blebs* de calcopirita. Por su parte, la tenantita puede bien reconocerse también en intercrecimiento o bordeando las demás fases, lo cual sumado a su estrecha relación con la enargita la identifica como un mineral ligeramente posterior en la secuencia paragenética.

Las relaciones texturales suelen indicar que la enargita y calcosina/digenita, minerales de sulfuración más elevada, son posteriores en relación a la calcopirita y bornita profundas. La evidencia más común de esto son las islas huéspedes con bordes angulosos observables en gran parte de los cristales de enargita, la cual además puede generarse a partir de los bordes de cúmulos o vetillas que albergan minerales de sulfuración intermedia (Ver Anexo 2, CT13, CT41). Por su parte, la calcosina comúnmente se reconoce como vetillas que se introducen a los agregados cortando la mineralización previa, o bien generándose bordeándola, sobre todo asociada a bornita.

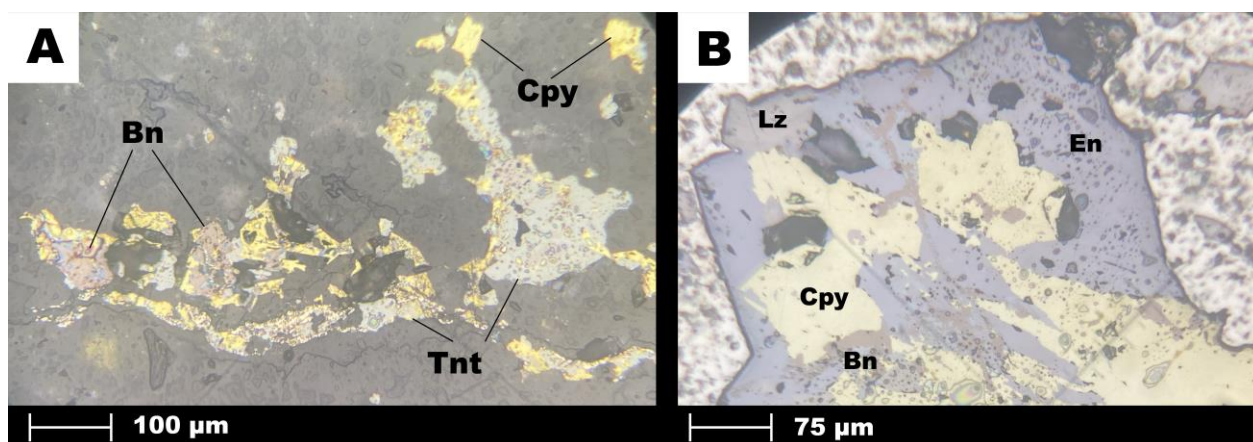


Figura 4.3.5.1. A) Intercrecimiento complejo de bornita, calcopirita y tenantita con leves reemplazos de calcosina. B) Islas remanentes con bordes angulosos de calcopirita-bornita envueltas por cristales de enargita y luzonita.

4.3.5.2 Calcopirita y bornita someras.

Tal como fue descrito para el caso de la tenantita, existen grandes diferencias que separan a las muestras que presentan la paragénesis calcopirita-bornita sobre la cota de 1.450 m s.n.m. aproximadamente (Anexo 2, CT5, CT25, CT37, CT43, CT44), asociadas a la relación textural de reemplazo que estos minerales presentan sobre la enargita y la calcosina, generándose especialmente a modo de bordes que cubren cristales o agregados acumulados de alta sulfuración.

En las muestras ubicadas entre las cotas 1.550 y 1.450 m s.n.m., calcopirita y bornita aparecen de forma subordinada respecto a tenantita y esfalerita, dentro de cúmulos en bordes o vetillas que ocupan fracturas dentro de enargita o pirita. En estos casos, presentan un hábito masivo, en intercrecimiento con las fases sulfuradas mencionadas anteriormente.

Más hacia la superficie, sobre la cota 1.600 m s.n.m., la calcopirita y bornita no se ven acompañadas por tenantita, y se presentan en agregados finos anhedrales que se desarrollan en los bordes de cristales de enargita o agregados de enargita-calcosina, con una textura de tipo *coating*. Pueden también encontrarse rellenando espacios dentro de cristales (Anexo 2, M5), en general conservando pequeños remanentes de enargita dentro. Particularmente, se reconoce a la bornita preferencialmente reemplazando a muestras con abundante calcosina, desarrollándose por sobre esta (Anexo 2, M43).

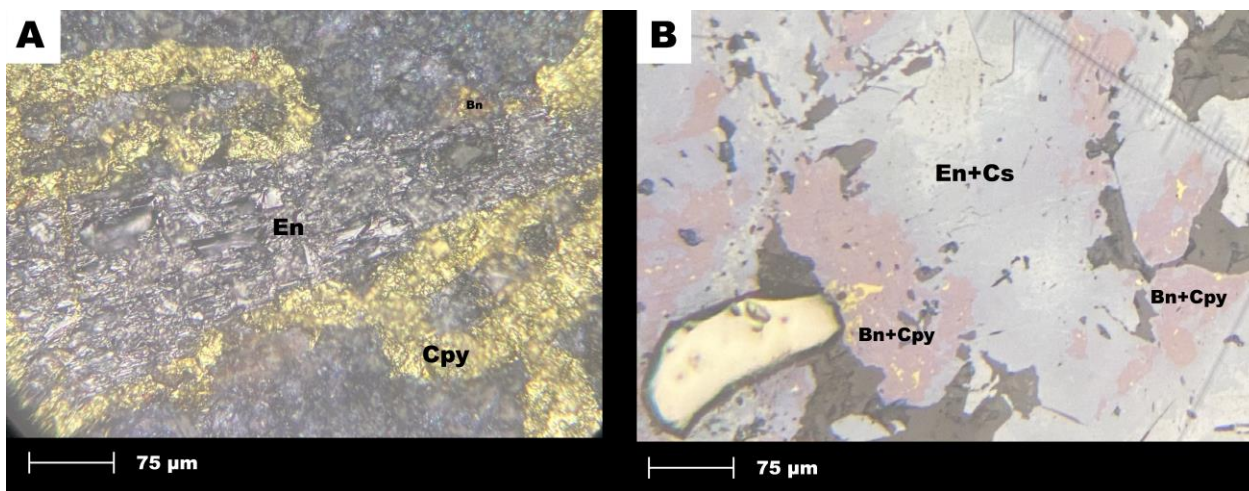


Figura 4.3.5.2 A) Calcopirita con menor bornita envolviendo enargita con una textura de reemplazo de tipo *coating*. B) Bornita con trazas de calcopirita desarrollándose en los bordes y fracturas en un agregado de enargita-calcosina.

4.3.6 Calcosina, digenita y covelina

Sulfuros de cobre asociados a eventos de alta sulfuración pueden reconocerse con una distribución bastante global en Cerro Búfalo, reconociéndose a lo largo y ancho de la sección estudiada, entre las profundidades de 1.800 y 1.150 m s.n.m. Sin embargo, la abundancia relativa de estas fases en comparación a otros sulfuros es bastante reducida, rondando el 3-5% del volumen total de sulfuros, y en ocasiones excepcionales alcanzando el 10%. En general, pueden encontrarse en los cuerpos de cuarzo-alunita (o incluso en halos cuarzo-caoliníticos) asociados principalmente a enargita, pero también por sí sola, o reemplazando pirita, bornita, tenantita o calcopirita.

La fase más dominante dentro de este grupo es la calcosina, seguida por la digenita. La covelina se presenta esporádicamente y nunca supera el 2% del volumen total de sulfuros. La distinción entre los dos primeros minerales puede realizarse con mayor facilidad en muestra de mano, dada sus diferencias de solubilidad y color. Por el contrario, en estudio microscópico estos minerales suelen observarse como una única fase isótropa de color gris azulado, representando una solución sólida y crecimiento conjunto entre ambos.

La textura más común para estas fases es de reemplazo, con hábito masivo, generándose en el borde de enargita, pirita, bornita o tenantita. Pueden aparecer también a modo de vetillas que cruzan cristales, tanto siguiendo direcciones cristalográficas preferenciales como adaptándose a fracturas o zonas de debilidad. También es posible observar la calcosina y digenita ejerciendo pseudomorfismo sobre cristales de enargita (Anexo 2, CT40).

Las texturas mencionadas indican que la calcosina, digenita y covelina resultan posteriores tanto a los eventos profundos de tenantita-calcopirita-bornita-esfalerita como a la enargita, aunque en ocasiones, pareciera existir un crecimiento conjunto con esta sulfosal, presentándose como inclusiones dentro de ella o generando exsoluciones lineales en el sentido de la exfoliación (Anexo 2, CT40), como también compartiendo el mismo hábito y ocurrencia (Anexo 2, CT36). Del mismo modo, la calcosina/digenita es anterior a la paragénesis calcopirita-bornita presente en los niveles más someros y puede verse reemplazada por esta.

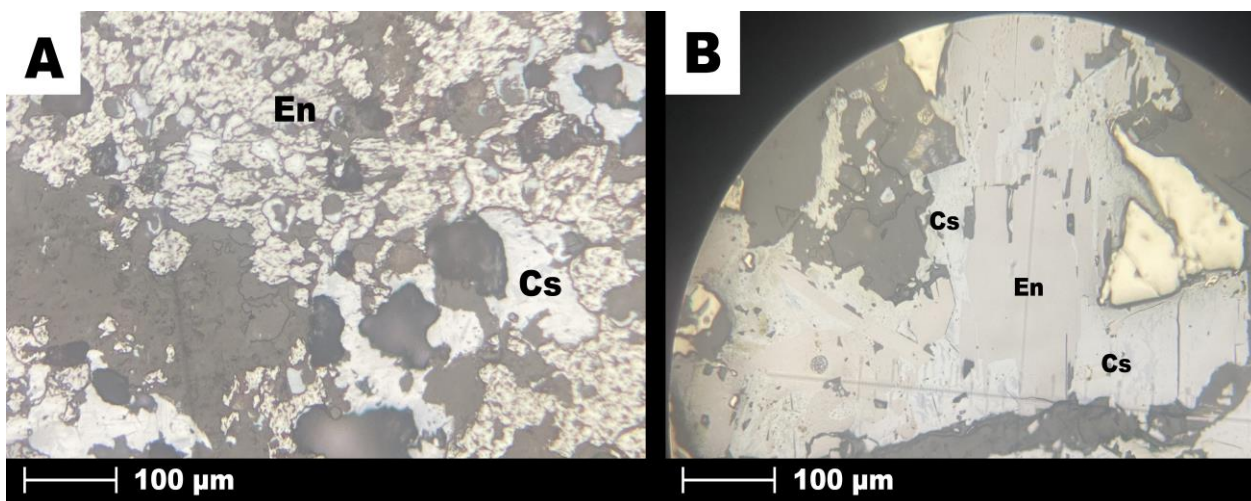


Figura 4.3.6.1. A) Paragénesis calcosina-enargita en agregados anhedrales. B) Exsolución lamelar de calcosina en enargita siguiendo la dirección de exfoliación de esta última.

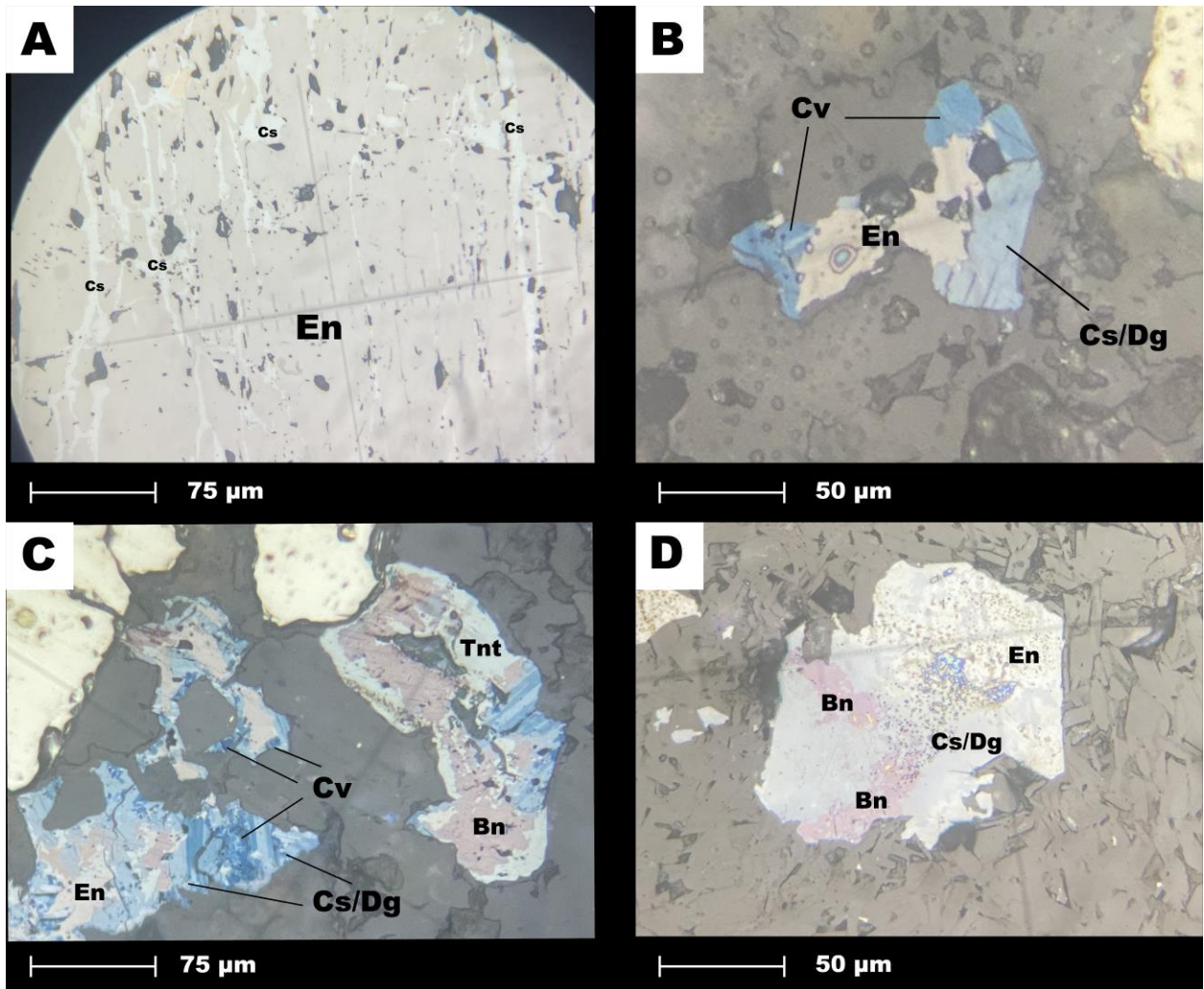


Figura 4.3.6.2. A) Venas de calcosina cortando enargita siguiendo el sentido de su exfoliación. B) Calcosina/digenita y covelina reemplazando enargita. C) Calcosina y digenita (En solución lamelar) más covelina, reemplazando enargita, tenantita y bornita. D) Cristal de enargita en intercrecimiento con calcosina, siendo esta última reemplazada por bornita desde fracturas.

4.4 Distribución de sulfuros

Dada la necesidad de realizar un modelo conceptual de mineralización que represente las observaciones realizadas, los resultados derivados del trabajo realizado en petrografía macroscópica y microscópica son representados en perfiles a escala 1:4.000, en los cuales se ubican las muestras indicando las fases minerales presentes en cada una de ellas.

Con motivos de simplificar y ayudar a correlacionar de forma más eficiente la información, se realizan tres perfiles separados por familias de sulfuros, los cuales se presentan a continuación.

4.4.1 Sulfosales de Cu-As-(Sb)

Las sulfosales de Cu-As-(Sb) se presentan la totalidad de la sección estudiada bajo el techo dominante de sulfuros. Como se describió en el apartado 4.3, la enargita aparece de forma global dentro de los cuerpos de tipo ledge, mientras la tenantita posee una distribución y abundancia en volumen limitada por la profundidad. Un caso similar ocurre para la famatinita, que se restringe a zonas someras, mientras la luzonita aparece de forma únicamente puntual en algunas zonas.

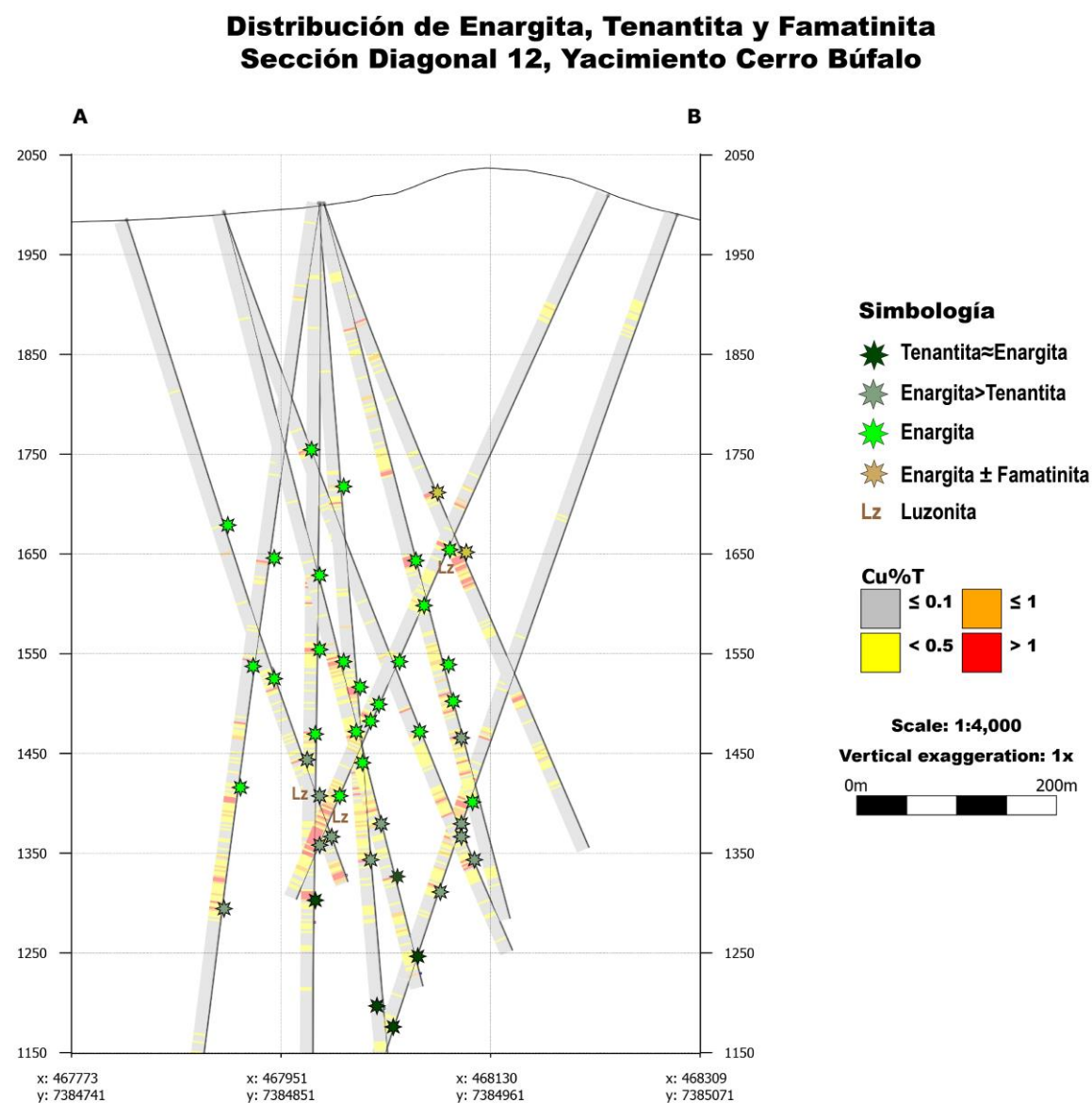


Figura 4.4.1. Perfil a escala 1:4.000 con la distribución de las sulfosales de Cu-As-(Sb) en las muestras estudiadas.

Como puede observarse en la figura 4.4.1., la tenantita presenta volúmenes que se acercan a los de enargita por debajo de la cota 1.300 m s.n.m.. Sobre esta profundidad y hasta los 1420 m s.n.m., es aún común encontrarla dentro de los cuerpos ledge, aunque con volúmenes mucho menores. Sobre esta última cota, se identifican en el presente estudio únicamente dos muestras que contienen tenantita (Anexo 1, M37 y M44), siendo estas en las cuales se reconoce a este mineral junto a esfalerita reemplazando a enargita (Anexo 2, CT37 & 44). Más hacia la superficie, únicamente se reconoce enargita (con ocasional luzonita) como sulfosal de cobre-arsénico presente.

Por otro lado, es posible reconocer dos muestras (Anexo 1, M24 y M32) en las cuales aparece famatinita. Ambas se ubican sobre la cota 1.650 m s.n.m., cerca del techo de sulfuros.

4.4.2 Calcopirita y bornita

La distribución espacial de estos sulfuros de cobre y hierro se ve marcada por un *gap* que se genera sobre la cota 1.500 m s.n.m., en donde se separan las muestras profundas, asociadas a un evento previo a la enargita y calcosina, con las muestras someras, donde pueden observarse estas fases reemplazando a dichos sulfuros.

La paragénesis profunda de calcopirita-bornita se presenta de forma especialmente abundante hacia el extremo suroeste de la sección (A la izquierda de la figura 4.4.2) en comparación al extremo noreste, donde aparece únicamente como trazas menores asociadas a enargita y tenantita.

Adicionalmente, se incluye dentro del perfil 4.4.2. la muestra de calcopirita-magnetita asociada a alteración potásica (Anexo 1, M39), aunque no se considera parte de la paragénesis profunda descrita previamente, si no a un evento independiente, probablemente anterior.

4.4.3. Calcosina, digenita y covelina.

Puede reconocerse la presencia de estos sulfuros de cobre entre las cotas 1750 y 1250 m s.n.m. (aunque cabe la posibilidad de que puedan encontrarse a profundidades mayores), y presentes tanto en el extremo suroeste como la zona central y el noreste de la sección estudiada.

Su abundancia en volumen es muy variable, aunque lo más común es que la suma de estos presente un volumen relativo inferior o similar a la enargita dentro del porcentaje total de sulfuros. No obstante, se identifican tres muestras en la zona central del depósito, entre las cotas 1.650 y 1.450

m s.n.m., en las cuales el volumen de calcosina/digenita es mayor al de enargita, guardando estas cierta correlación espacial en la vertical (Ver Anexo 2, CT26 & 43). Adicionalmente, es importante observar el aumento considerable en la razón de Cu/As asociado a estas muestras que se reconoce en el análisis de laboratorio.

La covelina se reconoce como trazas en varios sectores, aunque de forma más relevante se presenta en dos muestras hacia el extremo suroeste de la sección, bajo la cota 1.300 m s.n.m. Del mismo modo que las muestras con abundante calcosina, la presencia de este mineral genera una razón Cu/As muy elevada localmente.

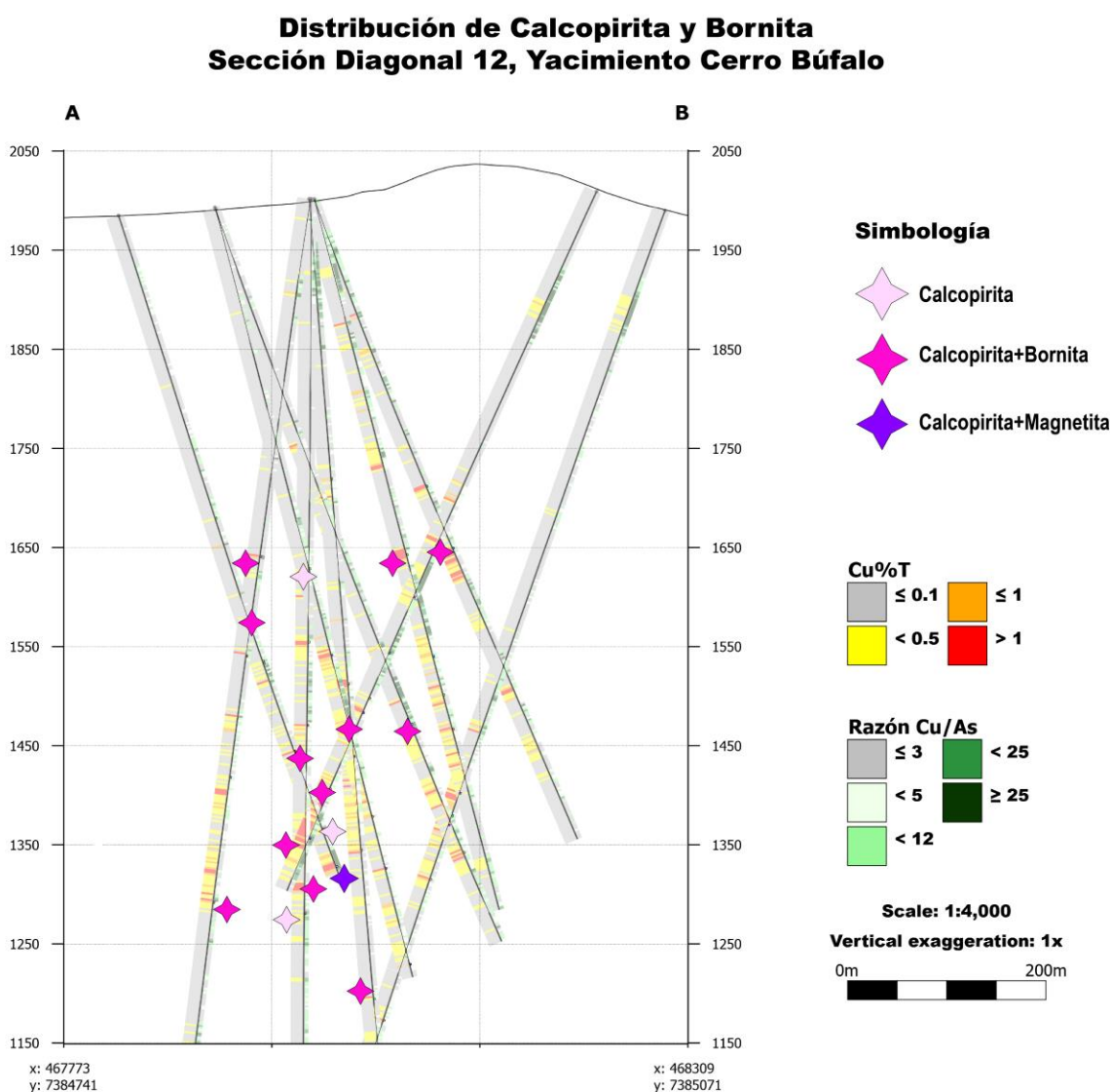


Figura 4.4.2. Perfil a escala 1:4.000 con la distribución de calcopirita y bornita en las muestras estudiadas.

Distribución de Calcosina, Digenita y Covelina Sección Diagonal 12, Yacimiento Cerro Búfalo

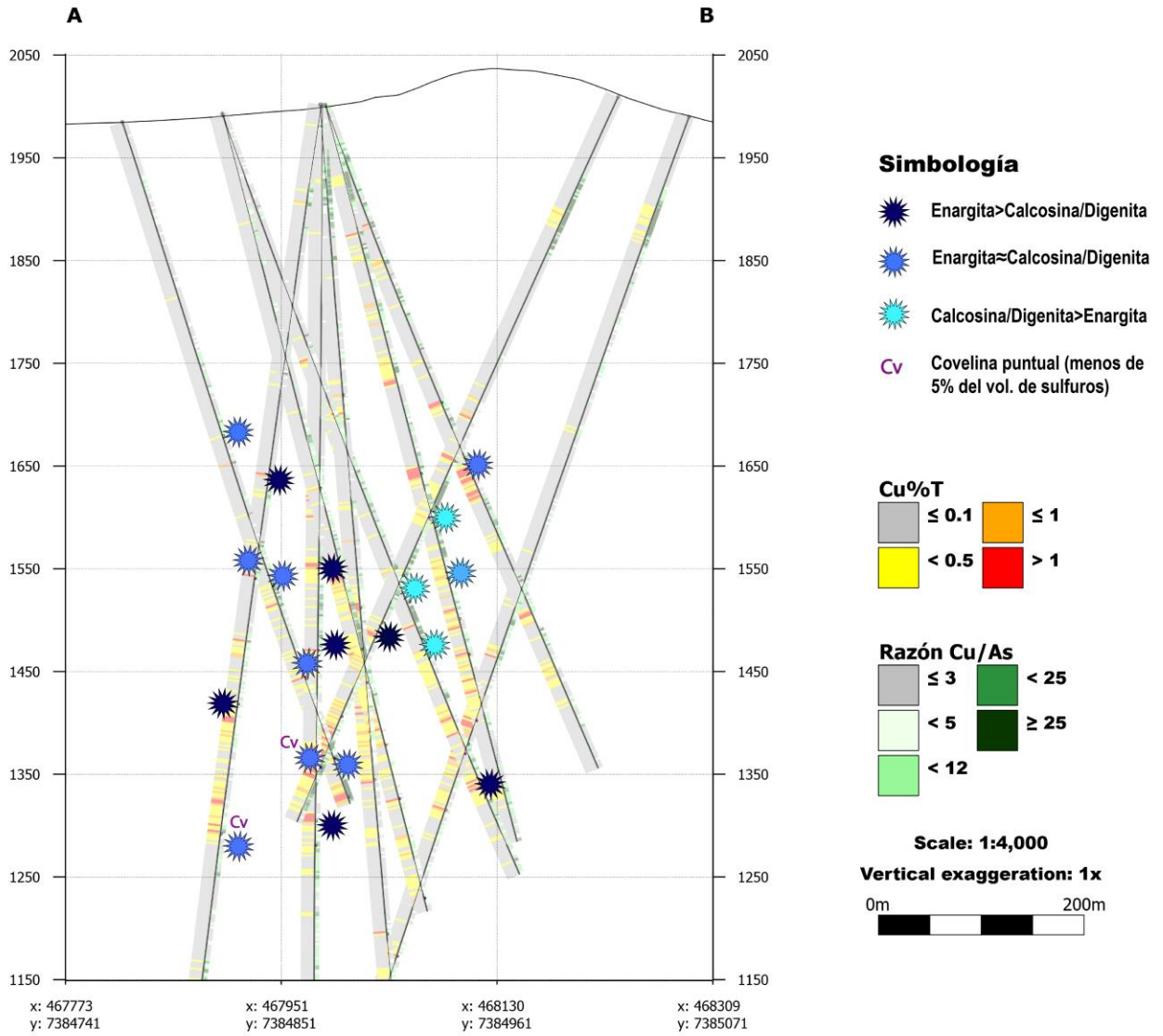


Figura 4.4.3. Perfil a escala 1:4.000 con la distribución de calcosina, digenita y covelina en las muestras estudiadas.

5. DISCUSIÓN

5.1 Modelo litológico

Tal como se ha descrito en trabajos anteriores respecto al depósito (Sillitoe, 2019; Castillo et al., 2020; Pon & Zapatta, 2021), Cerro Búfalo se ve emplazado en rocas volcánicas a volcanosedimentarias de composición daciandesítica, las cuales se habrían depositado en un contexto de calderas, siendo luego intruídas por hipoabisales dacíticos, brechas hidrotermales y brechas freáticas.

Como puede observarse en la figura 5.1, existe una correlación bastante evidente entre la ubicación de las estructuras mayores, de carácter subvertical, definidas durante la campaña de sondajes 2020 (Castillo et al., 2020) y la ubicación de los principales cuerpos intrusivos observados durante el presente trabajo. En base a esto, es posible afirmar que este control estructural operó tanto antes, como durante y después de los eventos de mineralización, generando en muchos casos sobreposicionamiento espacial de brechas y pórfidos de distinta temporalidad. Esto resulta relevante, pues ayuda a explicar no solo la aparición de brechas freáticas post-minerales con líticos de pórfidos dacíticos o de brechas hidrotermales con sulfuros, sino también a comprender que dichos cuerpos en múltiples ocasiones aparezcan únicamente en pequeños tramos sin continuidad horizontal o lateral evidente, al ser superpuestos por eventos más tardíos. Esto es común en depósitos dominados por un fuerte control estructural como La Pepa – Maricunga (Muntean & Einaudi, 2001), Valeriano (Sillitoe et al., 2016) y Filo del Sol (Perelló et al., 2023).

Existen diferencias significativas respecto a las brechas hidrotermales presentes en la zona central y el extremo suroeste de la sección con respecto a las ubicadas hacia el sector noreste, pues el primer grupo, en general, se ve más correlacionado con mineralización de enargita-calcosina, zonas de alta ley de cobre y se relacionan espacialmente a cuerpos de cuarzo-alunita, mientras el segundo carece de estas características. Una posible explicación para esto radica en una diferencia de temporalidad entre dichos eventos. En Guanaco, por ejemplo, se describe un evento de brechas hidrotermales ricas en sílice, caolinita y pirita, que se reconoce como la etapa inmediatamente posterior al desarrollo de las estructuras tipo ledge que alojan enargita-tenantita (Jovic et al., 2021).

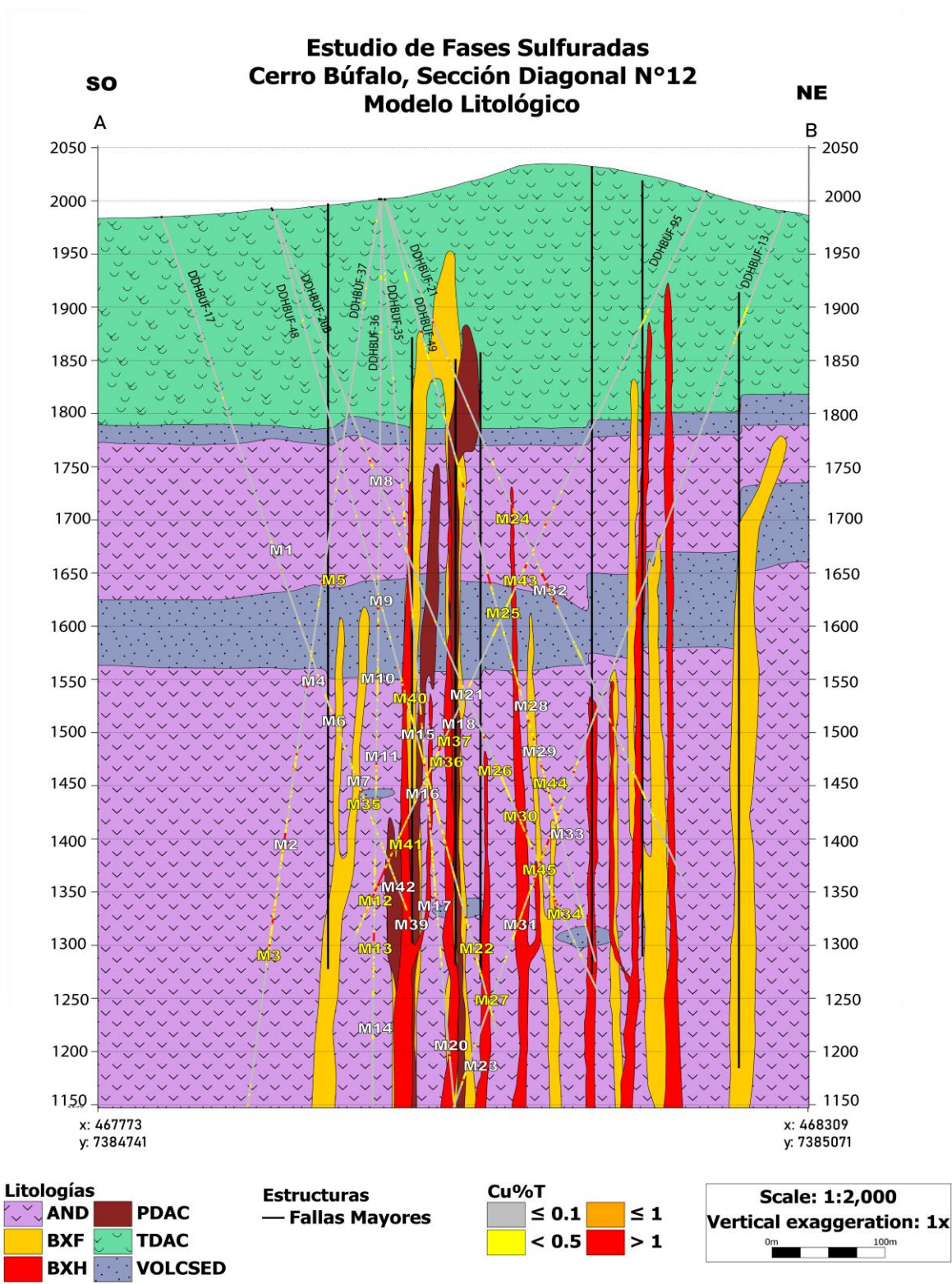


Figura 5.1. Modelo litológico de la sección N°12 realizado en software Leapfrog. La nomenclatura abreviada de las litologías en la leyenda es la usada en el apartado 2.3 del texto. Se representan en el perfil todas las muestras revisadas (Anexo I), y en amarillo se marcan las observadas en corte transparente (Anexo II).

Si bien las brechas hidrotermales y freáticas sin-minerales albergan parte de la mineralización sulfurada, esta puede desarrollarse dentro de las litologías estratificadas mediante vetas, cúmulos, reemplazos de la roca original, *stockworks* o diseminada. Esto se explica debido a que las estructuras silicatadas de tipo *ledge*, que son el principal conducto mediante el cual circulan los fluidos mineralizantes en Búfalo, no siempre poseen directa correlación espacial con estos cuerpos intrusivos. Esto da a entender que las estructuras utilizadas por los fluidos ácidos que generan los ledges son distintas a las estructuras mayores previamente registradas en las labores de sondaje.

Otros depósitos con estructuras de tipo *ledge* como Colquijirica (Fontboté & Bendezú, 2009), Guanaco (Jovic et al., 2021) y La Pepa (Muntean & Einaudi, 2001) comparten esta característica respecto a la ocurrencia de la mineralización, presentando vetas masivas de enargita o cúmulos asociados a reemplazo de la roca original que son dominantes por sobre la mineralización en brechas. Pierina (Fifarek & Rye, 2005) es un caso extremo, pues la mineralización se presenta predominantemente diseminada hacia los bordes de la estructura debido a la permeabilidad de la roca caja (tobas finas de ceniza), lo que en Cerro Búfalo ocurre de forma limitada, principalmente en la unidad volcanosedimentaria.

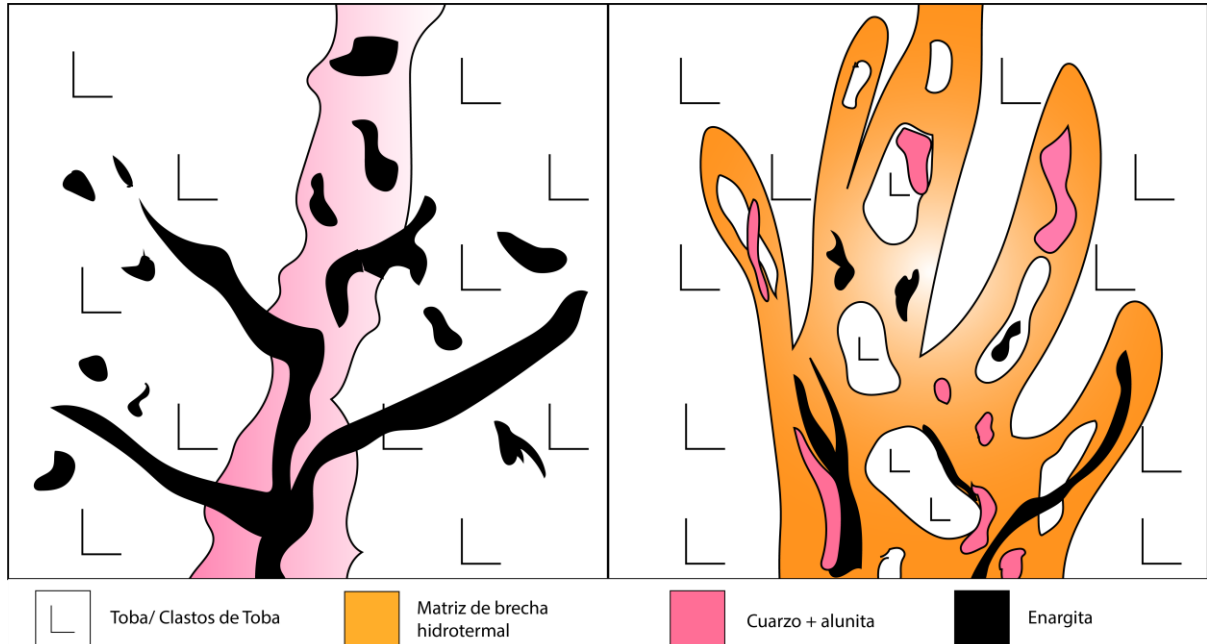


Figura 5.2. Esquema comparativo entre dos estilos de mineralización en Cerro Búfalo. A la izquierda, vetas, cúmulos y diseminados de enargita asociados ledge de cuarzo-alunita. A la derecha, mineralización de enargita asociada a clastos, matriz y cemento de una brecha hidrotermal con alteración cuarzo alunítica.

5.2 Modelo de alteración

Cerro Búfalo corresponde a un sistema epidermal de alta sulfuración caracterizado por la presencia de cuerpos *ledge*, estructuras silicatadas subverticales que se generan aprovechando estructuras, fisuras o regiones permeables, en los cuales la mineralogía dominante es un intercrecimiento de cuarzo y alunita. A partir de estos cuerpos, se genera una zonación lateral de la alteración, en la cual hacia el exterior la paragénesis mineral cambia a cuarzo-caolinita, y posteriormente a caolinita por sí sola. Algunos importantes otros depósitos epidermales de importancia que presentan estos patrones de zonación horizontal son Summitville (Bethke et al., 2005; Tsuruoka et al., 2016), Colquijirica (Bendezú & Fontboté, 2009), Konya (Hall et al., 2007), Dognan (Duan et al., 2022) y Pierina (Fifarek & Rye, 2005). Varios estudios han abarcado la génesis de esta distribución mineral (Knight, 1977; Hedenquist et al., 2000; Einaudi et al., 2003, Bethke et al., 2005), concluyéndose que surge a partir de una reacción irreversible de oxidación por el contacto del fluido rico en sílice y alunita con roca caja de composición andesítica.

En particular, dentro de los 750 metros abarcados por el perfil seleccionado en el presente trabajo pueden encontrarse 10 cuerpos de tipo *ledge*, los cuales poseen un espesor lateral de entre 5 y 25 metros. Hasta la profundidad de 1.150 m s.n.m., no es posible observar las raíces de estos cuerpos, las cuales en el modelo clásico de Lepanto y Summitville se acuñan hacia abajo hacia zonas sericíticas o ricas en pirofilita (Hedenquist et al., 2000). En cambio, lo que se observa en Búfalo son leves zonas remanentes de alteraciones presuntamente profundas: pirofilitica, sericítica y potásica (Ver figura 5.2), las cuales se observan siendo sobrepuestas por alteración argílica avanzada del ambiente epidermal. Que esto suceda, puede bien indicar un alto proceso de *telescoping* (Sillitoe, 1995; Hedenquist et al., 2000) en el cual ambos ambientes se encuentran fuertemente solapados, o representar el techo de una zona transicional hacia un sistema de tipo pórfido, como ocurre en Altar (Maydagán et al., 2013) o Lepanto (Claveria, 2001).

En Búfalo, la mineralización sulfurada se concentra principalmente asociada a la zona de cuarzo alunita. Múltiples trabajos (Knight, 1977; Bartos, 1989; Bendezú & Fontboté, 2003; Maydagán et al., 2013) han explicado esta relación estrecha entre la formación de alunita y enargita, concluyéndose que ambos minerales resultan beneficiados por un descenso en el pH y un aumento en la oxidación y actividad de azufre del fluido dentro de un rango de temperaturas de 200-300°C, produciéndose estos eventos de formación contemporánea. En Colquijirica (Bendezú & Fontboté,

2003) se ha demostrado una cristalización conjunta de ambas fases por medio de dataciones, mientras en Altar (Maydagán et al., 2013) se ha propuesto por la coincidencia de valores de $\delta^{34}\text{S}$.

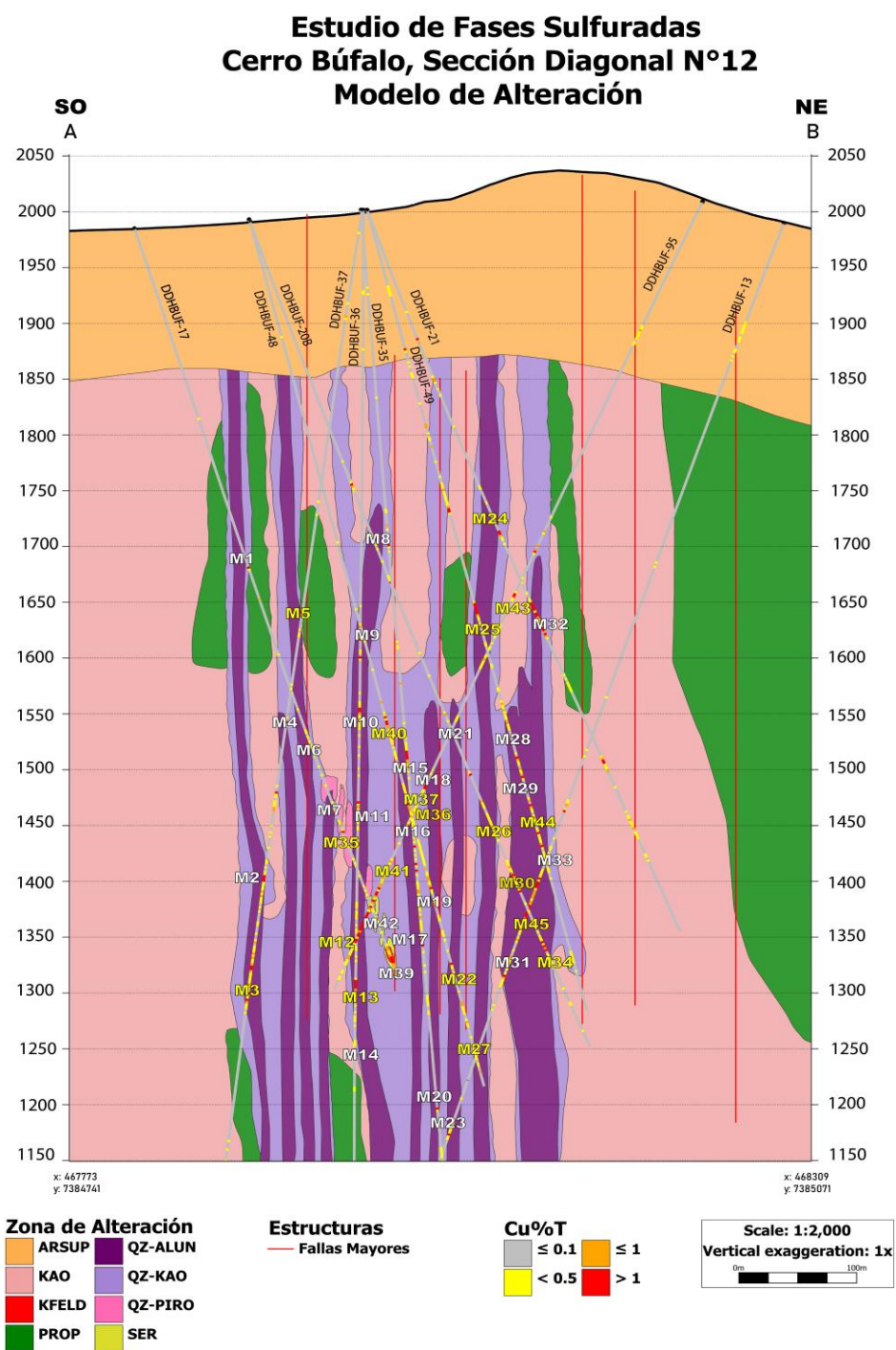


Figura 5.1. Modelo de alteración de la sección N°12 realizado en software Leapfrog. La nomenclatura abreviada de las alteraciones en la leyenda es la usada en el apartado 2.4 del texto. Se representan en el perfil todas las muestras revisadas (Anexo I), y en amarillo se marcan las observadas en corte transparente (Anexo II).

La aparición esporádica de dickita y pirofilita acompañando a pirita-enargita-alunita también está bien documentada en depósitos de alta sulfuración. La pirofilita puede formarse en desmedro de caolinita cuando el fluido está sobresaturado en sílice cerca de los 200-250°C (Knight, 1977), siendo esta fase distinta a la asociada a ambientes profundos, de mayor temperatura (Hedenquist et al., 2000). La dickita se acerca a la alunita y la enargita en cuanto a las condiciones óptimas de precipitación respecto a la acidez, fugacidad de oxígeno y temperatura del fluido (Bartos, 1989; Einaudi et al., 2003), y puede encontrarse ya sea formando su propia suite de alteración como en Colquijirica (Bendezú & Fontboté, 2009) y Tiegelognan (Yang et al., 2020), o bien dentro del mismo núcleo cuarzo-alunítico como en Guanaco (Jovic et al., 2021) y Dognan (Duan et al., 2022), siendo estos últimos casos los que más representan lo observado en Cerro Búfalo.

Otra particularidad de Cerro Búfalo consiste en la superposición que existe entre la zona silicificada que forma el conducto en el que se emplazan los *ledge* y la alteración cuarzo-alunitica, lo que difiere con el modelo clásico de Summitville (Stroffegen, 1987; Bethke et al., 2005), en el cual una zona central de cuarzo *vuggy* generado por una lixiviación ácida intensa grada lateralmente hacia el halo cuarzo-alunítico. En este sentido, Búfalo guarda más semejanza con depósitos como Lepanto (Claveria, 2001) y Guanaco (Jovic et al., 2021), donde la alunita y sílice han precipitado dentro de los cuerpos de cuarzo oqueroso, que actúan como huésped. Esto se explica, en ambos casos, debido a que la etapa que precipita esta asociación mineral (y por tanto, la asociada a los sulfuros), es ligeramente posterior al fluido de alta acidez inicial.

En Cerro Búfalo, tal como fue descrito en el apartado 4.4, las variaciones en la mineralogía de mena ocurren principalmente en la vertical, definidas por la profundidad. Sin embargo, algunos depósitos epitermales que se emplazan mediante *ledges* como Colquijirica (Bendezú & Fontboté, 2009) o Butte (Reed et al., 2013) presentan, además de una zonación lateral de la alteración, un cambio en la mineralogía de mena hacia la periferia, predominando fases de sulfuración más baja. En Búfalo, en general los halos caoliníticos poseen puntual mineralización de enargita-calcosina en vetas y pequeñas brechas hidrotermales, las cuales pueden estar asociadas ya sea a un evento contemporáneo a la mineralización dentro del sistema tipo *ledge* o ligeramente posterior, en un evento de aumento de la sulfuración, lo que explica que el caso contrario no ocurra. Se ha postulado también la influencia de estructuras menores que controlen la aparición de mineralización que hacia la periferia de los *ledges* (Por ejemplo, Ver Anexo 1, M36 y M37, Anexo 2, CT36 y CT37), aunque

desarrollar esta idea requeriría un modelo estructural y una revisión geotécnica de los sondajes más detallada.

La capa de alteración argílica supérgena que se sobrepone al sistema argílico avanzado sobre la cota 1.850 m s.n.m. es bastante característica en sistemas epitermales del norte de Chile. Se ha descrito que en su mayoría ocurren asociados a aguas superficiales calentadas por vapor, generándose coberturas resistentes a la erosión con hidroxidos de hierro, sílice de baja temperatura y alunita supérgena (Hedenquist et al., 2000).

5.3 Secuencia paragénética de sulfuros hipógenos

En base a las relaciones texturales, disposición espacial y comparando las observaciones realizadas con el comportamiento de los sulfuros en otros depósitos epitermales similares, es posible reconstruir la secuencia temporal en la cual estos se formaron e interpretar las condiciones de temperatura, pH, fugacidad de oxígeno y sulfuración del fluido en cada etapa. En el presente trabajo, se proponen al menos cuatro etapas diferentes: 1) etapa inicial de pirita, 2) etapa de sulfuración intermedia, 3) etapa de alta sulfuración y 4) etapa retrogradante, las cuales son descritas a continuación

5.3.1 Etapa inicial de pirita

Es posible reconocer una etapa temprana dominada por pirita de grano grueso subhedral a euhedral, mayormente diseminada, la cual temporalmente parece anterior a la mineralización de todas las demás fases sulfuradas, al ser intersectada, rodeada o rellenada en sus fracturas por calcopirita y bornita (o en algunos casos tenantita-enargita).

Podría teorizarse que esta etapa se asocie a un ambiente profundo, de tipo pórfido cuprífero; sin embargo, carece de asociación con sericita/anhidrita tardía, y no se observa su ocurrencia asociada a posibles vetillas de tipo B o D, que son los criterios más eficaces para reconocer el techo de estos sistemas (Sillitoe, 1999; Hedenquist et al., 2000; Einaudi et al., 2003). Tampoco es probable que se asocie a la etapa de formación del conducto silicatado bajo condiciones extremas de acidez, como ocurre en Guanaco (Jovic et al., 2021) y Summitville (Tsuruoka et al., 2016), dada la presencia puntual de óxidos de hierro (titanomagnetita y hematita). Con esto en consideración, la opción más plausible es que esta etapa de pirita represente un evento temprano del sistema epitermal, bajo condiciones relativamente oxidantes, alta acidez (lo que limitaría la abundancia de

hematita) y sulfuración intermedia, como ocurre en Tiegelognan (Yang et al., 2022) o Altar (Maydagán et al., 2013). Esto se justifica también por la estrecha relación entre estos granos de pirita con alunita fina y cuarzo secundario (hidrotermal) (Figura 5.3.1).

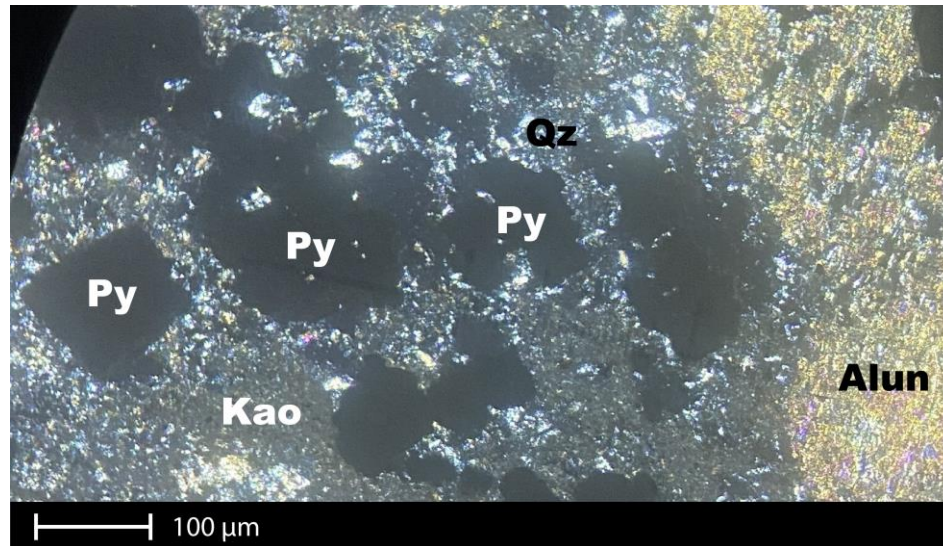


Figura 5.3.1. Pirita asociada a la etapa temprana en paragénesis con alunita, cuarzo secundario y caolinita.

5.3.2 Etapa de sulfuración intermedia

Temporalmente posterior a la etapa de pirita-alunita-cuarzo, se interpreta se desarrollan sulfuros y sulfosales de cobre característicos de ambientes de sulfuración intermedia, los cuales se reconocen en la sección estudiada principalmente a profundidades bajo los 1.450 m s.n.m. Esta etapa puede subdividirse en dos: la dominada por calcopirita-bornita y en la que predomina tenantita.

5.3.2.1 Etapa progradante de calcopirita-bornita

Fases tempranas de calcopirita y bornita, ocasionalmente acompañadas por esfalerita y pirita, se han descrito en varios depósitos epitermales a lo largo del mundo, como Lahoca (Takács et al., 2017), Butte (Einaudi et al., 2003), Altar (Maydagán et al., 2013), Tiegelognan (He et al., 2020; Yang et al., 2021), Dognan (Duan et al., 2022), Summitville (Bethke et al., 2005), La Mexicana (Pudack et al., 2009), Agua Rica (Franchini et al., 2011) y Valeriano (Sillitoe, 2016). En la gran mayoría de estos casos, esta etapa suele evolucionar hacia una fase mucho más importante de tenantita-enargita-calcosina-digenita-covelina.

Varios autores (Sillitoe 1999, Hedenquist et al., 2000, Einaudi et al., 2003) han propuesto que la presencia de esta paragénesis en zonas profundas de epitermales de alta sulfuración podría

representar un ambiente transicional desde un pórfido cuprífero. Dos ejemplos bastante claros de esto son La Mexicana (Pudack et al., 2011) y Bor (Klimentyeva et al., 2020), donde se observa una fase de calcopirita asociada tanto a vetillas de tipo A y B (asociadas al pórfido) como a cuerpos de cuarzo alunita (del epitermal). En Lahoca (Takács et al., 2017), la fase transicional se ha estudiado mediante microtermometría e inclusiones fluidas, reconociéndose condiciones que rondan los 280°C y $\log fS_2$ entre -11 y -9. Casos más complejos son el de Agua Rica (Franchini et al., 2011), donde el alto *telescoping* define una zona de calcopirita en la cual se solapan el halo de alteración argílico avanzado con el filico, o Tiegelognan (He et al., 2020), donde la bornita acompaña tanto a cuerpos sericíticos como aluníticos, en un rango amplio de pH y temperatura. Finalmente, ocurren casos en los cuales esta etapa epitermal no se presenta, observándose un cambio drástico entre la calcopirita-bornita del ambiente tipo pórfido y la mineralización de enargita-tenantita epitermal, como en Filo del Sol (Perelló et al., 2023) y Valeriano (Sillitoe, 2016).

El carácter transicional de esta paragénesis en Búfalo no puede establecerse sin realizar una campaña de sondajes profundos más completa que ayude a reconocer la ocurrencia (principalmente el tipo de vetillas) y la mineralogía de ganga que acompaña a estos sulfuros bajo la cota de 1.150 m s.n.m. Sin embargo, considerando temporalidad, profundidad y las propiedades del fluido que se interpretan para esta etapa, se presentan varias características que podrían apoyar esta idea.

La asociación de esta paragénesis con la tenantita es compleja, pues en la mayoría de los casos, es posible establecer que existe un desarrollo conjunto de los tres sulfuros, con intercrecimientos e inclusiones mutuas entre las fases, pero en otras, es evidente que la tenantita reemplaza a los sulfuros de esta etapa. Los depósitos que más similitudes guardan con Búfalo son Tiegelognan (Song et al., 2018; Yang et al., 2020), y Altar (Maydagán et al., 2013), en donde puede afirmarse que el cambio desde calcopirita-bornita a tenantita es gradual, y se define por un aumento en la fugacidad de oxígeno causado por la reacción del fluido con la roca caja, bajo condiciones de fugacidad de azufre poco fluctuantes.

5.3.2.2 Etapa progradante de tenantita

La fase de tenantita puede desarrollarse en Cerro Búfalo, ya sea asociada a la paragénesis profunda de calcopirita-bornita, o bien reemplazándola, así como relacionada directamente a la fase de enargita. Tomando esto en consideración, se puede establecer que la tenantita representa una interfase entre los ambientes de intermedia y alta sulfuración. En Tiegelognan (Song et al., 2018,

2022; He et al., 2022), la aparición de tenantita hacia profundidades más someras que la calcopirita-bornita se reconoce como un proceso gradual y continuo dentro del halo argílico avanzado, siendo un caso muy similar al de Búfalo. Lahoca (Takács et al., 2017) es otro depósito con este comportamiento, donde además se ha propuesto que esta etapa pudiese incluirse dentro de la paragénesis transicional desde el pórfido. Casos distintos son el de Summitville (Bethke et al., 2005; Tsuruoka et al., 2016), depósito en el cual la tenantita se restringe mayormente a la zona de calcopirita, y Valeriano (Sillitoe, 2016), donde aparece únicamente en la etapa de enargita.

El principal argumento para establecer el cambio gradual propuesto dentro de la evolución del fluido es textural, al observarse tenantita en intercrecimiento tanto con calcopirita-bornita-esfalerita como con enargita. El primer caso, tal como se mencionó en el apartado 5.3.2.1, puede ocurrir en un rango de fugacidad de azufre y fugacidad de oxígeno determinado, siendo este último el factor que al aumentar privilegia la sulfosal de cobre-arsénico sobre las otras fases (Maydagán et al., 2013; Ver Figura 5.3.2.2). Del mismo modo, los intercrecimientos de tenantita-enargita son comunes en depósitos epitermales de alta sulfuración (Einaudi et al., 2003), pudiendo coexistir ambas fases siguiendo la curva de equilibrio de fases propuesta (Ver figura 5.4.2). El cambio del sistema hacia la etapa de enargita, bajo condiciones de temperatura relativamente estables, es dependiente de la fugacidad de azufre y no de la oxidación del fluido (Ver figura 5.3.2.2). Otro factor clave de Cerro Búfalo es que la tenantita no se presenta por si sola, sino casi siempre acompañada por enargita, lo cual puede relacionarse a la sobreposición espacial de ambas etapas (Figura 5.3.2.1), en las cuales las condiciones de formación óptimas para la enargita desestabilizaron la fase anterior de tenantita, induciéndose así texturas de reemplazo.

De este modo, lo observado bajo la cota de 1.300 m s.n.m. en la sección estudiada correspondería a un fuerte solapamiento espacial entre las etapas de calcopirita-bornita, tenantita y enargita-calcosina. Considerando la probable continuidad de la primera paragénesis mencionada bajo la cota de 1.150 m s.n.m., y el dominio exclusivo de la última sobre los 1.500 m s.n.m., la hipótesis de una posición intermedia transicional para la tenantita en la vertical del yacimiento se hace bastante plausible.

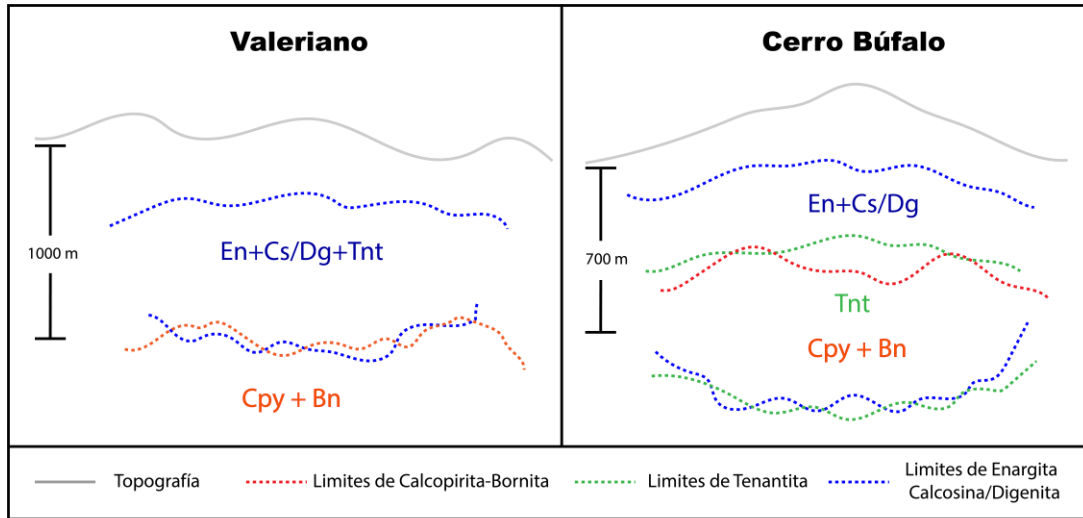


Figura 5.3.2.1. Diagrama comparativo entre el modelo de Sillitoe (2016) para Valeriano y el propuesto en este trabajo para Cerro Búfalo. En Valeriano, existe un cambio bien definido en la vertical entre la zona dominada por la paragénesis de alta sulfuración y las fases de sulfuración intermedia. En Búfalo, en cambio, las zonas se encuentran altamente solapadas. El comportamiento de la tenantita es también distinto, encontrándose en Búfalo como un horizonte transitorio, mientras en Valeriano se incluye dentro del dominio de la enargita como una fase menor.

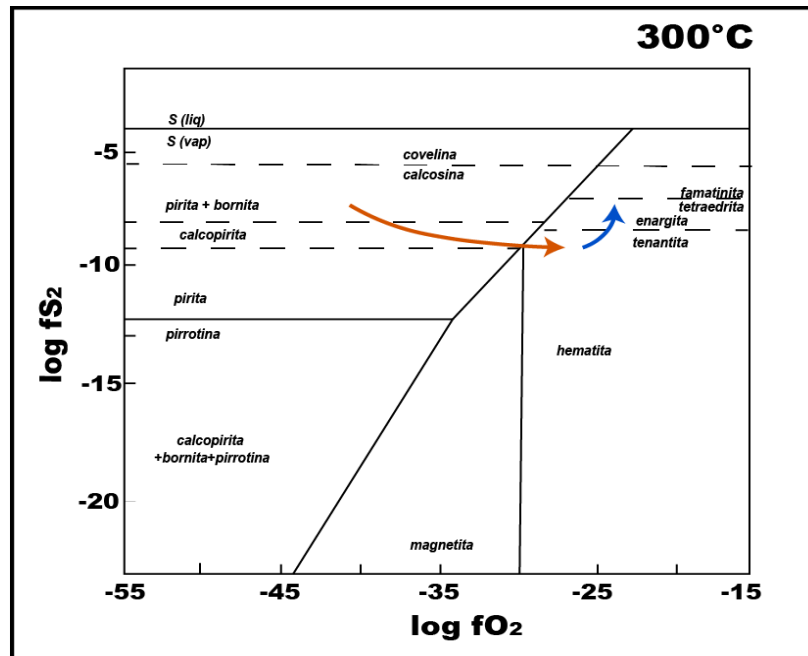


Figura 5.3.2.2. Diagrama de $\log fO_2$ (fugacidad de oxígeno) vs $\log fS_2$ (fugacidad de azufre), adaptado de Maydagán y colaboradores (2013), estandarizado a 300°C. Se representa con una flecha roja la curva interpretada para la transición desde calcopirita-bornita a tenantita, dominada principalmente por el primer factor, y con una flecha azul la transición desde la etapa de tenantita a la de enargita, definida principalmente por el segundo factor (Estado de sulfuración del sistema).

5.3.3. Etapa de alta sulfuración

La etapa de mineralización más importante de Cerro Búfalo se genera, tal como se comentó en el apartado 5.3.2, mediante una evolución del fluido desde la etapa profunda hacia condiciones de mayor sulfuración y oxidación, lo cual según se propone en varios trabajos (Knight, 1977; Einaudi et al, 2003; Sillitoe, 2010; Sälhstrom, 2018), se ve influenciado por la reacción del fluido con rocas caja volcánicas, las cuales, al estar previamente lixiviadas, poseen una baja capacidad de buffer. En contraste, existe la posibilidad de que esta etapa se vea beneficiada por mezcla con nuevos volátiles provenientes del ambiente profundo que aporten azufre al sistema (Duan et al., 2022).

En algunos depósitos, como Valeriano (Sillitoe et al., 2016) y Pierina (Fifarek & Rye, 2005), se describe la fase de enargita-calcosina/digenita como un evento genéticamente conjunto. Sin embargo, en el presente trabajo ambas etapas se describirán de forma separada, debido a la leve diferencia temporal de formación interpretada a partir del análisis textural.

5.3.3.1 Etapa de enargita

La enargita en Cerro Búfalo puede reconocerse tanto como una fase primaria, formándose directamente desde el fluido, como también reemplazando minerales de las etapas previamente descritas. En base a los criterios texturales definidos por Park y MacDiarmid (1981), algunas texturas de reemplazo que presenta la enargita sobre la tenantita, calcopirita, bornita y esfalerita son: desarrollo como masas irregulares que rellenan fracturas, formación de cristales de enargita con islas huéspedes de otras fases, generación de bordes, vetillas con fragmentos remanentes y crecimiento con bordes cóncavos hacia el huésped (Ver figura 5.3.3.2).

Depósitos importantes a nivel mundial en los que se observa que la mineralización avanza desde una fase de tenantita a una dominada por enargita son Summitville (Bethke et al., 2005; Tsuruoka et al., 2016), La Mexicana (Pudack et al., 2009) y Lahoca (Tákacs et al., 2017).

Una particularidad de Cerro Búfalo es el sobrecrecimiento que efectúa la enargita, generalmente con un hábito prismático subhedral a euhedral, sobre la tenantita, con hábito subhedral en el sistema cúbico a masiva. Otros depósitos en los cuales se han analizado texturas de sobrecrecimiento siguiendo esta secuencia son Altar (Maydagán et al., 2013) y Mt. Carlton (Sälhstrom, 2018), aunque no se describen observaciones similares respecto a este contraste en el hábito entre las etapas.

La presencia de famatinita en esta etapa se interpreta como tardía dentro de la misma. Esto se justifica en la idea de que bajo condiciones estables de temperatura y fugacidad de oxígeno, la famatinita se beneficia sobre la enargita con un ligero aumento en la sulfuración (Pudack et al., 2009; Maydagán et al., 2013).

La escasa luzonita en el depósito está probablemente asociada a fluctuaciones puntuales de temperatura dentro del sistema, generándose comúnmente en solución sólida con enargita. Según se observa texturalmente, esta fase se reconoce ligeramente más tardía que su polimorfo de alta temperatura, lo cual coincide con lo observado en Summitville (Tsuruoka et al., 2016).

5.3.3.2 Etapa de calcosina/digenita

Esta etapa tardía se asocia al punto de sulfuración más elevado del sistema. Varios depósitos epitermales de importancia como Bor (Klimentyeva et al., 2020), Butte (Reed et al., 2013), Colquijirica (Bendezú & Fontboté, 2009) y Filo del Sol (Perelló et al., 2023) presentan una etapa de calcosina-digenita posterior a la de tenantita-enargita, de forma similar a Cerro Búfalo.

En Búfalo, si bien la mayor parte de la calcosina y digenita se encuentra ligada a los *ledge* con alteración argílica avanzada, puede también encontrarse en zonas caoliníticas, asociada a vetillas de sílice-dickita. Esta asociación paragenética se ha estudiado por varios autores (Einaudi et al., 2003; Duan et al., 2022), concluyéndose que la calcosina hipógena ligada a cuerpos de alunita + dickita es “anómala”, al asociarse a temperaturas mayores (250-300°C) y condiciones de acidez-sulfuración ligeramente menores a las cuales en general se mantiene como una fase estable.

Estas fases pueden aparecer ya sea en conjunto con enargita, formando agregados anhedrales, o en una etapa ligeramente posterior, presentando texturas de reemplazo respecto a esta, como bordeándola, inyectándose en fracturas, a modo de vetillas con bordes irregulares que intersectan los cristales y desarrollándose en las direcciones cristalográficas principales (exfoliación) de estos (Park & Mac Diarmid, 1981). Del mismo modo, pueden observarse reemplazando a las fases profundas de sulfuración intermedia: tenantita, calcopirita y bornita.

La distribución casi total que se observa de las menas de muy alta sulfuración en la vertical de Cerro Búfalo, reconociéndose en el presente estudio entre los 1.800 y 1.150 m s.n.m., puede también correlacionarse con la presencia de más de un evento. En Tiegelognan (Yang et al., 2021) y La Mexicana (Pudack et al., 2009) se observa una fase de calcosina profunda que se desarrolla

justo hacia el final de la etapa de sulfuración intermedia, previo a la enargita. Sin embargo, en Búfalo no se han detectado suficientes evidencias texturales para diferenciar más de un evento. Sumado a esto, estudios recientes (Soorani et al., 2022) proponen que este tipo de procesos de reemplazo, descritos como “enriquecimiento hipógeno”, pueden ocurrir a variadas profundidades dentro de un mismo depósito, dependiendo de las condiciones de estabilidad de las fases

La digenita en Búfalo se presenta en volúmenes reducidos y siempre genéticamente asociada a calcosina. Un caso similar ocurre en Bor (Klimentyeva et al., 2020), donde se ha propuesto que la digenita, de sulfuración ligeramente más elevada, se concentra principalmente en la zona central de los cuerpos; sin embargo, en Búfalo no se ha podido comprobar un patrón que describa su distribución. A su vez, la asociación calcosina-digenita en el depósito se observa casi siempre a modo de soluciones sólidas, siendo difícil separar ambos minerales en el estudio microscópico. Procesos de miscibilidad complejos, que involucran transiciones graduales con múltiples fases intermedias y cambios en la estructura cristalográfica se han descrito para estos minerales (Chaudhari et al., 2021; Ver figura 5.3.3.1), lo que justifica la observación de estos sulfuros en muchos casos como una mezcla homogénea a pesar de tener características distintas.

La covelina, por su parte, es aún más escasa, observándose solo en algunas muestras cerca de la cota 1.350 m s.n.m., siempre dentro de agregados de calcosina-digenita, probablemente vinculada a zonas en las cuales el fluido alcanza un estado de sulfuración muy elevado.

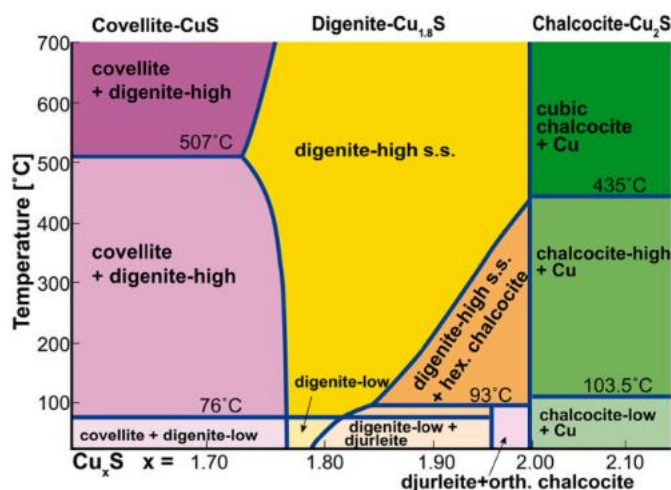


Figura 5.3.3.1. Diagrama de fases (Chaudhari et al., 2021) entre calcosina, digenita y covelina respecto a la temperatura. Como puede observarse, se definen una gran cantidad de interfaces y mezclas entre dichos minerales.

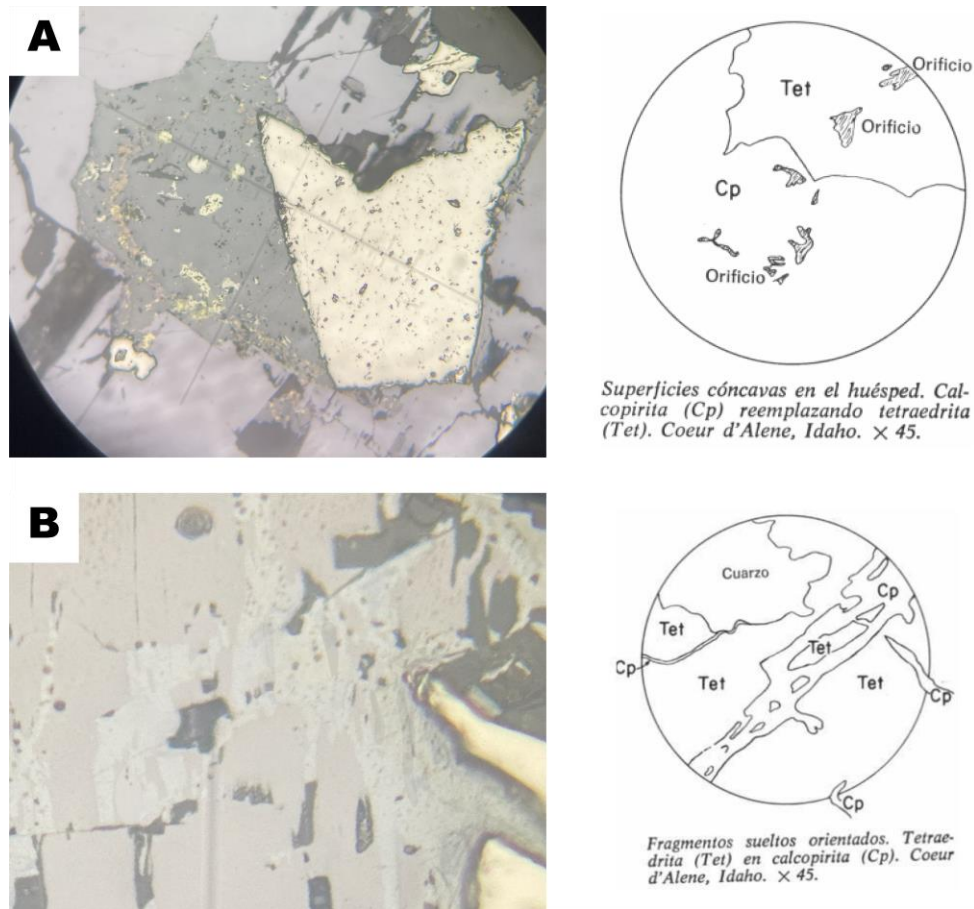


Figura 5.3.3.2. Comparativa entre texturas observados en la etapa de alta sulfuración de Cerro Búfalo y las evidencias de reemplazo definidas por Park & Mac Diarmid (1981). A) Enargita generando superficies cóncavas hacia la tenantita que reemplaza. B) Calcosina reemplazando enargita en dirección de la exfoliación, con fragmentos remanentes orientados dentro de ella.

5.3.4 Etapa retrogradante

Los procesos retrogradantes (Definidos por Bartos, 1989) se refieren a todos aquellos que ocurren en los depósitos de metales bases luego de una etapa de sulfuración más elevada, en el cual nuevas fases se generan mediante un descenso de factores como la temperatura, fugacidad de azufre y fugacidad de oxígeno. En Cerro Búfalo, esto se manifiesta mediante el desarrollo de esfalerita, tenantita, calcopirita y bornita sobre la cota de 1.450 m s.n.m., reemplazando enargita y calcosina. Fenómenos similares ocurren en depósitos importantes del mundo como Lepanto (Claveria, 2001), La Pepa (Muntean & Einaudi, 2001) y Furtei (Fadda et al., 2005).

Se evidencia la posterioridad de esta fase con respecto a la de alta sulfuración por reemplazos que consisten en bordes de tipo *coating*, en los cuales cristales de enargita se ven completamente

envueltos por anillos o “coronas” de esfalerita-tenantita o calcopirita (Figura 5.3.4), caso muy similar al descrito en Mt. Carlton (Sahlström, 2018). Se reconocen también pseudomorfismos de tenantita sobre enargita, además de generarse la primera preferencialmente desde las fracturas en los cristales, de forma similar a lo que ocurre en Cerro del Pasco (Jobin, 2004) y Lahoca (Takács et al., 2017). La bornita de la etapa retrogradante se asocia principalmente a calcosina y digenita, tal como ocurre en Bor (Klimentyeva et al., 2020), generándose masivamente sobre dichos sulfuros desde los bordes, junto a menor calcopirita.

Se reconoce la presencia de luzonita dentro de esta paragénesis, en lo que puede ser un proceso continuo con respecto a la etapa HS, en la cual era tardía. Un patrón similar se describe en Furtei (Fadda et al., 2005) y Lepanto (Claveria, 2001), donde se distingue que la luzonita de la fase de enargita es euedral a subhedral, mientras la de la etapa retrogradante es fina anhedral.

Esta etapa en Cerro Búfalo, salvo contadas excepciones, contiene un bajo volumen de sulfuros, además de no presentarse en cuerpos potentes dentro de los *ledges* cuarzo-aluníticos, sino espacialmente restringida a ciertos tramos de escasos metros. Esto puede representar que el fluido en este punto, al ser remanente de la etapa de sulfuración elevada, o bien al sufrir procesos de mezcla con fluidos superficiales, pierde potencial mineralizador. Distinto es el caso de Lepanto (Claveria, 2001) o Lahóca (Takács et al., 2017), donde la etapa retrograda es muy importante y en la cual se concentran las leyes más elevadas de oro, asociado a telururos, lo cual tampoco ocurre en Cerro Búfalo, quedando el oro libre en zonas más someras.

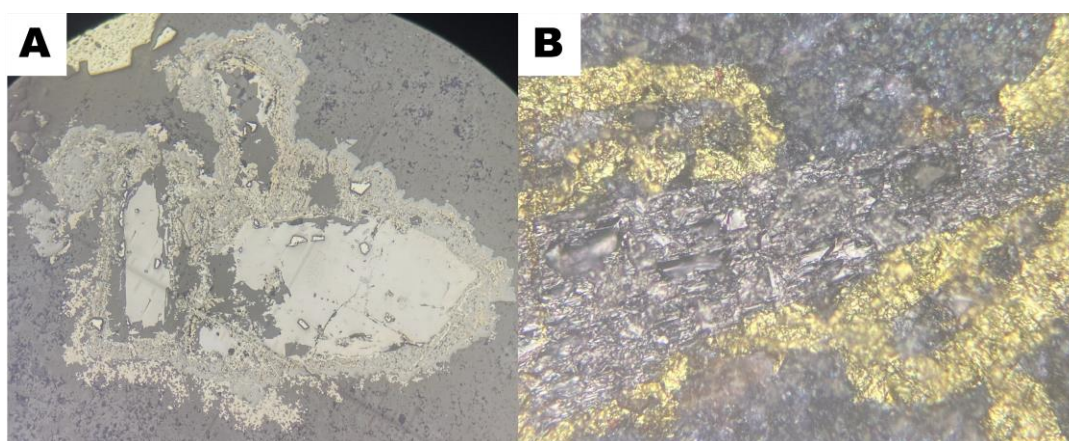


Figura 5.3.4. Característica textura de reemplazo en anillos de la fase retrogradante de sulfuración sobre la enargita. A) Esfalerita, luzonita y tenantita bordeando enargita. B) Calcopirita envolviendo enargita.

5.4 Modelo de mineralización

La figura 5.4.1 sintetiza mediante un modelo a escala 1:2.000 las observaciones realizadas en la sección N°12 de Cerro Búfalo. El depósito puede describirse como un yacimiento que avanza desde un sistema de sulfuración intermedia (IS) a uno de alta (HS). Si bien la etapa IS se observa principalmente por debajo de los 1.400 m s.n.m., la etapa de alta sulfuración se superpone sobre ella, generando bajo esa cota una zona en la cual coexisten tenantita, bornita y calcopirita con enargita, calcosina y digenita. Sobre la profundidad mencionada anteriormente domina principalmente la paragénesis HS, pero pueden de forma puntual reconocerse cuerpos de sulfuración intermedia formados durante el proceso retrogrado mencionado en el apartado 5.3, aunque estos son acotados y no se extienden considerablemente dentro de los *ledges*.

En la figura 5.4.2 puede observarse la curva de evolución interpretada para el fluido mineralizador en Cerro Búfalo. Comienza desde la pirita, moviéndose luego hacia la etapa dominada por calcopirita con un alza progresiva de la fugacidad de azufre. Se interpreta, en este punto, que la evolución transita cerca de la intersección entre la línea de transición de calcopirita a bornita y de tenantita a enargita, dada la paragénesis que puede ocurrir entre estas fases. Posteriormente, el fluido avanza hacia la etapa de enargita y sucesivamente alcanza la etapa de calcosina-digenita, llegando a su cúspide de sulfuración con la covelina. A partir de este punto, la fugacidad de azufre decae, generándose una evolución inversa a la inicial, desarrollándose la fase retrogradante de tenantita y finalmente la de calcopirita-bornita. Cabe destacar que esta interpretación genética se realiza con la premisa de un descenso constante de temperatura en el sistema, lo que debe ser corroborado con estudios más detallados (Por ejemplo, de inclusiones fluidas).

Finalmente, la figura 5.4.3, adaptada del modelo clásico de Bartos (1989), muestra como lo que ocurre en Cerro Búfalo puede separarse en una serie progradante, en la cual los minerales se generan sucesivamente con un aumento en factores clave como la sulfuración, acidez y fugacidad de oxígeno, que alcanza su cúspide con la etapa de calcosina-digenita-covelina, para luego pasar a una serie retrogradante, donde los factores mencionados anteriormente decaen.

Modelo de Distribución de Fases Sulfuradas Sección Diagonal N°12, Yacimiento Cerro Búfalo

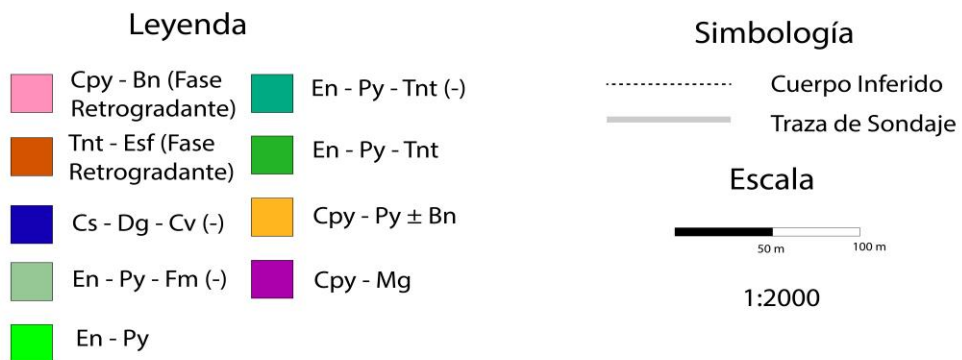
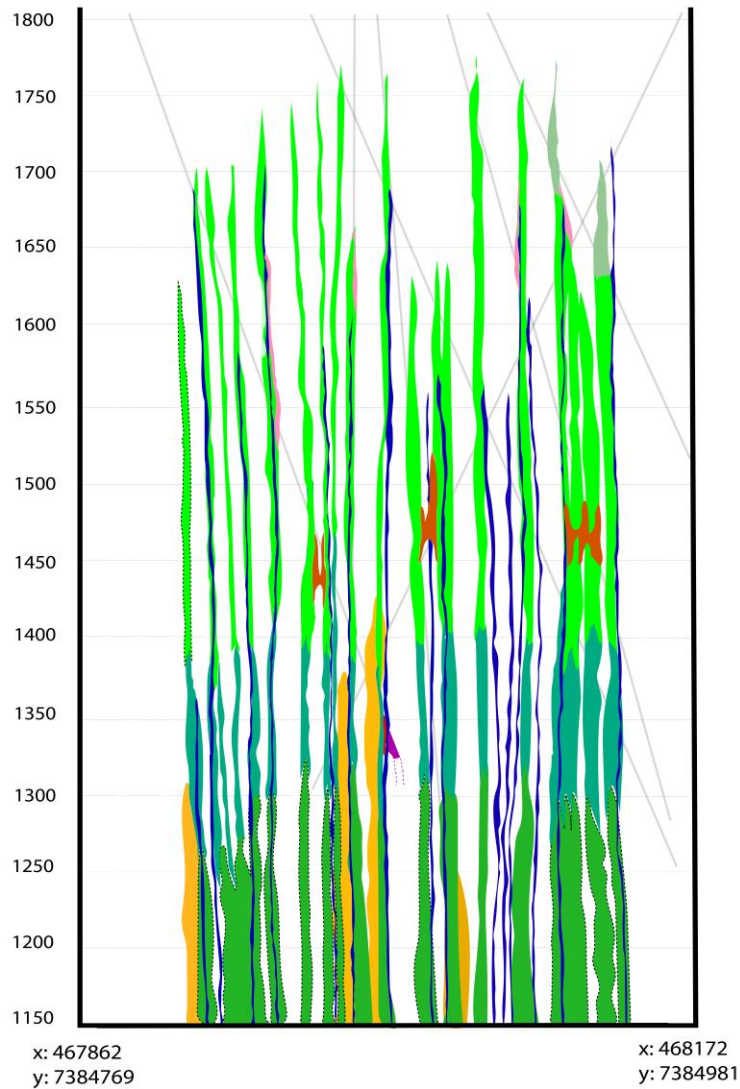


Figura 5.4.1. Modelo de mineralización de la sección N°12 en Cerro Búfalo en escala 1:2.000.

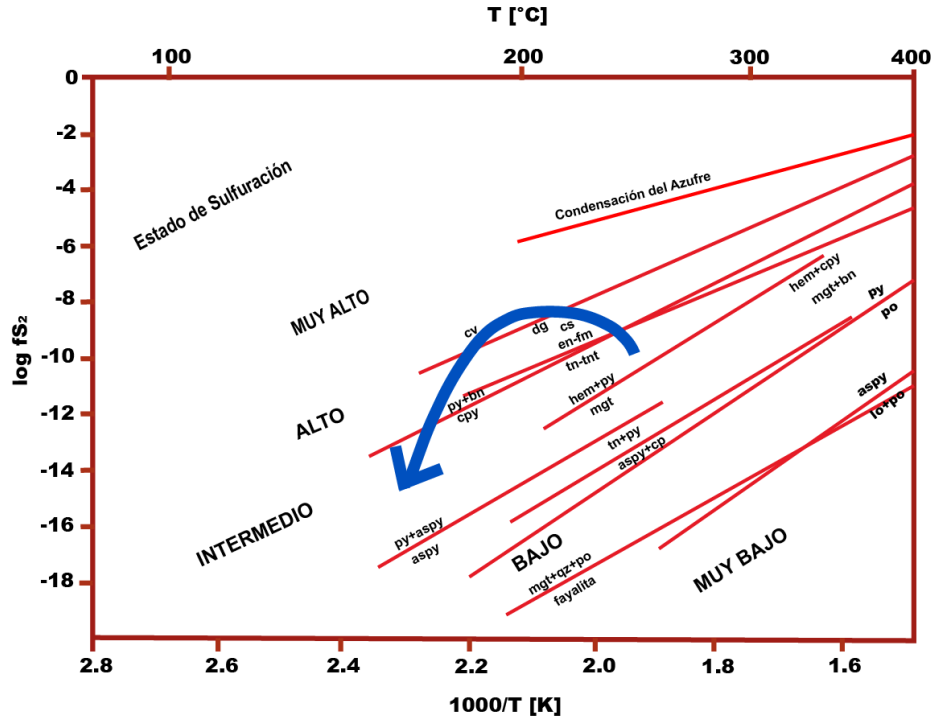


Figura 5.4.2. Diagrama de fases (Adaptado de Einaudi et al., 2003), en el cual se describe la evolución interpretada para la mineralización en Cerro Búfalo con respecto a la temperatura y el estado de sulfuración del sistema. Nomenclatura: py=pirita, cpy=calcopirita, bn=bornita, tnt=tenantita, td=tetraedrita, en=enargita, fm=famatinita, cs=calcosina, dg=digenita, cv=covelina.

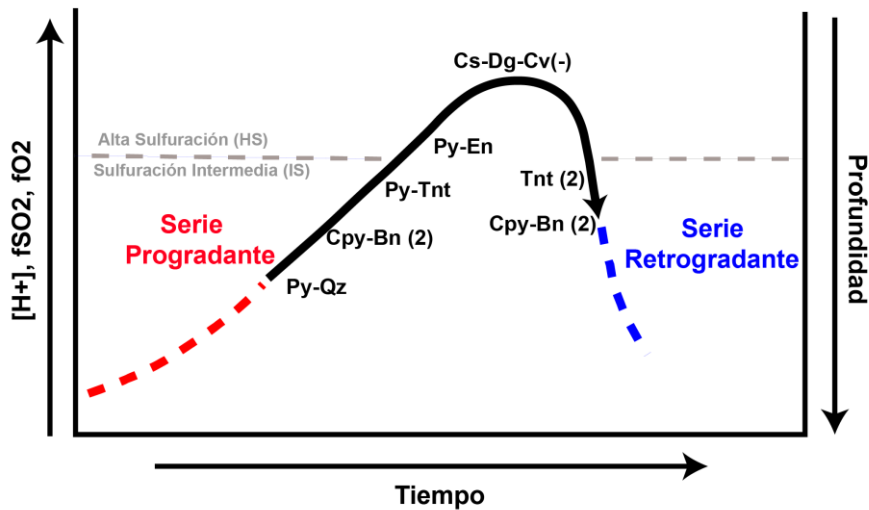


Figura 5.4.3. Diagrama de evolución temporal respecto a acidez, fugacidad de azufre y fugacidad de oxígeno, que muestra la secuencia interpretada para Cerro Búfalo (Adaptado de Bartos, 1989). Las nomenclaturas de minerales son las de la figura 5.4.2

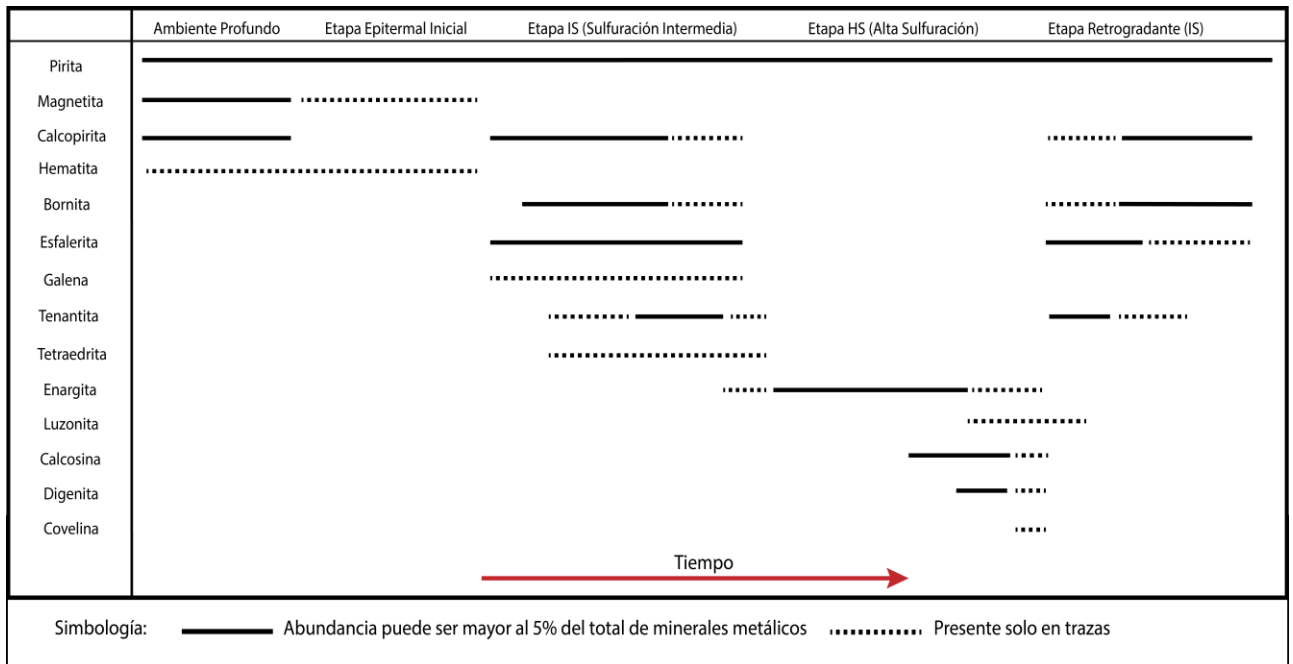


Figura 5.4.4. Cuadro de evolución paragenética de minerales metálicos en Cerro Búfalo, separado según las etapas definidas en el apartado 5.3

6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones generales

- Cerro Búfalo corresponde a un yacimiento epitermal que evoluciona desde un sistema de sulfuración intermedia (IS) en profundidad a uno de alta sulfuración (HS) hacia zonas más someras.
- La geología de Cerro Búfalo consiste en rocas estratificadas volcánicas a volcanosedimentarias, de composición dacandesítica, las cuales son intruidas por pórfidos dacíticos, brechas hidrotermales y brechas freáticas.
- La alteración en Cerro Búfalo se desarrolla a partir de estructuras silicatadas denominadas *ledges*. Estas se forman mediante un evento de alta acidez, generando cuarzo oqueroso o *vuggy*, en el cual el fluido aprovecha fisuras, fallas u otros rasgos estructurales.
- En el núcleo de los *ledges* se desarrolla alteración cuarzo-alunítica, la cual gradúa lateralmente hacia un halo cuarzo alunítico y posteriormente un halo caolinítico, producto de reacciones de neutralización del fluido en contacto con la roca caja.
- Pequeñas zonas con remanentes de alteración cuarzo-pirofilita, sericítica y potásica (Esta última con mineralización de calcopirita-magnetita), posiblemente pertenecientes a un ambiente de tipo pórfido cuprífero, son reconocidas bajo la cota 1.450 m s.n.m. Su presencia puede relacionarse ya sea un proceso de alto *telescoping*, en el cual el sistema epitermal se superpuso a ellas, o bien representar el comienzo de una zona transicional hacia el ambiente profundo.
- Las estructuras principales definidas durante las primeras campañas de exploración por parte de SQM se correlacionan con el emplazamiento de pórfidos y brechas. Sin embargo, no logran describir la ubicación de los cuerpos *ledge* ni el emplazamiento de la mineralización.
- La ocurrencia de la mineralización en Cerro Búfalo es en vetas, vetillas, cúmulos, diseminada y asociada a brechas hidrotermales. Mayoritariamente se presenta dentro de los cuerpos *ledge*, aunque puede aparecer menormente en los halos externos.
- La enargita es la mena de cobre principal del depósito y se observa en estrecha relación con pirita, alunita, dickita y pirofilita.
- Entre las cotas 1.450 y 1.150 m s.n.m., la mineralización consiste en pirita, calcopirita, bornita, tenantita, esfalerita, enargita y calcosina. Las evidencias texturales determinan que un evento

de pirita subhedral gruesa es seguido por la calcopirita y bornita. Posteriormente, se desarrolla tenantita siguiendo un aumento en la fugacidad de oxígeno. Los sulfuros previamente mencionados son superpuestos por enargita-calcosina, como parte de una etapa de mayor sulfuración (HS).

- Sobre la cota de 1.450 m s.n.m., las fases sulfuración intermedia (calcopirita, bornita y tenantita) que aparecían en profundidad ya no están presentes, siendo los sulfuros principales enargita, calcosina/digenita y pirita. Sin embargo, puntualmente puede observarse el desarrollo de una nueva etapa de calcopirita-bornita-tenantita-esfalerita, más tardía, que reemplaza a la etapa de alta sulfuración.
- La secuencia interpretada para la evolución de la mineralización sulfurada en Búfalo indica una serie progradante, marcada por un ascenso de la sulfuración y fugacidad de oxígeno, que alcanza su cúspide en la etapa de calcosina-digenita-covelina, para luego pasar a una serie retrogradante, donde los factores mencionados decrecen.
- La etapa retrogradante de Cerro Bufalo es bastante reducida en cuanto al volumen de sulfuros observado y la distribución de estos.
- En el presente estudio, no se reconocieron telururos-bismutatos de oro ni oro ocluido en sulfuros, por lo cual, sumado a la compleja distribución de las leyes dentro de los *ledges*, no es posible asociarlo a alguna de las etapas de mineralización mencionadas anteriormente.

6.2 Recomendaciones

Cerro Búfalo es aún un depósito en exploración. De forma contemporánea a la elaboración de este documento, se desarrolla una campaña de sondajes profundos, con la cual se podrá complementar el presente documento considerando también los procesos que operan bajo la cota de 1150 m s.n.m. Algunos estudios complementarios a las observaciones descritas en este trabajo que podrían ayudar a comprender de mejor manera el yacimiento se detallan a continuación.

- Es vital generar un nuevo modelo estructural, que considere estructuras menores, orientación de vetillas, parámetros geotécnicos y variabilidad de estos factores tridimensionalmente en el depósito. Este trabajo puede ser clave para encontrar de forma definitiva el trend estructural de los *ledges* y reconocer en que medida las estructuras menores pueden controlar la mineralización hacia los halos externos, lo cual puede ayudar a sumar tonelaje al modelo económico, además de representar un nuevo proxy de exploración hacia las zonas periféricas.

- La pirita es casi omnipresente en el depósito, por lo cual puede utilizarse para estudiar diferencias entre el posible ambiente profundo, de tipo pórfido cuprífero, y el ambiente epitermal. Sykora y colaboradores (2018), plantean un método basado en elementos traza, concluyendo que la pirita epitermal se encuentra enriquecida en As, Mo, Ag, Sb, Au y Tl. En cambio, la pirita asociada a pórfidos concentra Co, Ni y Se.
- Maydagán y colaboradores (2013) proponen el análisis de valores isotópicos de $^{34}\delta\text{S}$ como un mecanismo útil para distinguir eventos de mineralización asociados a al pórfido cuprífero con respecto al epitermal de alta sulfuración asociado a este. En Altar, Argentina, el valor de enargita asociada a los *ledges* es cercano a -5, mientras la enargita y tenantita presentes en vetas transicionales de tipo E, justo en la transición hacia el halo filico, es cercano a -3. En Búfalo, reconocer este tipo de variaciones significativas en la vertical pueden ser un buen vector de búsqueda hacia un ambiente profundo mineralizado.
- En el depósito de Dognan, China (Duan et al., 2022) se ha utilizado microtermometría en inclusiones fluidas, detectando las condiciones de salinidad y temperatura en las cuales precipitaron las principales fases sulfuradas, además de los minerales de ganga que las acompañan. En base a esto, se desarrolla un modelo termodinámico en el cual se distinguen las condiciones del sistema epitermal con respecto al pórfido. En Búfalo, esto podría aplicarse en minerales que estén presentes tanto en zonas someras como profundas, como la pirita, calcopirita y bornita.
- En La Mexicana, Pudack y colaboradores (2009) utilizan el análisis microscópico de inclusiones fluidas, sumado a imaginería de cátodo-luminiscencia, para reconstruir las características del fluido y las concentraciones de metales en este durante las distintas etapas de la mineralización. Esta puede ser una herramienta clave para comprender el comportamiento del oro y la plata en Búfalo, los cuales hasta el momento no han podido asociarse a una etapa específica dentro de la evolución del sistema, ni se han detectado patrones que describan su distribución.

REFERENCIAS

- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K., Muñoz, J., Roca, E., Chong, G. (2008). *The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko*. Journal of Structural Geology. Volume 30, Pages 1520-1539. ISSN 0191-8141.
- Bartos, P. (1989). *Prograde and retrograde base metal lode deposits and their relationship to underlying porphyry copper deposits*. Economic Geology, v. 84, p. 1671–1683.
- Bendezú, R., Fontboté, L., and Cosca, M. (2003). *Relative age of Cordilleran base metal lode and replacement deposits, and high sulfidation Au-(Ag) epithermal mineralization in the Colquijirca mining district, central Peru*. Mineralium Deposita, v. 38, p. 683–694.
- Bendezú, R. & Fontboté, L. (2009). *Cordilleran Epithermal Cu-Zn-Pb-(Au-Ag) Mineralization in the Colquijirca District, Central Peru: Deposit-Scale Mineralogical Patterns*. Economic Geology. 104. 905-944. 10.2113/gsecongeo.104.7.905.
- Bethke, P., Rye, R., Stoffregen, R., Vikre, P. (2005) *Evolution of the magmatic-hydrothermal acid-sulfate system at Summitville, Colorado: integration of geological, stable-isotope, and fluid-inclusion evidence*. Chemical Geology, Volume 215, Issues 1–4, Pages 281-315, ISSN 0009-2541.
- Boric, R., Díaz, F., MaksaeV, V. (1990). *Geología y yacimientos metalíferos de la región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín 0020-3939 N° 40. Santiago.
- Bulnes, A. (2013). *Alteración cuarzo-sericita en yacimiento tipo pórfido cuprífero: estudio mineralógico, litogeoquímico y termodinámico en mina Radomiro Tomic, distrito Chuquicamata*. Tesis de Magíster. Universidad de Chile.
- Castillo, J., Ocajo, C., Pon Y., Valencia, E. (2020). *Reporte de Campaña de Sondajes Diamantinos 2019-2020, Etapa de Perfil I, Proyecto Cerro Búfalo, Baquedano, Región de Antofagasta*. Gerencia de Exploraciones Metálicas SQM. Antofagasta.
- Chang, Z., Hedenquist, J., White, N., Cooke, D., Roach, M., Deyell, C., Cuison, A. (2011). *Exploration tools for linked porphyry and epithermal deposits: Example from the Mankayan intrusion-centered Cu-Au district, Luzon, Philippines*. Economic Geology, 106(8), 1365-1398.
- Chaudhari, A., Webster, N., Xia, F., Friedrich, A., Ram, R., Etschmann, B. (2021). *Anatomy of a complex mineral replacement reaction: Role of aqueous redox, mineral nucleation, and ion transport properties revealed by an in-situ study of the replacement of chalcopyrite by copper sulfides*. Chemical Geology. Volume 581. ISSN 0009-2541.
- Claveria, R. (2001). *Mineral Paragenesis of the Lepanto Copper and Gold and the Victoria Gold Deposits, Mankayan Mineral District, Philippines*. Resource Geology. Volume 51, Issue 2, p. 97-106.
- COCHILCO. (2016). *Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera*. Registro Propiedad Intelectual © N° 266968. En www.cochilco.cl
- Cornejo, P. (2021) *Estudio petrográfico y calcográfico Proyecto Bufalo N°1 a 8*. Gerencia de Exploraciones Metálicas SQM (Informe Inédito). Antofagasta.



- Duan, G., Wu, C., Baker, M., Qi, J., Xu, C., & Zhang, L. (2022). *Evolution and genesis of hydrothermal fluids for the Cretaceous Dongnan Cu deposit, Zijinshan ore district (SE China)*. *Ore Geology Reviews*, 144, 104844.
- Einaudi, M., Hedenquist, J. & Inan, E. (2003). *Sulfidation State of Fluids in Active and Extinct Hydrothermal Systems: Transitions from Porphyry to Epithermal Environments*. En *Volcanic, geothermal and ore-forming fluids*. Society of Economic Geologists. Special Publication 10, 285–314.
- Fadda, S., Fiori, M., Grillo, S. (2005). *Chemical variations in tetrahedrite - tennantite minerals from the Furtei epithermal Au deposit, Sardinia, Italy: Mineral zoning and ore fluids evolution*. Bulgarian Academy of Science. IGCP Project 486, 2005 Field Workshop.
- Fifarek, R., & Rye, R. (2005). *Stable-isotope geochemistry of the Pierina high-sulfidation Au–Ag deposit, Peru: influence of hydrodynamics on (SO₄)₂–H₂S sulfur isotopic exchange in magmatic-steam and steam-heated environments*. *Chemical Geology*, Volume 215, Issues 1–4. Pages 253-273. ISSN 0009-2541.
- Franchini, M., Impiccini, A., Lentz, D., Ríos, F., O'Leary, S., Pons, J., Schalamuk, A. (2011) *Porphyry to epithermal transition in the Agua Rica polymetallic deposit, Catamarca, Argentina: An integrated petrologic analysis of ore and alteration parageneses*. *Ore Geology Reviews*. Volume 41, Issue 1, Pages 49-74. ISSN 0169-1368.
- Gardeweg, M., Pino, H., Ramírez, C., Davidson, J. (1994). *Mapa Geológico del área de Imilac y Sierra Almeida, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo N°7. Santiago.
- Hall, D., Foster, R., Yildiz, B., Redwood, S. (2007). *The Inlice High-sulphidation Epithermal Gold Discovery: Defining a Potential New Gold Belt in Turkey*. *Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting, Dublin 2007*.
- He, W., Lin, B., Wang, Q., Yang, H., & Song, Y. (2021). *Sulphide geochemistry of the superlarge Tiegelongnan Cu (Au) deposit in Tibet, China: Implication for the mineralization process*. *Geological Journal*, 56(8), 4349–4365.
- Hedenquist, J., Arribas, A., & Gonzalez-Urien, E. (2000). *Exploration for Epithermal Gold Deposits*. *Reviews in Economic Geology*. 13. 245-277.
- Jobin, Y. (2004). *High sulfidation enargite-pyrite veins at Cerro de Pasco, Peru. A mineralogical study of ore and alteration minerals and an infra-red fluid inclusion study on enargite*. Tesis de Magister. Département de Minéralogie, Université de Genève. 139 p.
- Jovic, S., Páez, G., Galina, M., Guido, D., Permuy Vidal, C., López, L., & Kasaneva, S. (2021). *Caracterización estructural del sistema de ledges y clavos mineralizados del sector Cachinalito, Mina Guanaco, Región de Antofagasta, Chile*. *Andean geology*, 48(1), 110-124.
- Klimentyeva, D., Driesner, T., von Quadt, A. (2020). *Silicate-replacive high sulfidation massive sulfide orebodies in a porphyry Cu-Au system: Bor, Serbia*. *Miner Deposita* 56, 1423–1448
- Marinovic, N., Cortés, J., García, M. (1996) *Estudio geológico regional de la zona comprendida entre Sierra del Buitre y Pampa San Román*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe Registrado N°008. Santiago.

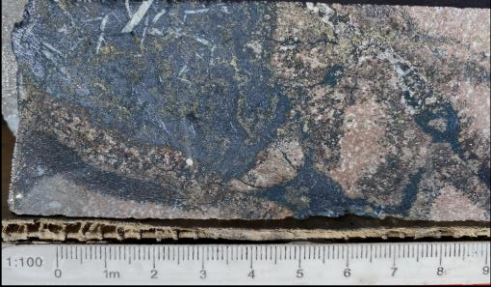
- Marinovic, N., García, M. (1999). *Hoja Pampa Unión, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N°33. Santiago.
- Marinovic, N. (2007). *Carta Oficina Domeyko, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 105: 41 p. Santiago.
- Maydagán, L., Franchini, M., Lentz, D., Pons, J., & McFarlane, C. (2013). *Sulfide composition and isotopic signature of the Altar Au-Cu deposit, Argentina: Constraints on the evolution of the porphyry-epithermal evolution*. The Canadian Mineralogist, 51(6), 813–840.
- Montaña, J. (1976). *Estudio geológico de la zona de Caracoles y áreas vecinas, con énfasis en el sistema Jurásico, provincia de Antofagasta, II Región, Chile*. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile.
- Mpodozis, C., Marinovic, N., Smoje, I.; Cuitiño, L. (1993a). *Estudio geológico-estructural de la Cordillera Domeyko, entre la Sierra Limón Verde y Sierra Mariposas, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería. IR-93-04: 281 p. Santiago.
- Mpodozis, C., Arriagada, C., Basso, M., Roperch, R., Cobbold, P., Reich, M. (2005). *Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: Implications for the tectonic evolution of the Central Andes*. Tectonophysics 399 (1): 125-154.
- Münchmeyer, C., & Valenzuela, D. (2009). *Telégrafo: Un pórfido de Cu-Au-Mo en etapa de exploración avanzada en el Distrito Centinela*. XII Congreso Geológico Chileno. Santiago.
- Muntean, J., & Einaudi, M. (2001). *Porphyry-Epithermal Transition: Maricunga Belt, Northern Chile*. Economic Geology, 96, 743-772.
- Niemeyer, H., Berríos, H., Urrutia, C. (2000). *La Falla Sierra de Varas al Suroeste del Salar de Punta Negra*. Congreso Geológico Chileno, No. 9, Actas 2: 617-620. Puerto Varas.
- Park, C., MacDiarmid, R. (1981). *Yacimientos Minerales*. Editorial Omega. p. 102-124. ISBN: 84-282-0630-9.
- Perelló, J., Sillitoe, R., Rossello, J., Forestier, J., Merino, G., Charchaflíe, D. (2023). *Geology of Porphyry Cu-Au and Epithermal Cu-Au-Ag Mineralization at Filo del Sol, Argentina-Chile: Extreme Telescoping During Andean Uplift*. Economic Geology 2023. 118 (6): 1261–1290.
- Pérez, E., Reyes, R. (1998). *Fauna fósil del Caloviano, Oxfordiano y Titoniano superior-Berriasiano basal, proveniente del noreste de Cerro Mastodonte (Cordillera de Domeyko), este de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería: 9 p. Santiago.
- Piquer, J. & Sánchez, P. & Perez-Flores, P. (2021). *A new model for the optimal structural context for giant porphyry copper deposit formation*. Geology. 49. 10.1130/G48287.1.
- Pon, Y., Zapatta, T. (2022). *Informe geológico, Campaña de Sondajes Diamantinos 2020-2021: Etapa Pórfido Proyecto Cerro Búfalo, Baquedano, Región de Antofagasta*. Gerencia de Exploraciones Metálicas SQM (Informe Inédito). Antofagasta.
- Pudack, C., Halter, W., Heinrich, C., Pettke, T. (2009). *Evolution of Magmatic Vapor to Gold-Rich Epithermal Liquid: The Porphyry to Epithermal Transition at Nevados de Famatina, Northwest Argentina*. Economic Geology 2009, 104 (4): 449–477.

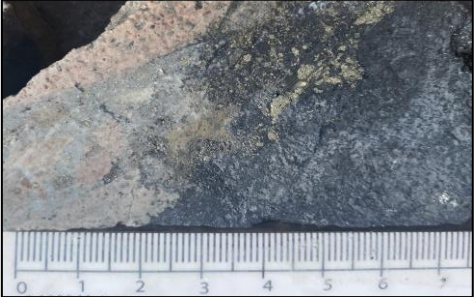
- Reed, M., Rusk, B., Palandri, J. (2013). *The Butte Magmatic-Hydrothermal System: One Fluid Yields All Alteration and Veins*. *Economic Geology* 2013;108 (6): 1379–1396.
- Rubilar, A. (2000). *Fauna fósil del Jurásico y probable Neocomiano, recolectada en especial al suroeste del Cerro la Ballena (Cordillera de Domeyko), II Región*. Servicio Nacional de Geología y Minería. 45 p. Santiago.
- Sahlström, F. (2018). *The Mt Carlton high-sulfidation epithermal deposit, NE Australia: geologic character, genesis and implications for exploration*. Tesis de Doctorado. College of Science and Engineering, James Cook University. Australia
- Sillitoe, R. (1995). *The influence of magmatic–hydrothermal modelson exploration strategies for volcano-plutonic arcs*, in Thompson, J. (ed.), *Magma, Fluids and Ore Deposits*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 23, 511-525
- Sillitoe, R. (1999). *Styles of high-sulphidation gold, silver and copper mineralisation in porphyry and epithermal environments*. Pacrim '99 Congress, Bali, Indonesia, 1999, Proceedings: Melbourne, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 29–44.
- Sillitoe, R., Burgoa, C., Hopper, D. (2016). *Porphyry Copper Discovery Beneath the Valeriano Lithocap, Chile*. SEG Discovery 2016. (106): 1–20.
- Sillitoe, R. (2019). *Comments on geology and exploration of the Búfalo copper prospect, Region II, Chile*. Gerencia de Exploraciones Metálicas SQM (Informe Inédito). Santiago.
- Song, Y., Yang, C., Wei, S., Yang, H., Fang, X., Lu, H. (2018) *Tectonic Control, Reconstruction and Preservation of the Tiegelongnan Porphyry and Epithermal Overprinting Cu (Au) Deposit, Central Tibet, China*. *Minerals*. 2018; 8(9):398.
- Soorani, L., Bafti, B., Homam, S., Abbaslo, Z., Zanoogi, H. (2022). *Hypogene enrichment in Miduk porphyry copper ore deposit, Iran*. *Scientific Reports* 12. Article Number: 19113.
- Stoffregen, R. (1987). *Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado*. *Economic Geology*, 82(6), 1575-1591.
- Sykora, S., Cooke, D., Meffre, S., Stephanov, A., Gardner, K., Scott, R., Selley, D. (2018). *Evolution of Pyrite Trace Element Compositions from Porphyry-Style and Epithermal Conditions at the Lihir Gold Deposit: Implications for Ore Genesis and Mineral Processing*. *Economic Geology*. 113 (1): 193–208.
- Takács, A., Molnár, F., Turi, J., Mogessie, A., Menzies, J. (2017). *Ore Mineralogy and Fluid Inclusion Constraints on the Temporal and Spatial Evolution of a High-Sulfidation Epithermal Cu-Au-Ag Deposit in the Recsk Ore Complex, Hungary*. *Economic Geology* 2017; 112 (6): 1461–1481.
- Tsuruoka, S., Monecke, T., Reynolds, T., Holley, E.. (2016). *The evolution of the magmatic-hydrothermal system at the Summitville high-sulphidation epithermal Au deposit*. Tesis de Doctorado. Department of Geology and Geological Engineering, Colorado School of Mines. GSA Annual Meeting in Denver, Colorado, USA – 2016.
- Yang, C., Beaudoin, G., Tang, J. (2022). *Cu-sulfide mineralogy, texture and geochemistry in Tiegelongnan porphyry-epithermal copper system, Tibet, China*. *Miner Deposita* 57, 759–779.

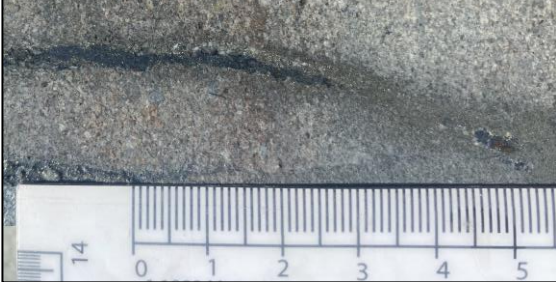
ANEXOS

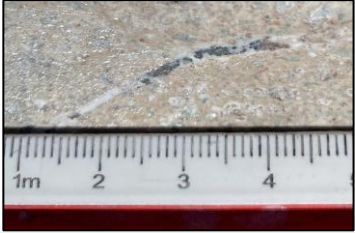
ANEXO N°1: Descripciones de muestras – Petrografía macroscópica

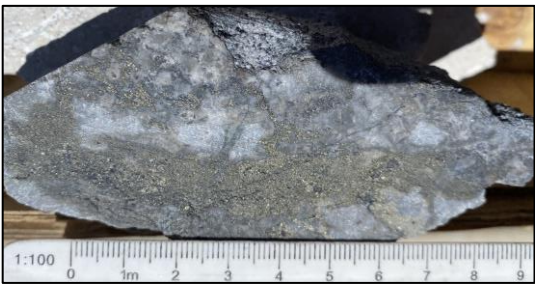
M1	DDHBUF-17	Tramo 318 a 324; muestra en metro 320.5
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica de anfíbol (15%) con fenocristales de plagioclasa de tamaño medio (1 mm); Alteración: La zona central corresponde a una ledge qz-alunítico>caolinita>dickita (reemplazando plagioclasas y en venas finas). Las zonas laterales poseen una alteración Qz-caolinita con menor clorita;</p> <p>Mineralización: Los tramos laterales solo concentran un 3% de pirita diseminada y en vetillas finas, con probable esfalerita menor. En la zona de ledge la mineralización aumenta hasta cerca de un 6%, con Pirita-Enargita en relación 1:1 en cúmulos pequeños de cuarzo-dickita y vetillas. Pátinas menores de calcosina azulada.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 320.5 y 320.75, se reconoce una zona de vetillas con hasta un 15% total de sulfuros en una alteración cuarzo-alunítica con menor caolinita-dickita. La veta principal consiste en un 8% de enargita, concentrada en la zona central con hábito prismático fino; 6% de pirita, oxidada y principalmente concentrada en el halo exterior de la veta; y un 1% de calcosina gris azulada, encontrándose como laminas brillantes sobre la enargita. Acompañan a la mineralización pequeños cúmulos y venillas de cuarzo masivo + dickita.</p>		
M2	DDHBUF-37	Tramo 590 a 598; muestra en metro 590.3
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica altamente obliterada debido a posible zona de fractura; Alteración: Entre el metro 590 y 594, se reconoce qz-caolinitica, alterando pervasivamente a la roca. El cuarzo se presenta de modo microcristalino a amorfo en pequeños rellenos o venillas. Existen algunos flujos hematíticos probablemente provocados por la percolación de fluidos superficiales. Desde el metro 594, ledge qz-alunítico, con contenidos menores de dickita.</p> <p>Mineralización: Leve diseminada en la zona cuarzo-alunítica (4% de Py>>>En). Algunas vetillas se extienden hacia la zona caolinitica debido a la zona de falla o a la permeabilidad, encontrándose localmente vetas ricas en enargita con patinas menores de digenita.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 590.25 y 590.5 se reconoce hasta un 8% total de sulfuros concentrados en una vetilla subparalela al sondaje, la cual posee en el centro enargita en placas exfoliadas (3%), acompañada por pirita (4.7%), la cual además se observa sellando los bordes de la vetilla, bastante oxidada por posible contacto con fluidos superficiales. Se observa hasta un 0.3% de digenita de color azul eléctrico a modo de pequeñas patinas sobre la enargita.</p>		

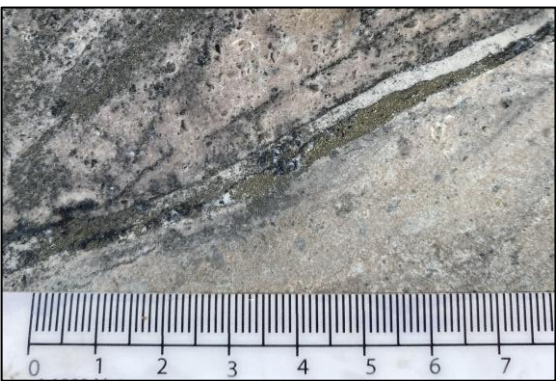
M3 (Asociada a CT03, ANEXO N°2)	DDHBUF-37	Tramo 710 a 720; muestra en metro 718.8
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita altamente porfídica (40%) de grano medio; Alteración: Se reconoce una alteración qz-caolinita=alunita, con cantidades menores de pirofilita (3%) y dickita (1%) (presentándose estas acumuladas y reemplazando plagioclasas). Abundante vetillo de cuarzo amorfo, desde muy fino hasta unos 5 cm de espesor; Mineralización: Diseminada y en vetillas de pirita-energita (vol. total 10%, relación 9:1), para luego pasar cerca del metro 715 a una zona de abundantes vetas (20% vol.sulfuros, 8:2 relación Py-En), incluida una de 10 centímetros con digenita:bornita:pirita (3:1:1).</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Veta de 10 centímetros ubicada diagonalmente al sondaje entre el metro 717.7 a 717.9, consistiendo principalmente en bornita con pátina púrpura a azulada, acompañada por venillas de pirita, la cual además se encuentra diseminada, junto a menores pintas de digenita azulada eléctrica, la cual parece concentrarse sobre todo en los bordes, y algunos remanentes de enargita/tenantita. El volumen total de sulfuros es de un 35% (20% pirita, 10% bornita, 3% digenita, 2% enargita/tenantita). Los minerales de alteración que acompañan a las menas son alunita, cuarzo masivo lechoso, dickita, caolinita y cristales de anhidrita sobre la veta (probablemente posteriores).</p>		

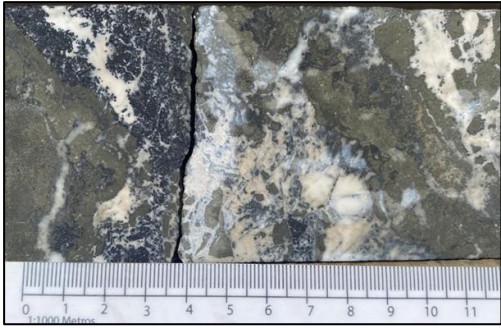


M4	DDHBUF-37	Tramo 458 a 468; muestra en metro 467.7
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita rojiza de grano grueso, con abundantes fenocristales de plagioclasa de hasta 0.5 mm y leves máficos no reconocidos; Alteración: Halo qz-caolinitico+dickita (7%), esta última principalmente reemplazando plagioclasas. Luego, transición hacia una zona alunitica, en la cual se reconocen también leves cúmulos de pirofilita. Mineralización: Volumen de sulfuros cercano al 8%, con una relación pirita:enargita de 9:1, principalmente diseminada y en leves vetillas. Localmente, entre los metros 467 y 468 el volumen total aumenta hasta cerca del 30%, debido a la presencia de una veta masiva subhorizontal de enargita, con abundantes patinas de calcosina.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Veta masiva con un volumen de sulfuros de hasta el 35%, siendo principalmente enargita masiva (20%), sobre la cual se observan en presunta textura de reemplazo múltiples patinas de calcosina de coloración negra azulada y aspecto terroso, alcanzando hasta un 3% del volumen total, lo que genera localmente una ley de cobre de hasta 2.5%. La pirita (12%) se encuentra en pequeños cúmulos dentro de la veta. La mineralogía de alteración presente corresponde a un agregado microcristalino cuarzo-alunitico con dickita reemplazando plagioclasas y vetas de cuarzo blanquecino.</p>		

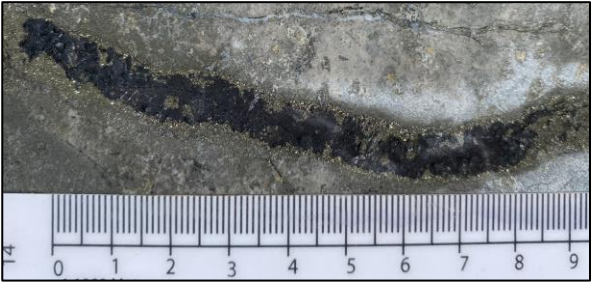
M5 (Asociada a CT05, ANEXO N°2)	DDHBUF-37	Tramo 362 a 368; muestra en metro 365.2
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica de grano medio, con alto contenido de fenocristales de plagioclasa (40%). Alteración: Ledge Qz-alunitico en agregados masivos de coloración beige, con caolinita afectando la matriz de roca y cúmulos menores de dickita. Mineralización: Cerca de 5% de Py>>En en la generalidad del tramo. Entre los metros 364 y 366 tenemos la aparición de dos vetillas de 1 cm de pirita-enargita (5:5), con menor bornita (pátina azulada a púrpura), calcosina azul oscuro y trazas de calcopirita con pátina oxidada anaranjada a púrpura.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 365 y 366, hasta un 12% total de sulfuros concentrados en dos vetillas, en las cuales se reconoce un 8% de pirita, la cual parece ser temporalmente anterior a todas las demás fases, junto a leves placas exfoliadas de enargita (3%), acompañada por bornita masiva (1%), patinas brillantes gris azuladas de calcosina (menos de 1%), con un brillo metálico a terroso, y leves pintas de calcopirita con patinas anaranjadas (menos de 1%). La relación textural entre las fases no se puede dilucidar con claridad vía petrografía macroscópica, aunque se presume que la calcopirita y bornita se desarrollan sobre los cristales de enargita.</p>		

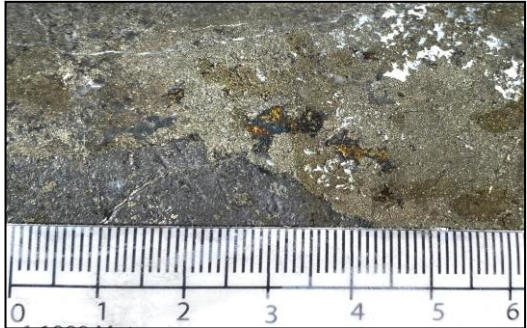
M6-A	DDHBUF-17	Tramo 470 a 476; muestra en metro 472.2
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica de grano medio (35% fenocristales de plagioclasa); Alteración: Restringida zona de ledge cuarzo alunitico entre el metro 470 y 472, con menor dickita, rodeado por zonas de cuarzo caolinita que alteran pervasivamente la roca; Mineralización: Hasta un 2% de sulfuros, principalmente pirita diseminada, con contenidos menores de enargita en vetillas, las cuales son cubiertas por menor calcopirita muy localmente.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo de 6 centímetros con alteración cuarzo-alunitica>caolinita>dickita y un 5% total de sulfuros, con pirita diseminada (4%) y la presencia de una vetilla muy fina de sílice-dickita que contiene cristales prismáticos de enargita (0.7%) cubiertos por venillas finas de calcopirita (0.3%) en textura de reemplazo.</p>		

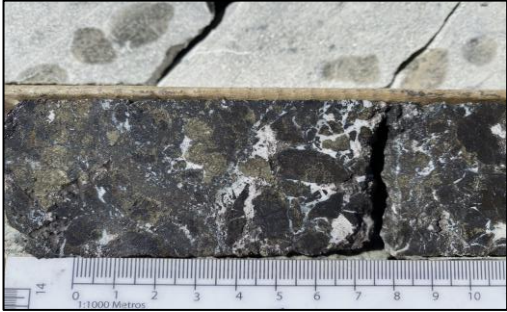
M6-B	DDHBUF-17	Tramo 470 a 476; muestra en metro 474.0
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica completamente obliterada por alteración y zona de fractura; Alteración: Halo cuarzo-caolinitico contiguo a una zona de ledge, con presencia de abundante vetilleo de cuarzo fino junto a arcillas. Hacia la zona de fractura, la alteración se hace mucho más pervasiva, obliterando completamente la roca original; Mineralización: Hasta un 5% de sulfuros concentrados sobre todo diseminados, en vetillas finas y en planos fracturados, consistiendo principalmente de pirita junto a menor enargita que es reemplazada por calcopirita y calcosina de forma puntual.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Muestra adyacente a una zona de fractura que concentra hasta un 10% total de sulfuros, consistiendo en pirita masiva (9%) y vetillas con relictos de enargita (0.3%), las cuales son reutilizadas por calcosina en vetillas terrosas (0.5%) y escasa calcopirita acompañándola (0.2%). Sobre la pirita es también posible reconocer escasas pintas de calcosina.</p>		

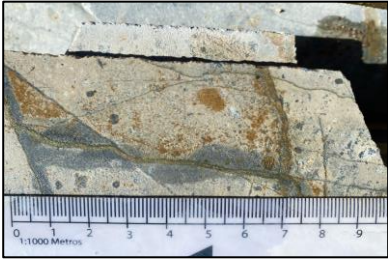
M7	DDHBUF-17	Tramo 568 a 574; muestra en metro 571.7
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha volcanoclastica altamente polimictica, conteniendo clastos volcánicos y volcanoclasticos variados. Alteración: Qz-caolinita>alunita, con menor pirofilita (5%) y dickita (2%), encontrándose estos últimos dos minerales tanto en cúmulos acompañados por cuarzo microcristalino como reemplazando plagioclasas; Mineralización: El promedio del tramo es de un 10% de pirita diseminada o acompañando los cúmulos de pirofilita-cuarzo y en vetillas finas con cuarzo amorfo. La enargita y tenantita son muy restringidas a lo largo del tramo (2%) y aparecen siempre juntas. Localmente se reconoce entre el metro 571 al 572 hasta un 10% de mineralización debido a una veta de cuarzo, pirofilita, pirita, enargita y tenantita, con trazas de bornita como patinas sobre la pirita.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Roca con alteración pervasiva qz-caolinitica con menor contenido local de alunita en agregados cristalinos rosáceos. Es cortada por una veta de cuarzo-pirofilita-dickita, la cual contiene mineralización de pirita y enargita en una relación textural de crecimiento conjunto, y tenantita muy localmente. Esta paragénesis mineral se encuentra también diseminada en la roca. En la vetilla, se reconocen leves patinas de bornita sobre la pirita y enargita. El volumen total de sulfuros es de hasta un 8% (5% Py, 2% En, 0.5% Tnt, 0.5% Bn).</p>		

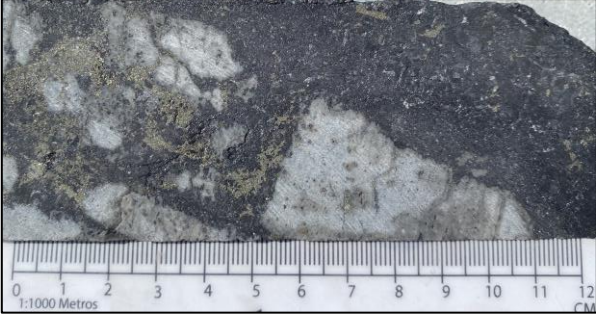
M8	DDHBUF-35	Tramo 284 a 290; muestra en metro 286.3
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita altamente porfídica (40% de fenocristales de unos 2 mm), en tramos completamente alterada por inyección de vetas minerales; Alteración: Transición desde un halo Qz-caolínítico a un ledge cuarzo alunítico con abundantes cúmulos de cuarzo-pirofilita (8%) > dickita (3%); Mineralización: A lo largo del tramo qz-caolínítico es de un 3% de sulfuros diseminados (pirita>>enargita). Al pasar al ledge, se encuentran tramos de hasta 25 centímetros de sulfuros sobre todo acumulados, en vetas y acompañando rellenos de cuarzo-pirofilita-dickita. El volumen de mena total es de hasta un 12%, con una relación Py:En=8:2</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Muestra con hasta un 40% de sulfuros totales en textura cumulada, con un 30% de pirita masiva y un 10% de enargita en cristales prismáticos exfoliados. La mineralogía de alteración acompañando a la mineralización corresponde a cúmulos y vetillas de cuarzo-pirofilita, generando agregados amorfos, reconociéndose menor alunita y dickita ocasionalmente. La relación textural de la pirita y la enargita es predominantemente de crecimiento simultáneo, aunque en ocasiones se reconocen cúmulos de pirita cubriendo enargita.</p>		
M9	DDHBUF-48	Tramo 372 a 378; muestra en metro 375.2
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Volcanarenita feldespática que grada hacia una brecha volcanosedimentaria con líticos policomposicionales de hasta 3 cm; Alteración: Zona cuarzo-alunítica con presencia abundante de caolinita y pirofilita, encontrándose esta en cúmulos que comúnmente acompañan a los sulfuros. Mineralización: Cerca de un 12% total de sulfuros, siendo este 85% pirita y 15% enargita, con una ocurrencia principal en vetas y cúmulos. Se reconocen trazas de calcopirita asociadas a vetas puntuales.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 375.2 y 375.3 se reconoce una veta masiva con hasta un 35% de sulfuros, siendo estos pirita (28%), la cual se inyecta en la roca junto con agregados masivos de cuarzo-pirofilita; enargita (6.5%), la cual posee un hábito de cristales prismáticos cortos, concentrándose sobre todo en las zonas centrales de la veta; y calcopirita (0.5%), la cual según se observa, parece reemplazar a los otros dos sulfuros muy puntualmente.</p>		
M10	DDHBUF-36	Metro 440 a 450; muestra en metro 447.0
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha freática monomítica con clastos de 1 cm en promedio que corta una andesita porfídica de grano medio; Alteración: Desde el metro 440 al 444, halo cuarzo-caolínítico con menor dickita, y posteriormente halo cuarzo-alunítico>caolinita, más vetillas finas de sílice; Mineralización: cerca de un 4% total de sulfuros en el tramo, con una ocurrencia general reemplazando clastos de la brecha y en vetillas finas, consistiendo en agregados de pirita-enargita en relación de abundancia 2:1</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Sección de andesita muy obliterada por alteración cuarzo-alunítica que contiene hasta un 9% total de sulfuros en vetillas finas y pequeños cúmulos, consistiendo en un 4% de enargita con hábito masivo acompañada de un 4% de pirita muy fina. Toda la veta parece ser cubierta por calcosina (1%) masiva, de color azul negruzco.</p>		

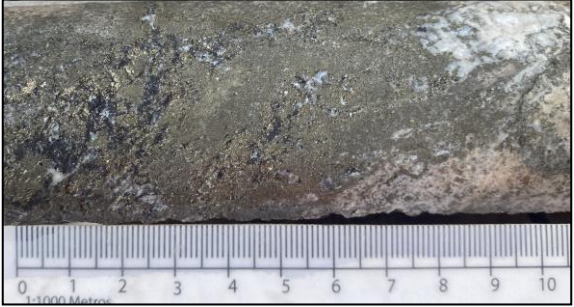
M11	DDHBUF-36	Tramo 530 a 536; muestra en metro 531.2
 <p data-bbox="695 149 1562 485">Descripción del tramo Litología: Andesita porfídica de grano fino (1 mm en fenocristales de plagioclasa que alcanzan un 35% en vol.); Alteración: Zona Qz-alunitica, con abundantes rellenos de cuarzo masivo (8%) y vetillas, acompañadas por pirofilita (hasta un 4%) con una ocurrencia cumular y reemplazando plagioclasas, junto a menor dickita. Mineralización: Volumen de hasta 12% con ocurrencia en vetas, vetillas y cúmulos. En general las vetillas están asociadas a cuarzo amorfo a ligeramente microcristalino, mientras las vetas mayores consisten en una estructura central de enargita-pirita cubierta por calcosina azulada a modo de patinas, rodeadas por pirita masiva y cuarzo. En general, las vetillas son contiguas a zonas de fractura.</p>		
<p data-bbox="66 485 1562 657">Descripción de la muestra Entre el tramo 531.0 y 531.2, se reconoce hasta un 30% total de sulfuros, con una vetilla de 2 cm formada por una zona central de enargita (8%), con pátinas de calcosina negro-azuladas (2%) sobre ella. La pirita (20%) se encuentra tanto en el centro de la vetilla como en las zonas exteriores, donde parece cementar el borde y encontrarse también diseminada en la roca adyacente. La mineralogía de alteración que acompaña a la mineralización consiste en agregados cuarzo-aluníticos y pequeños cúmulos de dickita.</p>		

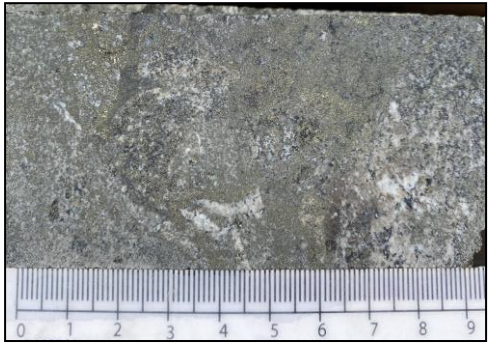
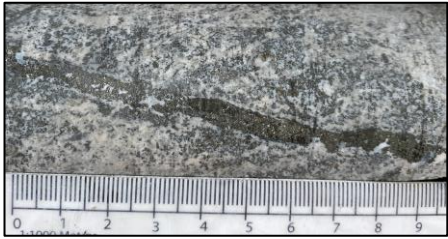

M12 (Asociada a CT12, ANEXO N°2)	DDHBUF-95	Tramo 710 a 720; muestra en metro 714.5
 <p data-bbox="695 735 1562 1081">Descripción del tramo Litología: Andesita porfídica altamente obliterada; Alteración: Cuarzo-alunítica, en la cual esta paragénesis reemplaza totalmente la masa fundamental de la roca con agregados microcristalinos, y es posteriormente cortada por vetillas de sílice; menores rellenos de dickita. Mineralización: Abundancia de un 10%, presentándose diseminada, en vetillas y cúmulos. El sulfuro más abundante es la pirita, encontrándose también con relativa abundancia enargita y calcopirita, acompañadas de menor tenantita, digenita, bornita y esfalerita. Se reconoce una zona de falla contigua a la sección de mineralización más abundante, con desarrollo de espejos estructurales de dickita.</p>		
<p data-bbox="61 1081 1562 1249">Descripción de la muestra Zona de hasta 40 centímetros con cúmulos y vetas gruesas de pirita, las cuales concentran hasta un 25% de mineralización sulfurada. Sobre la pirita (19%) se reconocen algunos cristales amorfos de calcopirita (5%), los cuales poseen un reemplazo en los bordes de tipo coating de digenita de color azul petróleo (0.7%) y en algunas ocasiones también de bornita (0.3%). Algunos cristales de enargita, tenantita y esfalerita pueden reconocerse diseminados dentro de las masas de pirita, aunque no es posible determinar su relación textural con las demás fases.</p>		

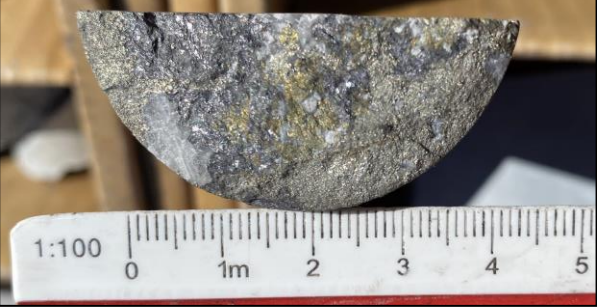
M13 (Asociada a CT13, ANEXO N°2)	DDHBUF-36	Tramo 690 a 698; muestra en metro 696.9
 <p data-bbox="695 1327 1562 1665">Descripción del tramo Litología: Roca presuntamente volcánica por pequeños relictos, completamente obliterada por alteración; Alteración: Zona de Qz-alunita con un contenido predominante de pirofilita (hasta 20%) principalmente en cúmulos y vetillas, así como relleno de pequeñas cavidades. Acompañan cuarzo, caolinita y dickita (3%). Hacia la mitad del tramo se reconoce una zona de fractura con escalones estructurales de pirofilita; Mineralización: Pirita-Enargita en general diseminadas y cumularadas junto a pirofilita y cuarzo, volumen medio de 12% total de sulfuros con una relación Py:En=6:4. De forma restringida en vetas y cúmulos se reconoce tenantita cúbica y trazas de bornita-calcopirita asociadas a la</p>		
<p data-bbox="61 1665 1562 1837">Descripción de la muestra Entre el metro 696.7 y 697.0, se reconoce una zona de mineralización masiva, con hasta un 65% de sulfuros, siendo estos enargita (40%), pirita (20%), tenantita (4.5%), bornita (0.2%) y calcopirita (0.3%). La enargita y la pirita se desarrollan de forma conjunta en cúmulos junto a agregados de pirofilita-cuarzo, mientras la tenantita aparece repartida muy espaciadamente y siempre acompañando a la enargita. La calcopirita y bornita se observan como pequeños cúmulos contenidos entre agregados de pirita-enargita.</p>		


M14	DDHBUF-36	Tramo 718 a 724; muestra en metro 720.3
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="198 155 583 415">  </div> <div data-bbox="699 155 1547 415"> <p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Pórfido dacítico con ojos de cuarzo (7%) y fenocristales gruesos de plagioclasa; Alteración: Zona Qz-caolinítica entre los metros 718 y 720, para luego pasar a una zona cuarzo-alunítica marcada por agregados masivos de coloración rosácea, con menor dickita reemplazando plagioclasas.</p> <p>Mineralización: Bastante restringida en el tramo (4%), con ocurrencia principalmente diseminada y en venas finas, consistiendo casi totalmente de pirita, con cantidades menores de calcopirita ocasionalmente.</p> </div> </div>		
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo con tres vetillas que cortan a la roca con alteración Qz-alunítica>caolinita pervasiva. El volumen total de sulfuros del tramo es de un 7% y consiste en 6.5% de pirita, la cual se encuentra junto a sílice en la estructura central de las vetillas, siendo el 0.5% restante calcopirita, la cual se encuentra como pequeños granos repartidos espaciadamente dentro de las vetillas. La relación textural entre ambas fases sulfuradas no es posible de distinguir en el estudio macroscópico.</p>		

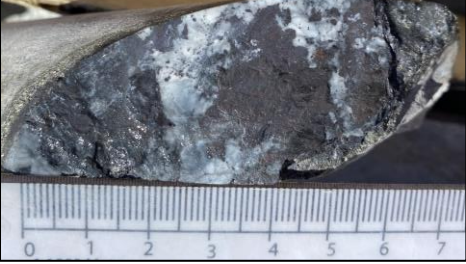
M15	DDHBUF-35	Tramo 490 a 498; muestra en metro 496.0
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="94 695 686 1010">  </div> <div data-bbox="699 665 1547 1045"> <p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica altamente obliterada con cristales de plagioclasa reemplazados por fases argílicas; Alteración: El tramo comienza en una zona de Qz-caolinita> pirofilita (4%, sobre todo en rellenos) y dickita (5%, principalmente en cúmulos con cuarzo), para luego pasar desde metro 494 a una zona de qz-alunita en agregados cristalinos beige, con abundantes vetillas de Qz microcristalino y cúmulos de dickita-pirofilita; Mineralización: En la zona del ledge, se observa hasta 11% total de sulfuros (Py:En=7:3) con ocurrencia diseminada y en vetillas, destacando una central de 5 centímetros donde la proporción de enargita es de hasta un 60%, teniendo un hábito prismático corto exfoliado, acompañada por pirita masiva.</p> </div> </div>		
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Se reconoce hasta un 35% total de sulfuros, consistiendo en un 20% de enargita, la cual se concentra sobre todo en la estructura central de la veta, con un hábito prismático corto exfoliado, y un 15% de pirita, la cual aparece de forma más diseminada, concentrándose también en ciertos cúmulos. La relación textural entre ambas parece indicar un crecimiento conjunto en paragénesis. La mineralogía de alteración cortada por la veta corresponde a agregados cuarzo-aluníticos y dentro de la misma se reconocen pequeños rellenos de cuarzo-pirofilita.</p>		

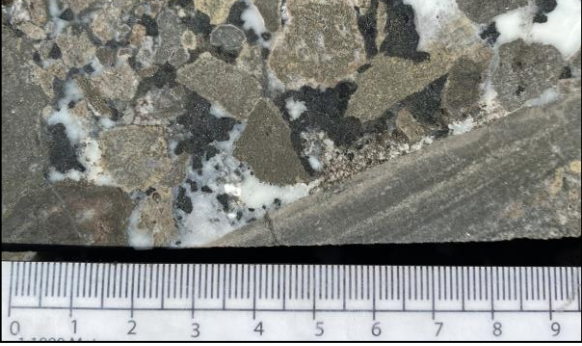
M16	DDHBUF-35	Tramo 568 a 574, muestra en metro 571.4
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="105 1329 675 1633">  </div> <div data-bbox="699 1310 1547 1654"> <p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica de grano fino altamente obliterada; Alteración: Ledge Qz-alunítico con contenido especialmente abundante de pirofilita (8%) y dickita (6%) principalmente en cúmulos, acompañando venillas y vetas de cuarzo lechoso, en cúmulos con pirita, y reemplazando plagioclasas de la roca original.</p> <p>Mineralización: Principalmente diseminada y en cúmulos masivos, además de rodeando vetas y agregados de cuarzo-alunita-pirofilita-dickita. Las texturas de la pirita y enargita parecen indicar relación con el mismo pulso que inserta las vetillas de cuarzo-arcillas en la roca. El volumen total de sulfuros es de un 12% y la relación pirita-enargita es de 8:2.</p> </div> </div>		
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 571.3 y 571.5 se reconoce una zona masiva de mineralización metálica con hasta un 55% en volumen de sulfuros, siendo estos: pirita (47%), con un hábito masivo, y enargita (8%), en pequeños cristales prismáticos que se concentran en general en la zona central. Toda esta zona mineralizada se ve acompañada por cúmulos, vetillas y rellenos de cuarzo-pirofilita.</p>		

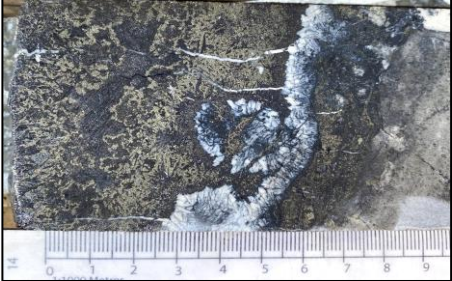
M17	DDHBUF-35	Tramo 664 a 668; muestra en metro 666.8
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica cortada por una brecha hidrotermal oligomíctica con líticos principalmente volcánicos, ligeramente angulosos; Alteración: Ledge Qz-alunitico, con menor contenido de dickita (3%) en cúmulos y vetillas acompañando a cuarzo, así como caolinita en general afectando a los remanentes de roca caja. El contenido de vetillas de cuarzo amorfo es abundante (15%) debido a la inyección de la brecha hidrotermal; Mineralización: Diseminada, así como en los clastos, matriz y cementando la brecha hidrotermal. A su vez, acompaña a los cúmulos y vetillas de cuarzo-arcillas. El volumen total de sulfuros en el tramo es de hasta 10%, con una relación Py:En=9:1. Leves trazas de bornita en pirita.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Sección de roca cortada por múltiples vetillas y cúmulos de cuarzo-pirofilita-dickita que cortan clastos hidrotermales con alteración cuarzo-alunita (agregados microcristalinos rosáceos). Se reconoce hasta un 30% total de sulfuros, siendo un 25% pirita, con una ocurrencia principalmente diseminada y cumulada, acompañada de enargita (4.7%), en pequeños cristales prismáticos cortos negros. Muy localmente se observan manchas de bornita (0.3%) con pátina púrpura asociadas a la pirita.</p>		
M18	DDHBUF-95	Tramo 508 a 514; muestra en metro 560.5
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica de grano medio; Alteración: Halo de qz-alunita con menor pirofilita y dickita (sobre todo reemplazando plagioclasas), reconociéndose además abundantes vetillas de silice que cortan a la roca, con menores rellenos de yeso; Mineralización: Hasta un 8%, de pirita diseminada y menor en vetillas, acompañada por enargita y en ocasiones escasas pátinas con textura de reemplazo de calcosina.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo con hasta un 15% de mineralización sulfurada, concentrándose tanto diseminada como en una vetilla central junto a dickita, pirita y pirofilita. Un 12% del total corresponde a pirita, acompañada en menor medida de enargita (2%). Sin embargo, se reconoce pirita también cubriendo la vetilla en lo que se interpreta como un segundo pulso; acompañada por leves patinas de reemplazo de calcosina (1%) especialmente en la zona central.</p>		
M19	DDHBUF-48	Tramo 628 a 634, muestra en metro 630.5
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica que transiciona a una brecha volcánica monomíctica con líticos andesíticos milimétricos a centimétricos; Alteración: Halo cuarzo caolínitico con contenido puntual de agregados de cuarzo-alunita y cúmulos de dickita>pirofilita acompañadas por cuarzo calcedónico lechoso; Mineralización: Cerca de un 7% total de sulfuros en la totalidad del tramo, con una ocurrencia principal en vetillas finas, diseminada y en leves cúmulos, consistiendo en una paragénesis de pirita:enargita:tenantita en relación 9:2:1.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo de 30 centímetros en el cual se reconoce hasta un 10% total de sulfuros concentrados en vetillas finas de silice calcedónica masiva, reconociéndose pirita (6%) subhedral, enargita (3%) y tenantita (1%), presentándose estas dos fases en agregados cristalinos finos de forma conjunta, cuya relación textural debe revisarse mediante estudio microscópico.</p>		

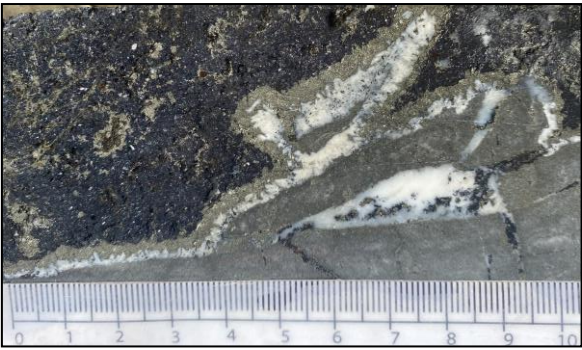
M20	DDHBUF-35	Tramo 816 a 822; muestra en metro 818.0
 <p data-bbox="699 159 1537 478"> Descripción del tramo Litología: Brecha freática altamente polimíctica con clastos angulosos (15%) de composición volcánica y volcanosedimentaria; Alteración: Ledge cuarzo-alunítico afectado por falla menor, de la cual no es posible distinguir disposición espacial, pero se reconoce gracias al desarrollo de un espejo estríado de silice-pirita. Caolinita altera la matriz de la brecha. Ciertos rellenos menores (2%) de pirofilita hojosa. Mineralización: Cúmulos de pirita-enargita (Relación 7:3, 10% vol. total de sulfuros), con menor tenantita. La mineralización además rodea los clastos de la brecha y está diseminada tanto en estos como en la matriz. Hacia el metro 818, aparece puntualmente calcopirita. </p>		
<p data-bbox="84 491 347 516">Descripción de la muestra</p> <p data-bbox="84 522 1503 646">Veta masiva mineralizada asociada a una zona de falla (metro 818.2), la cual consiste en hasta un 40% total de sulfuros, con pirita fina diseminada (28%), la cual rodea pequeños cúmulos de dickita-pirofilita (-) y venillas de cuarzo. En la zona central, se concentra la enargita (10%) en agregados hojosos de grano grueso, bien exfoliados y rodeados por pirita. La calcopirita (2%) ocurre aparentemente a modo de reemplazo sobre la pirita, y se concentra sobre todo en las zonas periféricas de los agregados de enargita y en el plano de falla.</p>		

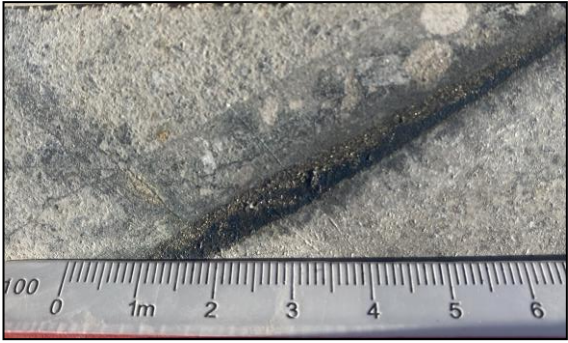
M21	DDHBUF-95	Tramo 508 a 514; muestra en metro 511.2
 <p data-bbox="699 739 1537 963"> Descripción del tramo Litología: Corresponde a una andesita porfídica intruída por una brecha freática polimíctica; Alteración: Cuarzo-alunita>caolinita con menores cúmulos de dickita y pirofilita, siendo todo esto cortado por vetillas de sílice amorfa; Mineralización: El tramo posee un 7% total de sulfuros, concentrándose en vetillas finas de pirita:enargita en relación 8:2, con pátinas de reemplazo menores de calcosina. </p>		
<p data-bbox="84 974 347 999">Descripción de la muestra</p> <p data-bbox="84 1005 1537 1129">Tramo con intensa alteración Qz-alunita, presente a modo de agregados microcristalinos pálidos, en el cual se reconocen también zonas cumuladas arcillosas con caolinita-dickita>pirofilita. El tramo contiene hasta un 8% total de sulfuros en una veta de sílice masivo, consistiendo estos en pirita (6%), en la estructura central, con ciertos cristales de enargita (1,5%) en pequeños agregados prismáticos, y sobre la veta, ocasionalmente pátinas de calcosina con textura terrosa y brillo metálico (0,5%).</p>		

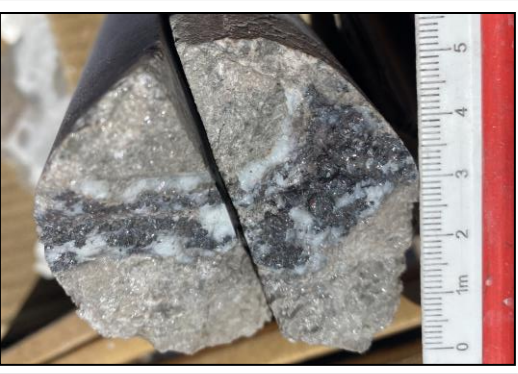
M22 (Asociada a CT22, ANEXO N°2)	DDHBUF-48	Tramo 684 a 688; muestra en metro 686.6
 <p data-bbox="699 1224 1537 1476"> Descripción del tramo Litología: Volcarenita con líticos de composición variada de hasta 5 mm; Alteración: Qz-alunítica con menores cúmulos de pirofilita y dickita, así como abundantes vetas de sílice de tipo calcedonia frecuentemente acompañadas por mineralización; Mineralización: Principalmente en vetillas oblicuas en 60° al sondaje, resultando en un 10% total de sulfuros, con pirita>enargita>tenantita, encontrándose este último mineral de forma más abundante en la vetilla presente en el metro 686.6 </p>		
<p data-bbox="84 1493 347 1518">Descripción de la muestra</p> <p data-bbox="84 1524 1537 1713">Entre el metro 686.5 y 686.7, se observa un tramo de roca profundamente alterado a cuarzo-alunita en agregados beige microcristalinos, con hasta un 10% de mineralización sulfurada concentrada en una vetilla de sílice calcedónica de coloración blanca lechosa. En el halo exterior de la vetilla se concentra principalmente pirita (3%), para luego pasar a una sección central en la cual se observa enargita prismática (4%) y en mayor cantidad tenantita (3%), encontrándose esta última con un hábito ligeramente cúbico a masivo y un brillo metálico rojizo. La relación textural entre estas dos fases ricas en arsénico es compleja de interpretar mediante el estudio macroscópico. Se reconoce también escasa bornita, con pátina azulada a verdosa, diseminada en pirita.</p>		

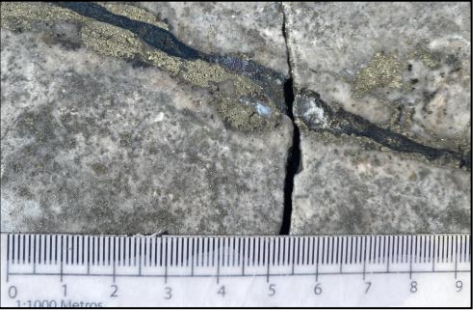
M23	DDHBUF-13	Tramo 860 a 868; muestra en metro 864.5
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha hidrotermal altamente polimíctica con clastos subangulosos de hasta 7 cm, de composición volcánica andesítica a volcanosedimentaria;</p> <p>Alteración: Qz-alunítica, concentrándose esta paragénesis principalmente en la matriz de la brecha. Menores cúmulos de pirofilita-cuarzo, generalmente mineralizados, y aparición de anhidrita tanto en rellenos como en vetillas que parecen cortar a la brecha; Mineralización: un 13% de pirita con ocurrencia principalmente en la matriz y cementando la brecha; menor en los clastos, con trazas leves de enargita-tenanita. Localmente en el tramo 864 a 866 hasta un 15% de mineralización sulfurada, asociada tanto a la brecha como a vetas de anhidrita que crackelan la roca. En estas últimas se reconoce abundante enargita y tenanita acompañándolas.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Brecha hidrotermal que alberga hasta un 17% total de mineralización sulfurada. La pirita (12%) se concentra sobre todo en los clastos de la matriz y cementando los bordes. Por otro lado, se reconoce anhidrita crackelando a la roca y agregados masivos de pirofilita-cuarzo cementando los espacios entre los clastos. Asociados a estas fases de alteración se reconoce mineralización de enargita (6%) y tenanita (2%), distinguiéndose debido su raya rojiza y brillo metálico grisáceo, ambas en agregados cristalinos cumulados.</p>		

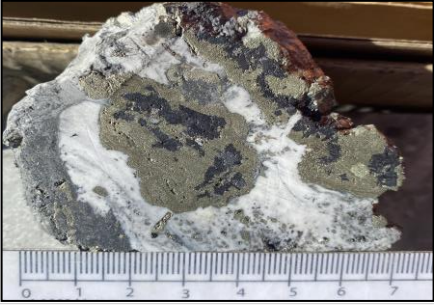
M24 (Asociada a CT24, ANEXO N°2)	DDHBUF-21	Tramo 308 a 314; muestra en 310.2
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha hidrotermal altamente polimíctica con clastos que alcanzan hasta 5 cm cortando andesita porfídica; Alteración: Halo cuarzo alunítico con contenido local importante de dickita en cúmulos y vetas de sílice-alunita-dickita que acompañan mineralización. Caolinita afectando los remanentes de roca caja; Mineralización: Hasta un 15% de mineralización ya sea en la matriz de la brecha o en cúmulos, vetillas finas y vetas importantes de hasta 10 centímetros. Consiste en pirita:enargita:famatinita en una relación de 4:2:1, encontrándose las últimas dos fases en agregados conjuntos.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Sección de veta masiva que corta andesita, asociada a agregados cristalinos de cuarzo-alunita-dickita>pirofilita, los cuales se concentran en el borde y se extienden hacia el centro mediante vetillas. El porcentaje total de sulfuros es de un 50%, consistiendo en un agregado de enargita (20%) y famatinita (10%). La pirita (20%) se encuentra en múltiples etapas de ocurrencia, pues se reconoce tanto acompañando a la enargita como en ocasiones cubriéndola y rodeándola.</p>		

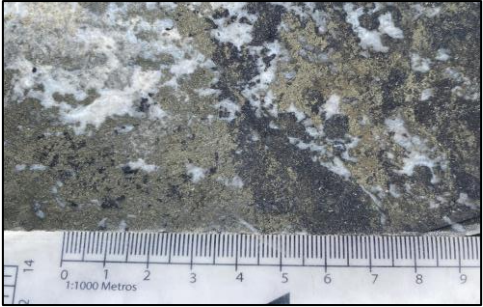
M25 (Asociada a CT25, ANEXO N°2)	DDHBUF-49	Tramo 368 a 374; muestra en metro 370.8
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Volcarenita feldespática de grano fino cortada por una brecha hidrotermal oligomíctica con clastos de hasta 6 cm; Alteración: Halo de alteración qz-alunítico representado por agregados masivos de coloración rosácea, con abundantes vetillas y cúmulos (hasta 15% del total del tramo) de cuarzo masivo+arcillas. Menormente se reconocen algunas vetillas de cuarzo oqueroso rellenas por mineralización; Mineralización: Hasta un 7% total de sulfuros en el tramo, con una ocurrencia principal a modo de cemento de la matriz acompañado de cuarzo-pirofilita-caolinita; en menor medida diseminada y cumulada. La proporción Pirita-Enargita es de 3:7, encontrándose este segundo mineral en pequeñas placas exfoliadas. Se reconocen algunas mínimas pátinas de calcopirita (0.5% del volumen total de sulfuros).</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 370.6 y 370.8 se reconoce una zona con hasta un 40% total de sulfuros, ocurriendo a modo de cemento entre clastos altamente espaciados de la brecha hidrotermal. En los bordes de los clastos, se reconoce la inyección de vetillas de alteración con cuarzo masivo y arcillas. Le sigue un borde piritoso, para luego pasar a una zona de mineralización masiva de enargita (25% del total de sulfuros), con pirita diseminada (14,5%) acompañándola. La calcopirita (0,5%) se presenta a modo de pequeños agregados amorfos sobre la enargita o la pirita, lo que se interpreta como una textura de reemplazo; mostrando una pátina oxidada de coloración anaranjada a verdosa.</p>		

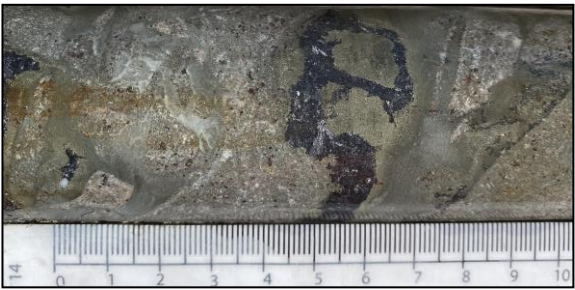
M26 (Asociada a CT26, ANEXO N°2)	DDHBUF-20B	Tramo 558 a 566; muestra en metro 559.5
 <p data-bbox="703 149 1515 489">Descripción del tramo Litología: Unidad volcanoclástica, muy probablemente una toba cristalina grisácea de composición dacítica, la cual es cortada por una brecha hidrotermal polimíctica; Alteración: Desde el principio del tramo hasta el metro 563, la alteración se reconoce como parte de un halo Qz-caolinítico, más un leve vetilleo de sílice hidrotermal, para luego pasar a una zona de ledge Qz-alunítico, coincidiendo con la inyección de la brecha; Mineralización: En el halo qz-caolinítico, se observa solo menor pirita>enargita diseminadas; sin embargo, en el borde con el halo alunítico se concentran importantes vetillas y cúmulos de pirita-enargita (relación 8:2) con menor calcosina y bornita, concentradas especialmente en una vetilla (60° con respecto al sondaje).</p>		
<p data-bbox="107 489 1515 520">Descripción de la muestra</p> <p data-bbox="107 520 1515 678">Vetilla muy local ubicada en la zona transicional entre el halo de alteración Qz-caolinítico y el ledge qz-alunítico. Se observa hasta un 10% total de sulfuros, asociados a una inyección de sílice oscura junto a arcillas no identificadas, junto a la cual se desarrollan pirita (6%) y enargita (1%), en aparente crecimiento conjunto, las cuales son superpuestas por patinas de bornita (1%) de patinas purpura y calcosina azulada (1%), las cuales pueden asociarse a un pulso hidrotermal distinto. La relación textural entre estos últimos dos minerales no se puede distinguir con exactitud en el estudio macroscópico.</p>		


M27 (Asociada a CT27, ANEXO N°2)	DDHBUF-48	Tramo 778 a 788; muestra en metro 786.6
 <p data-bbox="703 758 1515 1129">Descripción del tramo Litología: Brecha freática altamente polimíctica, clasto soportada, con clastos andesíticos, volcanosedimentarios y de pórfidos dacíticos; Alteración: Ledge qz-alunítico (agregado cristalino fino silicatado color beige), encontrándose también en la matriz cúmulos caoliníticos y en menor medida de pirofilita y dickita (4%); Mineralización: Principalmente en pirita en la totalidad del tramo (12%), cuya ocurrencia es en vetillas junto a cuarzo, diseminada en la brecha freática y como pequeños cúmulos, con trazas de enargita y mínimos reemplazos de calcosina/digenita. Hacia el metro 780 la proporción de sulfuros aumenta levemente y aparece tenantita, con una relación Pirita:Enargita:Tenantita=6:1:1, concentrándose en vetas con cuarzo amorfo.</p>		
<p data-bbox="107 1129 1515 1161">Descripción de la muestra</p> <p data-bbox="107 1161 1515 1297">Se reconoce entre el metro 786.5 y 786.6 una zona con pervasiva alteración cuarzo-alunítica que alberga hasta un 10% de sulfuros totales, concentrados principalmente en una vetilla de sílice amorfa que corta ortogonalmente al sondaje. Se reconoce pirita diseminada (5%) a lo largo del tramo, con un contenido muy menor en la veta, donde dominan tenantita (3%), de hábito cubico subhedral con raya rojiza, y enargita (2%), que en este caso se presenta como agregados finos anhedrales.</p>		

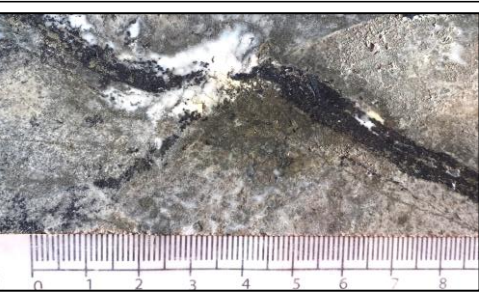
M28	DDHBUF-49	Tramo 472 a 480; muestra en metro 476.0
 <p data-bbox="703 1377 1515 1686">Descripción del tramo Litología: Brecha hidrotermal monomíctica con clastos andesíticos angulosos de hasta 20 cm de diámetro; Alteración: Ledge qz-alunítico que altera de forma muy pervasiva los clastos de la brecha, generando agregados de coloración beige, más pirofilita y dickita (7%) acompañando a cuarzo en rellenos y vetillas mineralizadas; Mineralización: 15% total en el tramo, con una relación Py:En de 9:1, de ocurrencia principal en vetas de qz-dickita y diseminada en los clastos de la brecha. En el Metro 776.0 veta de pirita-bornita-digenita en relación 2:1:1, con trazas de calcopirita. Aparición menor de vetillas de esta paragénesis hasta el Metro 777, lo que aumenta considerablemente la ley de cobre.</p>		
<p data-bbox="107 1686 1515 1717">Descripción de la muestra</p> <p data-bbox="107 1717 1515 1854">Muestra de roca con alteración argílica avanzada pervasiva que contiene hasta un 10% total de sulfuros, concentrados en una vetilla de pirita (6.5%) acompañada por sílice calcedónico, sobre la cual se desarrolla una estructura central de digenita (2%) de color azul eléctrico, y pequeños manchones de bornita (1%) con patina purpura. Leve enargita (0.5%) se observa bastante repartida tanto en la zona central como en los sectores laterales de la vetilla.</p>		

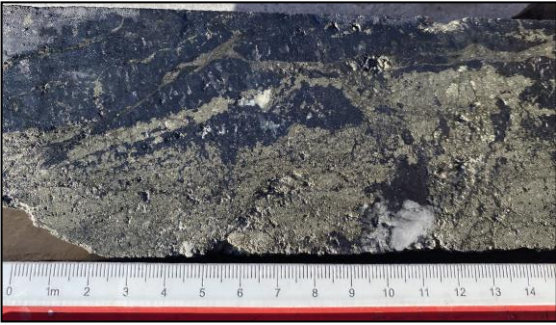
M29	DDHBUF-49	Tramo 508 a 518; muestra en metro 516.2
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha hidrotermal monomítica con clastos de composición volcánica; Alteración: Zona de ledge qz-alunítico, dominando esta asociación paragenética la matriz y clastos de la brecha, con menores vetillas y cúmulos de qz-pirofilita; Mineralización: Hasta un 7% total de sulfuros principalmente diseminados, en la matriz y clastos de la brecha, así como acompañando vetillas de qz-pirofilita.. La relación de abundancia pirita:enargita es de 9:1. Localmente en el Metro 516 se reconoce asociadas a cúmulos de qz-pirofilita mineralización en relación Py:En=6:4, con pátinas menores de calcopirita sobre pirita.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Zona de relleno cuarzo-alunítico entre clastos de brecha hidrotermal, en la cual se contienen cúmulos minerales. Hasta un 12% total de sulfuros, principalmente pirita (10%), en las zonas exteriores de los cúmulos, con una zona central de enargita (4.8%) en cristales prismáticos exfoliados. La calcopirita (0.2%) se presenta a modo de pequeños cristales que cubren la pirita, repartidos espaciadamente.</p>		

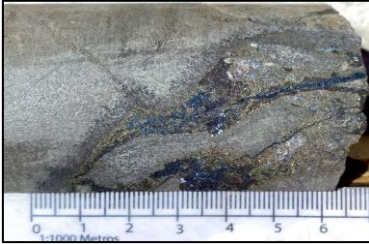
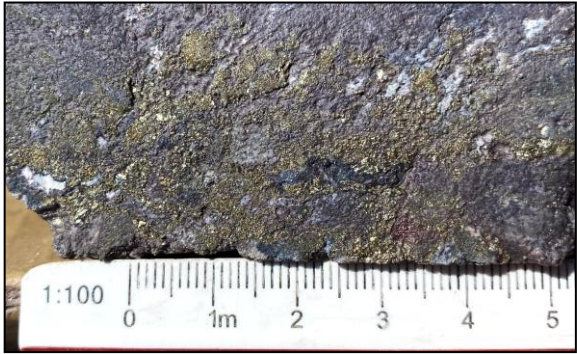
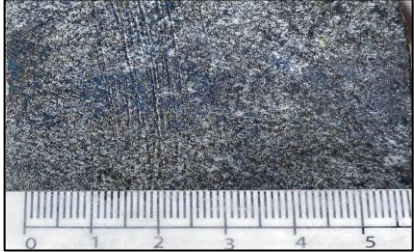
M30 (Asociada a CT30, ANEXO N°2)	DDHBUF-13	Tramo 648 a 660; muestra en metro 657.7
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha freática monomítica que intruye andesita autobrechizada, generando clastos angulosos de 1 cm aproximadamente; Alteración: Qz-alunítica, generándose masas cristalinas de color beige que a menudo se ven acompañadas por cúmulos de dickita, puntuales cristales de anhidrita y algunos rellenos de cavidades de pirofilita. Menores vetillas de cuarzo calcedónico presentes entre cúmulos de sulfuros; Mineralización: El tramo estudiado contiene hasta un 8% total de sulfuros, siendo estos pirita, enargita y tenantita en una relación 9:2:1. La ocurrencia más común es en cúmulos dentro de la matriz de la brecha freática, pero también cementandola y diseminada.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Cúmulos sulfurados asociados a la matriz y cemento de una brecha freática, desarrollándose en estrecha paragénesis con agregados microcristalinos de cuarzo-alunita, cristales de anhidrita y dickita masiva, generando en ocasiones texturas de puzzle. El porcentaje total de sulfuros en la muestra es de 15% y consiste en pirita cristalina de grano fino (10%) acompañada de enargita prismática subhedral (3%) y tenantita masiva (2%). Menor esfalerita de grano muy fino diseminada.</p>		


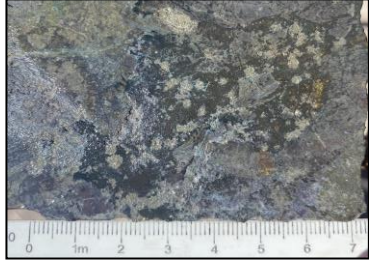

M31	DDHBUF-13	Tramo 710 a 718; muestra en metro 715.9
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha hidrotermal monomítica con clastos angulosos de hasta 3 cm de andesita de anfíbol rojiza; Alteración: Qz-alunítica, con desarrollo de agregados masivos a microcristalinos en la matriz de la brecha y menor desarrollo de sílice tipo ópalo en vetillas, acompañado por pirofilita y dickita (8%), comúnmente asociados a mineralización. Menor yeso en forma de rellenos microcristalinos; Mineralización: Hasta un 13% total de sulfuros, con una relación pirita-enargita de 8:2, sobre todo concentrada en la matriz de la brecha, cementando y en vetillas/cúmulos de cuarzo-arcillas; en menor medida diseminada y dentro de los clastos de la brecha.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo de brecha hidrotermal con alto porcentaje de mineralización (hasta un 15% de sulfuros), siendo estos principalmente pirita (10%), sobre todo diseminada en la matriz y los clastos. La brecha se ve cementada por vetillas de sílice de tipo ópalo y enargita (4.5%) en agregados cristalinos con textura de relleno.</p>		

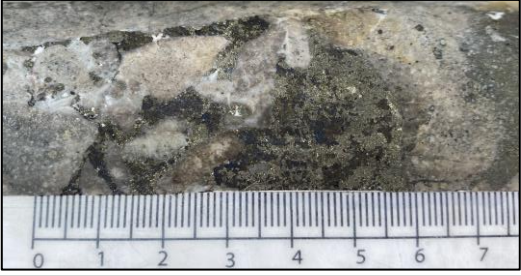
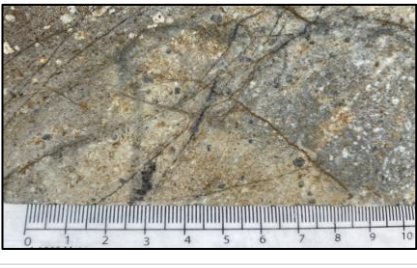
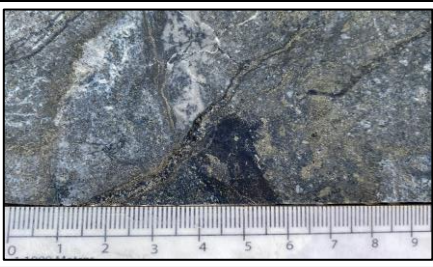
M32	DDHBUF-21	Tramo 378 a 384; muestra en metro 379.1
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica obliterada de grano fino cortada por venillas centimétricas de brecha hidrotermal; Alteración: Halo cuarzo alunitico, desarrollándose agregados microcristalinos rosáceos de forma pervasiva reemplazando la matriz de la roca; Mineralización: En vetillas que varían entre muy finas hasta cercanas a los 3 cm, en general orientadas a 60° del sondaje, y concentran un vol. de sulfuros de hasta 7% con una relación pirita:enargita:famatinita de 7:7:1</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Zona de abundante vetilleo acompañado de sílice lechosa y pequeños cúmulos arcillosos cortando andesita con alteración cuarzo-alunita. Se concentra localmente hasta un 20% de sulfuros, consistiendo en 12% enargita, con un hábito acicular a prismático fino, asociada a menor famatinita (1%) reconocida por su color negro rojizo. Las acompaña pirita (7%), tanto en cúmulos en el centro de la veta como sellando esta por los bordes.</p>		


M33	DDHBUF-13	Tramo 620 a 632; muestra en metro 622.8
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesitas altamente porfídicas (40%) finas (0.5 mm en fenocristales de plagioclasa); Alteración: Qz-alunitica representada por agregados masivos de color beige, junto a abundantes cúmulos de pirofilita-dickita (7%) y rellenos de qz microcristalino. La alteración argílica avanzada es cortada por vetas puntuales de yeso. Mineralización: El promedio total de sulfuros del tramo de un 8% consistiendo en pirita y enargita en relación 8:2, presentándose diseminada, en vetillas y acompañando a cúmulos de dickita-pirofilita. Localmente, se presentan algunas vetas en las cuales la relación pirita enargita es de hasta 6:4.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 622.8 y 622.9, se reconoce una zona de alteración argílica avanzada con un vetilleo que alcanza hasta 15% total de sulfuros. Se reconoce pirita (7%) asociada a cúmulos de dickita-cuarzo, además de acompañando a la enargita (8%) prismática en vetillas. La relación textural entre ambas fases sulfuradas parece indicar un crecimiento conjunto como parte del mismo pulso mineral.</p>		

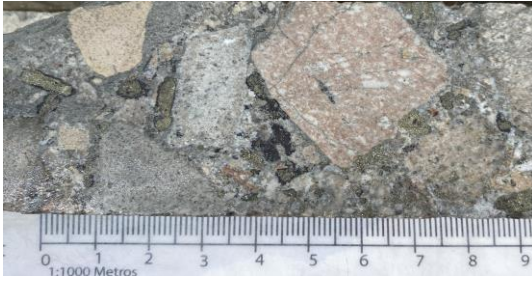
M34 (Asociada a CT34, ANEXO N°2)	DDHBUF-20B	Tramo 696 a 706; muestra en metro 700.5
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita altamente porfídica (40%) con fenocristales de plagioclasa caolinitizados y menores máficos no distinguidos; Alteración: El tramo comienza en un halo qz-caolinitico, que transiciona en el metro 700 hacia un ledge de qz-alunita-caolinita>dickita (5%), esta última reemplazando plagioclasas y en cúmulos. Se reconocen en todo el tramo leves cavidades con cuarzo oqueroso, las cuales en ocasiones son rellenas por sulfuros; Mineralización: Pirita-enargita (8:2, 8% total) en el halo externo. Al entrar al ledge, aumenta hasta un 20% en promedio, concentrada en cúmulos y vetillas con sílice amorfa, reconociéndose además una zona de mineralización masiva de hasta 20 cm. Existen leves patinas azuladas, especialmente sobre pirita, las cuales se reconocen como calcosina (1%).</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo de hasta 14 centímetros con un 80% de sulfuros totales, consistiendo en un entrecrecimiento de pirita (45%) enargita (20%) y tenanita (15%). La pirita parece presentarse en dos etapas de mineralización; por un lado, en estrecha paragénesis con los cúmulos de enargita-tenanita, y por otro en venillas que cubren el tramo. Se reconocen leves patinas (1%) de calcosina gris azulada, sobre cristales de enargita, con textura de reemplazo.</p>		

M35 (Asociada a CT35, ANEXO N°2)	DDHBUF-17	Tramo 566 a 572, muestra en metro 569.3
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha volcanoclástica monomítica con inyecciones puntuales de brecha freática oligomítica con líticos andesíticos; Alteración: Halo cuarzo-caolinítico con hasta un 5% de pirofilita en cúmulos y vetillas finas junto a sílice; Mineralización: Hasta un 8% de sulfuros concentrados en vetillas asociadas a pequeñas inyecciones de brechas y zonas de pirofilita-cuarzo, con abundante pirita cristalina anhedral, acompañada por enargita, bornita y tenantita, posteriormente superpuestas por digenita.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 569.0 y 569.5, se reconoce una zona de abundantes vetillas cortando una roca caja volcanosedimentaria, asociadas a sílice y pirofilita. Se reconoce hasta un 17% total de sulfuros, consistiendo en estructuras centrales de pirita (12%), enargita (1%), bornita (1%), tenantita (1%), sobre las cuales se desarrolla en una fase probablemente posterior digenita (2%), en un pulso que reutiliza las vetillas.</p>		
M36 (Asociada a CT36, ANEXO N°2)	DDHBUF-48	Tramo 534 a 540; muestra en metro 537.6
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Volcarenita feldespática que transiciona a una brecha volcanosedimentaria (clastos de 3 cm), cortada localmente por una brecha freática polimítica con clastos de hasta 7 cm altamente angulosos; Alteración: Halo caolinítico con cúmulos menores de dickita (4%), la cual principalmente se concentra en la zona cortada por la brecha freática. Posteriormente, se detecta una zona de falla de hasta 5 metros, con alteración argílica totalmente pervasiva; Mineralización: En la zona cortada por la brecha freática, se reconoce pirita en vetillas y diseminada (8%) con leves patinas de calcosina sobre ella. Al pasar a la zona de falla, la mineralización sulfurada aumenta hasta un 20% total, observándose pirita>enargita>calcosina, esta última a modo de reemplazo sobre la pirita en pequeñas venillas de hasta 5 mm.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo contenido en una zona de falla, pervasivamente alterada a arcillas con desarrollo de rellenos de pirofilita y vetillas de sílice masiva. Localmente, se reconoce hasta un 30% total de sulfuros, con pirita (20%) cumulada y diseminada ocasionalmente acompañada por enargita (6%) sobre todo en las zonas más fracturadas. La calcosina (4%) se desarrolla a modo de venillas de color gris azuladas que reemplazan localmente a la pirita.</p>		
M37 (Asociada a CT36, ANEXO N°2)	DDHBUF-95	Tramo 572 a 578; muestra en metro 576.0
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Andesita porfídica intruída por una brecha freática polimítica; Alteración: Halo cuarzo-caolinítico con contenidos menores de dickita-pirofilita y abundantes vetillas de sílice, que son más abundantes en zonas fracturadas (posible falla normal); Mineralización: Vetillas de pirita con enargita-tenantita asociadas que son superpuestas por bornita y en menor medida por calcosina/digenita (Hasta un 10% total de sulfuros, 7% Py, 1.5% Bn; 1% En-Tnt, 0.5% Cs). Localmente hay una zona de hasta 1 metro en el borde de la brecha</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Sección ubicada en la transición desde una brecha freática a roca andesítica, con profunda alteración a cuarzo-caolinita>dickita>pirofilita, estos dos últimos minerales a modo de vetillas que acompañan a la mineralización junto a sílice. Hasta un 30% total de sulfuros (24% pirita, 4.5% bornita, 1% enargita, 0.5% calcosina/digenita, trazas de tenantita y calcopirita). Textura de reemplazo de la calcopirita y la bornita sobre la pirita. La relación textural entre la calcosina/digenita y la bornita es compleja y requiere revisión en estudio microscópico.</p>		

M38	DDHBUF-95	Tramo 444 a 450, muestra en metro 448.6
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Pórfido dacítico con hasta un 5% de ojos de cuarzo; Alteración: Halo de qz-caolinita con abundante contenido de dickita (10%) reemplazando plagioclasas y en leves cúmulos de coloración verdosa. Vetillas finas de sílice cortan toda la roca; Mineralización: Ocurrencia casi totalmente en vetillas, que van desde muy finas hasta los 1.5 cm, compuestas por un núcleo de pirita-caolinita-dickita-sílice. El volumen total de sulfuros es de un 8%, siendo un 7% pirita, 0.3% enargita concentrada en el centro de las vetillas y 1.7% calcosina reemplazando ambas fases.</p>	
	<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo de 20 centímetros con hasta un 25% de mineralización sulfurada concentrada en un sistema de vetillas subparalelas, las cuales contienen pirita (20%) acompañada por cuarzo y dickita como parte de la estructura central, viéndose acompañada por enargita (1%) con pátina iridiscente en las zonas centrales y posteriormente venas de calcosina (4%) metálica sectil sellan la veta tanto por los bordes como siguiendo la estructura central.</p>	
M39	DDHBUF-17	Tramo 688 a 700; muestra en metro 692.3
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha ígnea altamente polimíctica, de masa fundamental hipabisal y clastos con un tamaño medio de 1 cm, de composición andesítica; Alteración: Superposición de una alteración Qz-caolinita>clorita sobre zonas de alteración potásica previa, asociado a la presencia de magnetita junto a probable biotita secundaria. y zonas de alta diferencia textural; Mineralización: Pirita abundante, alcanzando hasta un 15% en cúmulos y diseminada masivamente. Desde el metro 691 se reconocen cúmulos de pirita-magnetita-calcopirita en relación 5:2:1.</p>	
	<p>Descripción de la muestra</p> <p>Asociado a secciones remanentes de alteración potásica se reconoce una zona con hasta un 15% de mineralización, consistente en pirita (7%) en paragénesis con magnetita (5%) de coloración negra brillante. Los cristales de calcopirita (3%) se ven aparentemente rodeados por las dos fases previamente descritas, prevaleciendo en las zonas centrales. Presuntamente ciertas zonas que presentan raya rojiza pueden corresponder a magnetita sufriendo un proceso de martitización hacia hematita.</p>	
M40 (Asociada a CT40, ANEXO N°2)	DDHBUF-48	Tramo 458 a 470; muestra en metro 464.7
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha hidrotermal monomíctica con matriz arcillosa y cemento de dickita-pirofilita-sulfuros; Alteración: Halo cuarzo-caolinitico, el cual afecta considerablemente a los clastos de la brecha. Dickita (9%) y pirofilita (1%) en cúmulos y rellenos. La sílice se concentra en agregados junto a las vetillas y en algunas cavidades oquerosas; Mineralización: Hasta un 7% de sulfuros, en vetillas, cemento de brecha y cúmulos de arcillas, consistiendo en agregados de pirita-enargita superpuestos localmente por calcosina.</p>	
	<p>Descripción de la muestra</p> <p>Localmente ente el metro 464.5 y 465.0 se reconoce una zona de alteración pervasiva a Qz-caolinita-dickita, en la cual se desarrolla mineralización sulfurada sobre todo a modo de cemento de la matriz y menores vetillas finas, alcanzando un 15% total. Se logra reconocer una fase dominante de enargita (4,5%), la cual es superpuesta por agregados centrales y en los bordes de calcosina. La pirita (10%) parece presentarse acompañando a ambas secuencias minerales, en lo que se reconocen texturalmente como dos etapas distintas.</p>	

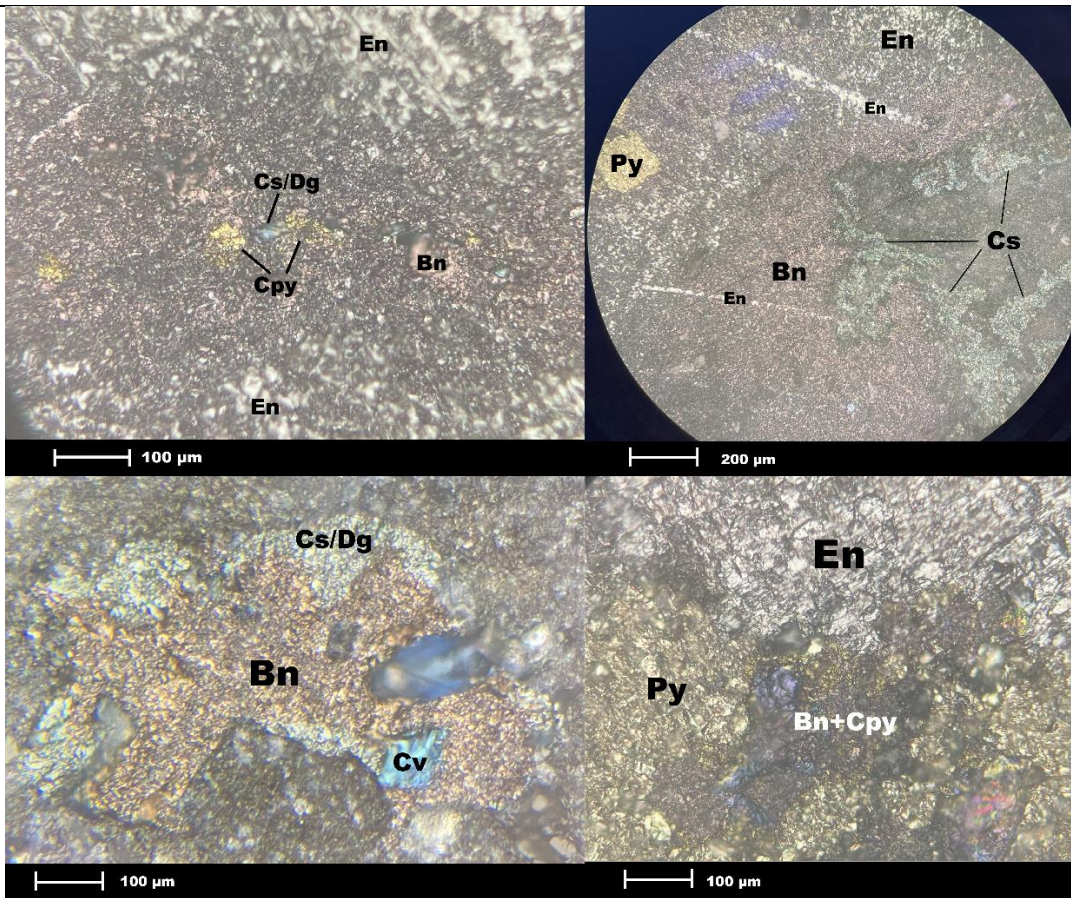
M41 (Asociada a CT41, ANEXO N°2)	DDHBUF-95	Tramo 660 a 668; muestra en metro 660.4
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha hidrotermal altamente polimictica que intruye andesitas porfídicas de grano fino; Alteración: Halo cuarzo-caolinita, aunque muy localmente se observan zonas con presencia de agregados rosáceos con alunita. La dickita y la pirofilita se presentan en rellenos y en la matriz de la brecha junto con cuarzo. Mineralización: Cerca de un 7% de volumen de sulfuros, desarrollándose sobre todo en cúmulos, cemento de brecha y vetillas finas, consistiendo en pirita (5%) y enargita (0.5%), calcopirita (0.5%) y bornita (1%).</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Se reconoce entre el metro 660.3 y 660.5 una zona en la cual se reconoce profunda alteración a cuarzo-caolinita-dickita-pirofilita, la cual se concentra tanto en los clastos de la brecha como en la matriz a modo de agregados masivos. Esto se ve acompañado por hasta un 10% de mineralización sulfurada, la cual consiste en agregados pirita (5.5%) y bornita (3%) de pátina azulada, que además puede presentarse en vetillas finas. Pequeños cristales de enargita (0.5%) y calcopirita masiva (1%) aparecen esporádicamente en las zonas centrales de los agregados sulfurados.</p>		
M42	DDHBUF-17	Tramo 650 a 664; muestra en metro 652.5
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Pórfido dacítico con abundantes ojos de cuarzo y plagioclasas sericitizadas; Alteración: Si bien la generalidad del tramo presenta cuarzo-sericita-arcillas, existen zonas caoliníticas intercaladas en tramos cortos, lo que nos da a entender una superposición de estas sobre la anteriormente descrita; Mineralización: En vetillas finas y diseminada, alcanzando hasta un 6% total de pirita con leve enargita, tenantita y calcopirita asociadas, siendo reemplazadas por calcosina (1%), las cual se concentra en la estructura central de las vetillas.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Muestra de 15 centímetros en la cual se reconoce un pórfido dacítico con pervasiva alteración a cuarzo-caolinita>dickita, el cual contiene hasta un 8% total de sulfuros diseminados y vetillas finas formadas por una estructura central de pirita (4.9%), con leves cristales de enargita/tenantita (0.1%) y trazas de calcopirita. Sobre estas, se dispone aparentemente cubriendo las vetillas calcosina (2.5%), aunque la relación textural entre este último mineral y los cristales remanentes de enargita-tenantita es difícil de dilucidar macroscópicamente.</p>		
M43 (Asociada a CT43, ANEXO N°2)	DDHBUF-95	Tramo 384 a 394; muestra en metro 389.4
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha freática oligomictica que intruye una andesita porfídica de grano fino; Alteración: Halo qz-caolinitico con menor dickita en la matriz de la brecha, acompañada por cuarzo blanco; Mineralización: Hasta un 8% en el tramo, con ocurrencia principalmente en la matriz de la brecha, reemplazando clastos, diseminada y en vetillas. Se reconoce pirita, junto a algunos leves cúmulos de enargita y bornita, siendo estas fases reemplazadas por abundante calcosina y digenita, que reutilizan las vetillas previamente generadas.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Entre el metro 389.0 y 389.5 se reconoce una zona altamente brechizada en la cual una matriz de cuarzo-dickita-pirita>pirofilita envuelven clastos altamente obliterados, a lo que se suman vetillas finas polidireccionales. El volumen total de sulfuros es de hasta un 15%, consistiendo en pirita (10%) con pequeños cúmulos de enargita (2%) diseminada. La bornita (2%) y calcosina-digenita (1%) se reconocen sobre todo cubriendo clastos de la brecha con mineralización de pirita, en una relación textural difícil de dilucidar, aunque se asumen posteriores a la fase de enargita.</p>		

M44 (Asociada a CT44, ANEXO N°2)	DDHBUF-49	Tramo 550 a 556; muestra en metro 553.0
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Corresponde a una brecha hidrotermal representada por inyecciones finas de cuarzo-alunita que cortan una roca caja andesítica; Alteración: Halo Qz-caolinitico con menor pirofilita en rellenos y dickita reemplazando la roca caja. Locales zonas con alunita en inyecciones hidrotermales;</p> <p>Mineralización: 5% total de volumen de sulfuros concentrados en vetillas y a modo de cemento en las inyecciones de brecha, consistiendo en pirita-enargita con relación 8:2 y menor tenantita ocasionalmente. Se reconoce esfalerita, concentrada sobre todo diseminada en los tramos con mayor volumen de sulfuros.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Zona local de cuarzo-alunita dentro de halo cuarzo-caolínitico asociado a la inyección de una vetilla que concentra hasta un 12% total de sulfuros para el tramo; esta consiste en un agregado central de pirita, enargita (2%), tenantita (1%) y pirita (8%), la cual se reconoce también diseminada hacia las zonas laterales de la estructura central con menor enargita. La relación textural de la enargita y la tenantita parece indicar un crecimiento conjunto en agregados cristalinos finos. Esfalerita (1%) puede encontrarse tanto acompañando a la pirita diseminada como ocasionalmente dentro de la vetillas, con su hábito característico dodecaedrico subhedral.</p>		

M45 (Asociada a CT45, ANEXO N°2)	DDHBUF-13	Tramo 644 a 650: muestra en metro 647.0
	<p>Descripción del tramo</p> <p>Litología: Brecha freática muy polimíctica con clastos que alcanzan hasta los 5 cm, muy probablemente de temporalidad pre-mineral; Alteración: Halo cuarzo-alunitico, que genera alteración pervasiva en la roca, con menor contenido de dickita y caolinita; Mineralización: Hasta un 10% de sulfuros en la matriz y clastos de la brecha, consistiendo en una paragénesis de pirita:enargita:tenantita en relación 5:2:1; encontrándose pirita en varios pulsos, a veces acompañando a las otras dos fases y en otras siendo rodeada por ellas.</p>	
<p>Descripción de la muestra</p> <p>Tramo de 20 centímetros de brecha hidrotermal con hasta un 10% total de sulfuros, siendo estos cúmulos de pirita (7%) que son envueltos por enargita (2%) y tenantita (1%); aunque en ocasiones se observa también junto a estas. No es posible determinar la relación textural entre la enargita y la tenantita mediante petrografía macroscópica debido al tamaño de grano de los cristales. Ciertas venas finas de calcosina pueden cubrir o cortar a los agregados anteriormente mencionados muy puntualmente.</p>		

ANEXO N°2: Descripción de cortes transparentes – Petrografía microscópica

CT03 (DDHBUF-37, Metro 718.8)



Minerales de Ganga (55%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (57%), caolinita y arcillas similares (17%), alunita (10%), cuarzo primario (6%), pirofilita (6%), dickita (3%), otros (1%)

Observaciones: Los cúmulos mayores de sulfuros están relacionados a zonas de relleno acompañados de cuarzo primario, reconociéndose que estos rellenan oquerosidades previas al desarrollo de la alteración de cuarzo sec.-alunita-pirofilita.

Minerales Metálicos (45%)

Porcentajes: Pirita (56%), Bornita (25%), Enargita (9%), Calcosina/Digenita (7%), Calcopirita (4%), Tenantita (2%), Trazas de Covelina.

Secuencia Paragenética: Bornita-pirita±calcopirita±tenantita → Enargita-calcosina-pirita → Covelina

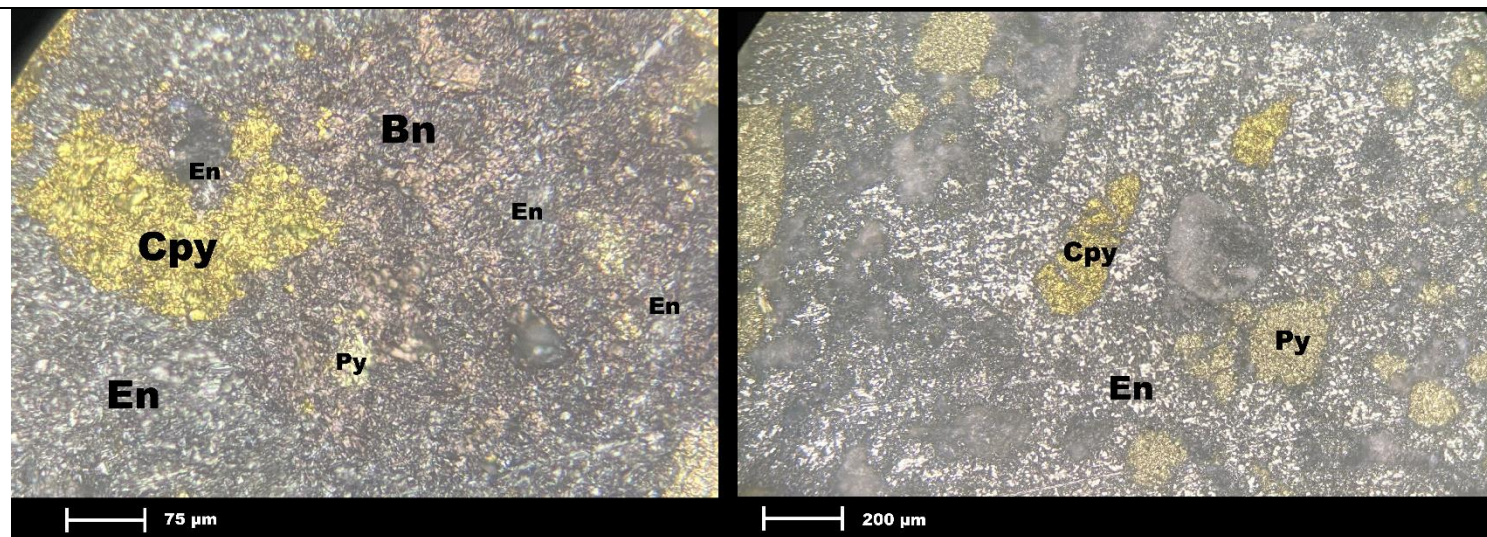
Desarrollo de vetillas de hasta 2mm y cúmulos de bornita, acompañada por pirita fina diseminada y calcopirita-tenantita localmente, en masas cristalinas masivas conjuntas.

Posterior evidencia de texturas de reemplazo tipo *coating* de calcosina/digenita en los bordes de la bornita, y enargita, desarrollándose diseminada en la totalidad del corte, así como relleno de fracturas dentro de los cúmulos a modo de masas irregulares. En ciertas vetillas de enargita pueden reconocerse fragmentos aislados orientados remanentes de bornita.

La enargita puede presentarse tanto masivamente como con su característico hábito prismático subhedral, este último sobre todo en las vetillas, con un tamaño inferior a los 50 µm.

Escasas masas anhedrales de covelina se desarrollan sobre la calcosina y la enargita, en lo que se interpreta es el evento más tardío observado.

CT05 (DDHBUF-37, Metro 365.2)



Minerales de Ganga (68%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (62%), caolinita y otras arcillas (20%), alunita (13%), cuarzo primario (3%), dickita (2%), otros (1%).

Observaciones: La vetilla principal de enargita se ve estrechamente desarrollado con el desarrollo de cristales aciculares de alunita de unos 10 µm rodeándola. Las zonas donde es más abundante la caolinita están en la periferia, acompañadas de pirita.

Minerales Metálicos (32%)

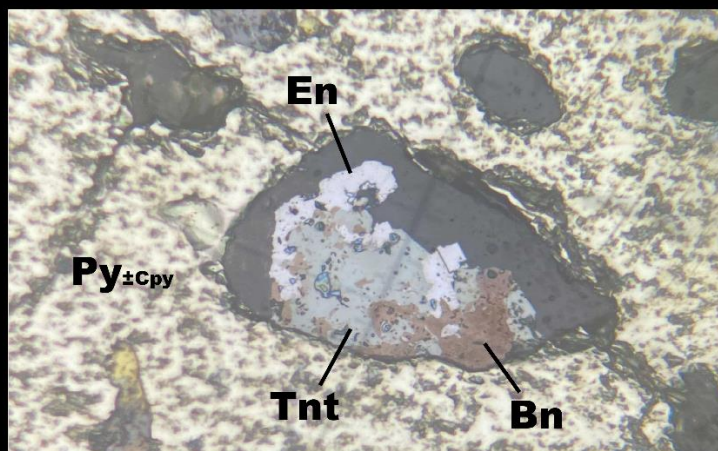
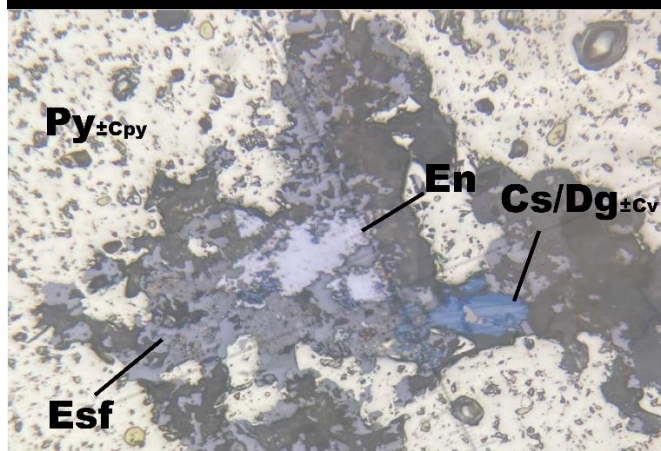
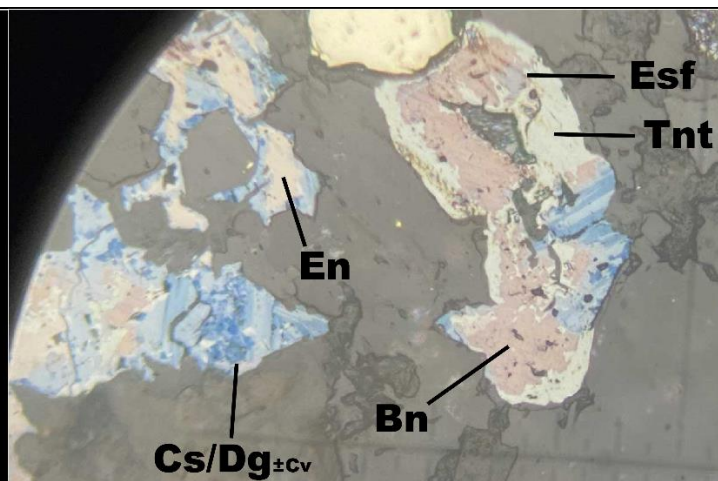
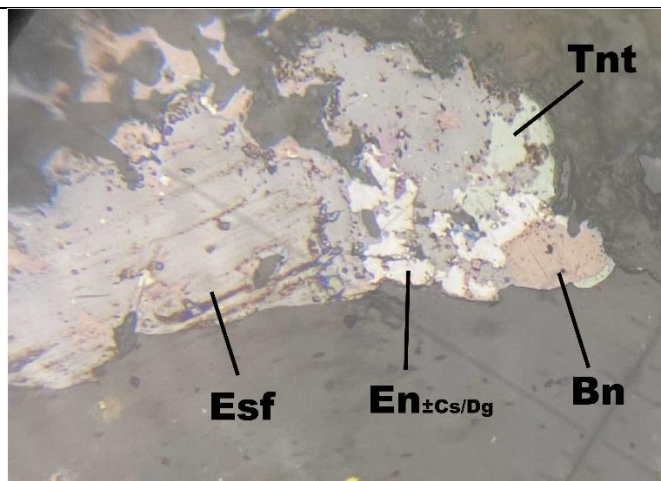
Porcentajes: Pirita (70%), enargita (23%), calcopirita (5%), bornita (1%), calcosina/digenita (1%).

Secuencia Paragenética: Pirita → Enargita±calcosina+pirita → calcopirita±bornita.

La pirita se presenta a modo de agregados de cristales finos anhedrales diseminados o bien acompañando a la enargita como cristales subhedrales gruesos de hasta 20 µm. La enargita se concentra principalmente en una veta lateral de unos 3 mm, con un hábito prismático subhedral o de cristales amorfos finos. Se ve localmente asociada a calcosina, a modo de pequeñas inclusiones y venillas.

Se reconoce el desarrollo de cúmulos de calcopirita y bornita que se entienden como una fase más tardía, debido a que pueden rellenar espacios vacíos dentro de las vetillas de enargita o generarse rodeando pequeños cristales remanentes de esta última. Esta etapa puede desarrollarse indistintamente en el borde de la vetilla como en zonas centrales asociadas a fracturas, y posee en general un hábito masivo o de cristales muy finos.

CT12 (DDHBUF-95, Metro 714.5)



Minerales de Ganga (48%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (80%), alunita (10%), caolinita y otras arcillas (5%), cuarzo primario (4%), dickita (1%).

Observaciones: La principal vetilla mineralizada está relacionada con el desarrollo de abundante alunita acicular fina.

Minerales Metálicos (52%)

Porcentajes: Pirita (55%), bornita (16%), esfalerita (12%), calcopirita (7%), tenantita (5%), enargita (3%), calcosina/digenita (2%), trazas de galena y covelina

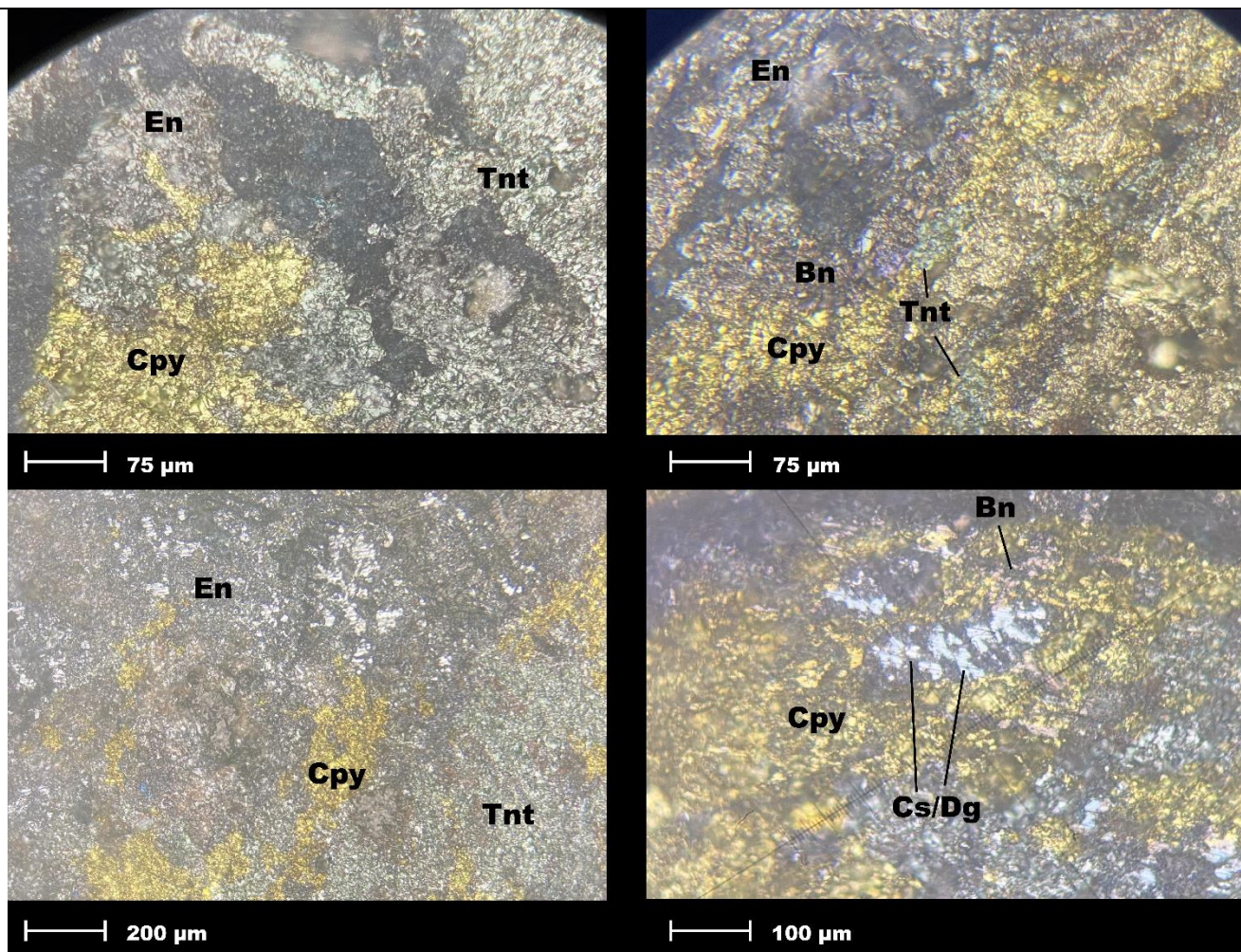
Secuencia Paragenética: Pirita → bornita+pirita+esfalerita+calcopirita±galena → tenantita → enargita+calcosina+covelina.

Corte en el cual se desarrolla pirita masiva, principalmente relleno de espacios y en vetillas finas, con menores inclusiones de calcopirita-esfalerita en cavidades. Diseminada hacia los bordes de la pirita la paragénesis anteriormente descrita comienza a desarrollarse en agregados de hasta 1 mm, sumándose además bornita y trazas de galena.

Una vetilla central, que se reconoce levemente posterior, consiste en abundante esfalerita masiva más bornita con menor calcopirita, la cual es sucesivamente reemplazada primero por tenantita y luego por enargita-calcosina-digenita. Estas últimas fases mencionadas pueden contener pequeñas inclusiones de covelina.

Los reemplazos que efectúan las fases de sulfuración más elevada no solo se presentan a modo de bordes, si no también utilizando fracturas para ingresar a los agregados previos y en bordes que penetran zonas de debilidad cristalográfica.

CT13 (DDHBUF-36, Metro 696.9)



Minerales de Ganga (33%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (56%), alunita (16%), caolinita y otras arcillas (14%), dickita (12%), cuarzo primario (2%)

Observaciones: Abundantes cúmulos de dickita se emplazan entre cúmulos de mineralización sulfurada, en lo que puede representar un evento contemporáneo de precipitación de fases.

Minerales Metálicos (66%)

Porcentajes: Pirita (55%), calcopirita (25%), tenantita (7%), bornita (4%), calcosina/digenita (1%), trazas de esfalerita

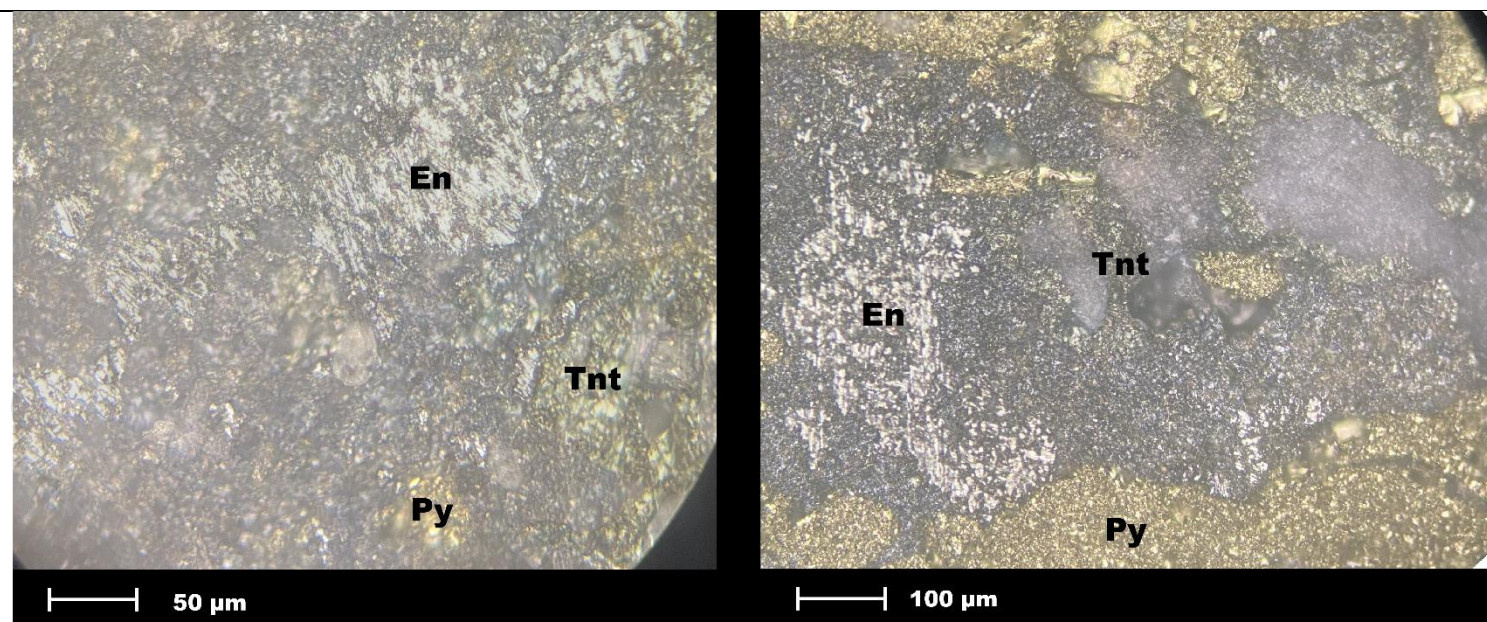
Secuencia Paragenética: Pirita+calcopirita+tenantita+bornita → enargita+pirita → calcosina/digenita

Mineralización masiva de pirita en cúmulos de hasta 5 mm de diámetro, además de acompañando varias vetillas finas de calcopirita+tenantita+bornita, formando agregados masivos conjuntos. Puede establecerse texturalmente un desarrollo conjunto de los tres minerales mencionados anteriormente.

Una etapa posterior de enargita rodea tanto los cristales de pirita como las zonas laterales de las vetillas, además de presentarse diseminada, en rellenos, inyectándose en fracturas y en finas venas que cortan calcopirita. Esta etapa se ve acompañada por pirita subhedral de grano más grueso que la descrita anteriormente.

La etapa más tardía reconocida consiste en calcosina/digenita reemplazando tanto bornita-calcopirita en los bordes como inyectándose en ciertos cristales de enargita siguiendo los planos de exfoliación.

CT22 (DDHBUF-48, Metro 686.6)



Minerales de Ganga (72%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (57%), dickita (15%), alunita (12%), caolinita y otras arcillas (10%), cuarzo primario (3%), pirofilita (2%)

Observaciones: La veta principal en la cual se concentran los sulfuros se encuentra rodeada por agregados de cuarzo secundario muy fino estilo mosaico, masas de dickita de hasta 1 mm y alunita acicular muy fina.

Minerales Metálicos (28%)

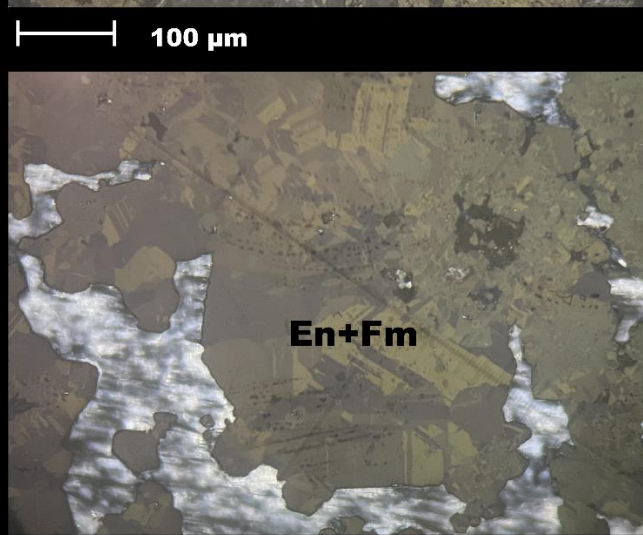
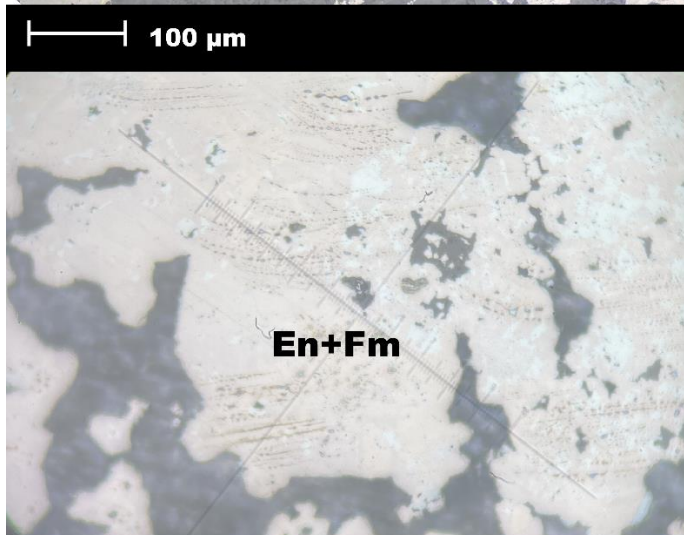
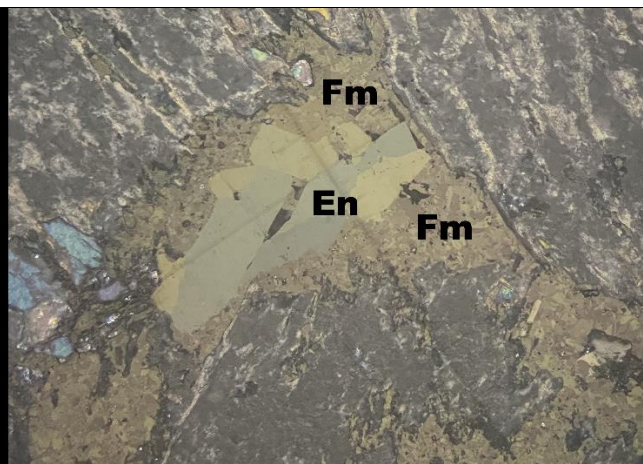
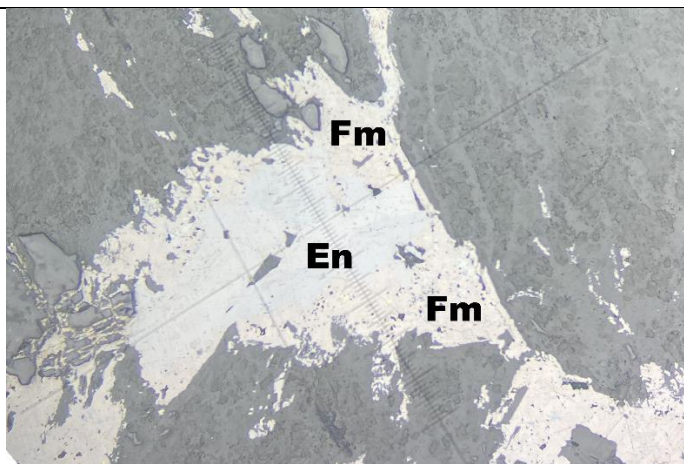
Porcentajes: Pirita (60%), enargita (18%), tenantita (10%), bornita (10%), calcosina/digenita (2%)

Secuencia Paragenética: Pirita+tenantita+bornita → enargita ± calcosina/digenita

Cúmulos de pirita subhedral, entre los cuales se desarrollan vetillas de unos 100 µm con la paragénesis tenantita-bornita, en agregados cristalinos masivos finos. La bornita presenta pátinas de oxidación en colores azulados a violetas.

Posterior a esto, se reconoce el desarrollo de cristales subhedrales de enargita, la cual puede presentarse también masiva. Las texturas de reemplazo asociadas a esta consisten tanto en el relleno de espacios en las vetillas de tenantita-bornita, en general siguiendo una dirección cristalográfica determinada, como también en los bordes de estas y entrando por fracturas hacia la estructura central. Puede estar acompañada por calcosina/digenita, la cual principalmente ocurre como bordes en la bornita.

CT24 (DDHBUF-21, Metro 310.2)



Minerales de Ganga (48%)

Porcentajes: Alunita (35%), caolinita y otras arcillas (30%), dickita (16%), cuarzo secundario (15%), yeso (2%), epidota (1%), celadonita (1%)

Observaciones: Los sulfuros se concentran principalmente dentro de una zona de abundante alunita acicular gruesa y dickita en los bordes de los cúmulos mineralizados. Agregados levemente coliformes de cuarzo-arcillas-dickita.

Minerales Metálicos (52%)

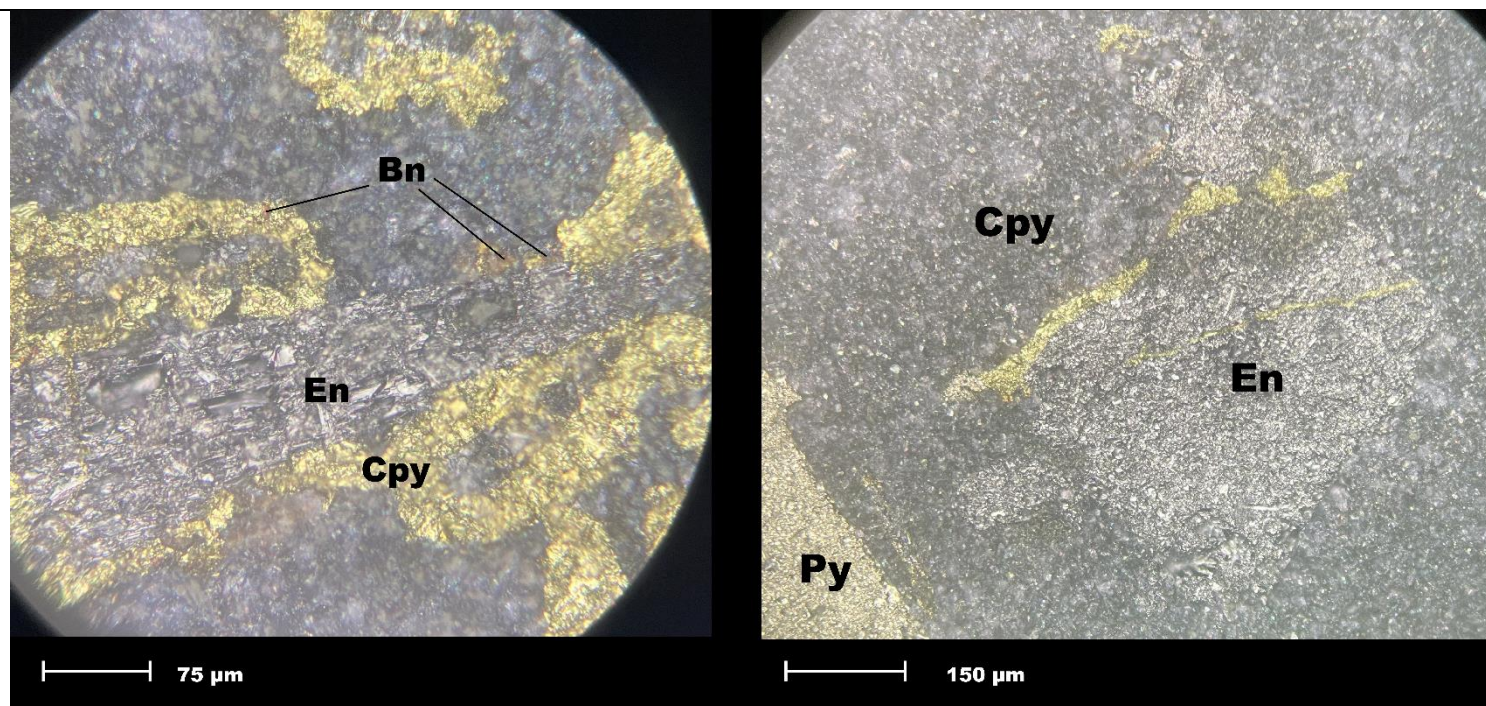
Porcentajes: Pirita (40%), famatinita (32%), enargita (28%), trazas de calcopirita, esfalerita y bornita.

Secuencia Paragenética: Pirita+enargita → Pirita+famatinita (Leve diferencia temporal)

Desarrollo de cristales prismáticos gruesos (2mm) euhedrales a subhedrales de enargita. Pueden encontrarse también en agregados aciculares finos, levemente radiales y agregados angulosos asociados a rellenos de dickita-cuarzo-alunita. Esta fase puede encontrarse relacionada a pirita en vetillas y rellenos finos, en general masiva.

La famatinita puede reconocerse tanto en solución sólida con la enargita (ya sea esta sin seguir direcciones preferenciales del cristal o a modo de exsoluciones lamelares en el sentido del clivaje), o bien como bordes en esta. Dado este último factor se reconoce como una fase levemente posterior. Su hábito es de cristales anhedrales finos formando masas compactas, y siempre aparece asociada a la enargita. Esta fase puede estar acompañada por pirita más gruesa y subhedral.

CT25 (DDHBUF-49, Metro 370.8)



Minerales de Ganga (66%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (37%), alunita (25%), caolinita y otras arcillas (20%), dickita (10%), cuarzo primario (5%), pirofilita (3%)

Observaciones: Los agregados cristalinos de cuarzo-alunita son muy finos, con un tamaño de grano inferior a los 5 μm, y se concentran en general reemplazando plagioclasas. Dickita-pirofilita suele rodear a los cúmulos mineralizados

Minerales Metálicos (34%)

Porcentajes: Pirita (72%), enargita (20%), calcopirita (7%), bornita (1%), trazas de calcosina/digenita.

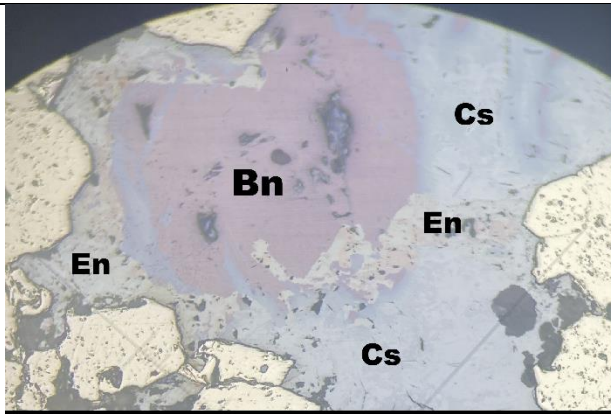
Secuencia Paragenética: Pirita → pirita+enargita ± calcosina/digenita → calcopirita ± bornita

Corte dominado por pirita masiva con tamaño de hasta 2 mm. Esta fase se reconoce anterior a la de pirita subhedral de tamaño de grano cercano a los 20 μm asociada a enargita, debido a que bordes de este último mineral se desarrollan sobre las primeras mencionadas.

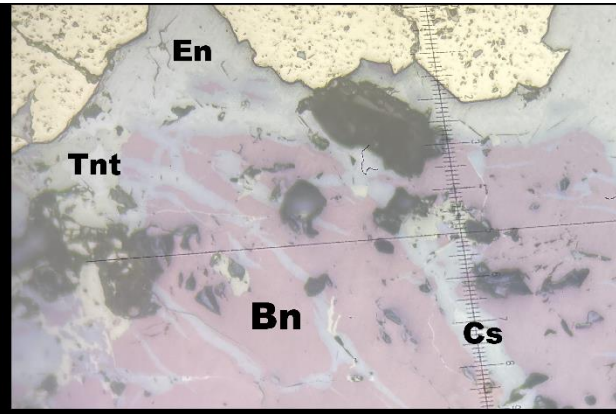
La enargita puede encontrarse ya sea diseminada, en agregados de cristales finos, reemplazando pirita o más comúnmente en cristales subhedrales a euhedrales que pueden alcanzar un tamaño de hasta 100 μm. Ocasional calcosina puede reconocerse entre los cristales de enargita, sobre todo inyectándose en fracturas.

La calcopirita y menor bornita se desarrollan reemplazando a la enargita de varias formas, siendo la más dominante a modo de bordes, pero también inyectándose en direcciones preferenciales del cristal, rellenando fracturas y en venillas asimétricas hacia el cristal.

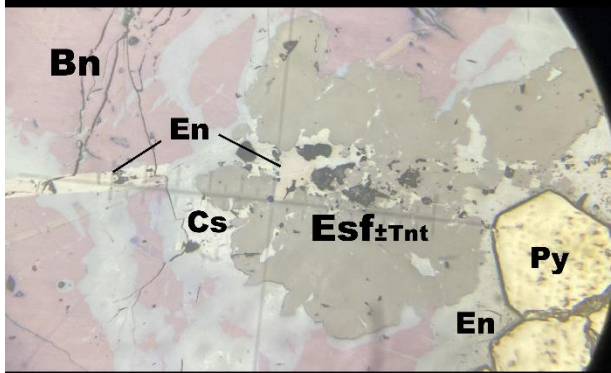
CT26 (DDHBUF-20B, Metro 559.5)



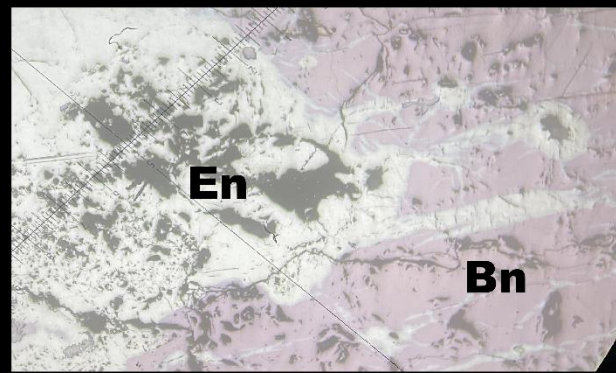
100 μm



75 μm



100 μm



75 μm

Minerales de Ganga (72%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (40%), alunita (28%), cuarzo primario (10%), caolinita y otras arcillas (10%), pirofilita (6%), dickita (6%)

Observaciones: La veta mineralizada principal se ve rodeada por agregados de cuarzo secundario en mosaico que contienen a su vez alunita gruesa prismática alargada. Ocasional pirofilita se desarrolla rellenando espacios.

Minerales Metálicos (28%)

Porcentajes: Pirita (35%), calcosina/digenita (25%), bornita (23%), enargita (15%), tenantita (1%), esfalerita (1%), trazas de calcopitita

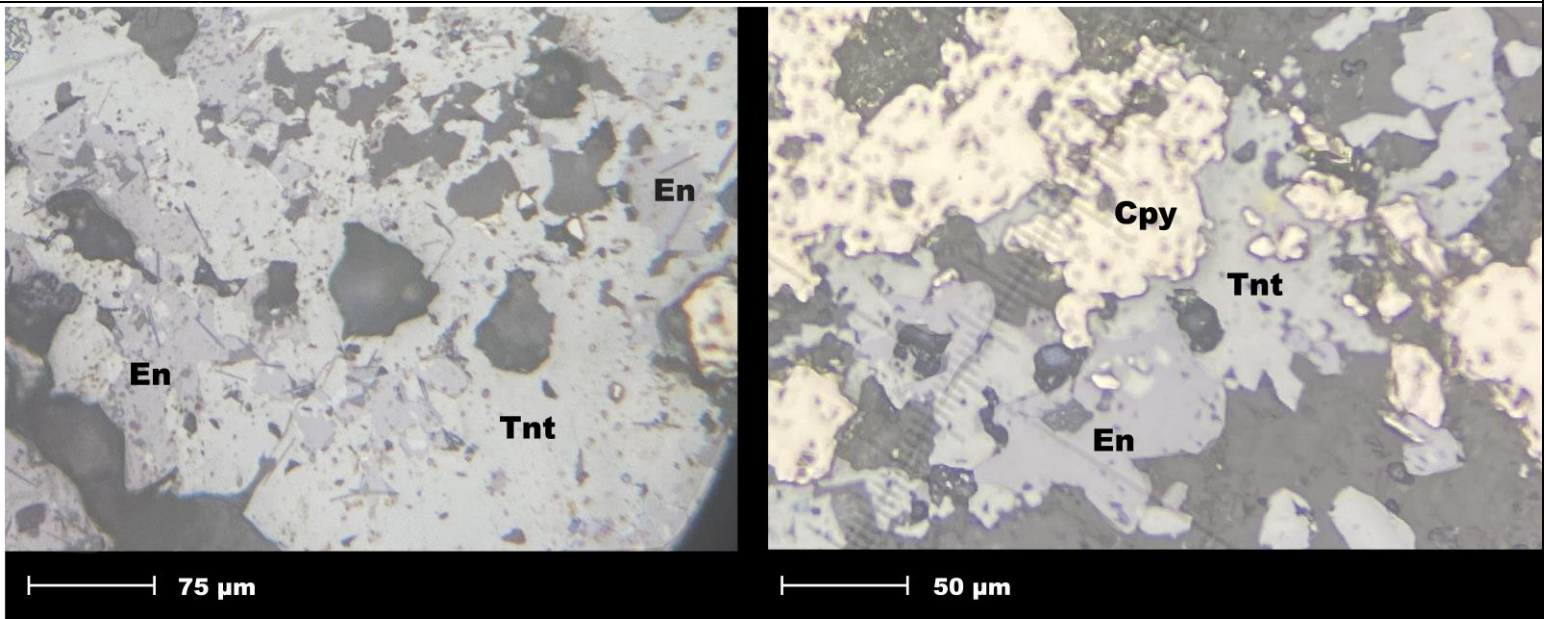
Secuencia Paragenética: Bornita ± calcopirita-esfalerita → tenantita → enargita + calcosina/digenita

Corte dominado por una veta central que contiene cristales isla remanentes de bornita, con pátina de oxidación purpura, con tamaño de hasta 1 mm. Estos se ven completamente rodeados y/o cortados por inyecciones de calcosina/digenita.

La enargita se desarrolla tanto de forma masiva como en cristales anhedrales alrededor de la estructura central, generando una zonación lateral de la veta hacia una sulfuración más elevada. En ocasiones puede reconocerse una interfase de tenantita en el contacto entre la enargita y la bornita.

La relación textural entre la enargita y la calcosina es compleja, pues en la mayoría de las ocasiones la enargita se ubica bordeando a los halos de este último mineral que reemplazan bornita, pero puede también contener inclusiones y rellenos en sus fracturas de calcosina. Es por esto que se determina muy probablemente que ambas se forman en eventos temporales estrechamente relacionados de aumento de sulfuración en el sistema.

CT27 (DDHBUF-48, Metro 786.6)



Minerales de Ganga (63%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (40%), alunita (30%), cuarzo primario (10%), dickita (7%), pirofilita (5%) anhidrita (5%), caolinita y otras arcillas (3%)

Observaciones: La anhidrita es abundante, lo que puede correlacionarse con la profundidad a la cual se extrajo la muestra. Además, puede reconocerse que esta mayoritariamente rellena espacios entre los demás minerales de ganga, por lo que puede interpretarse su ocurrencia tardía en la secuencia

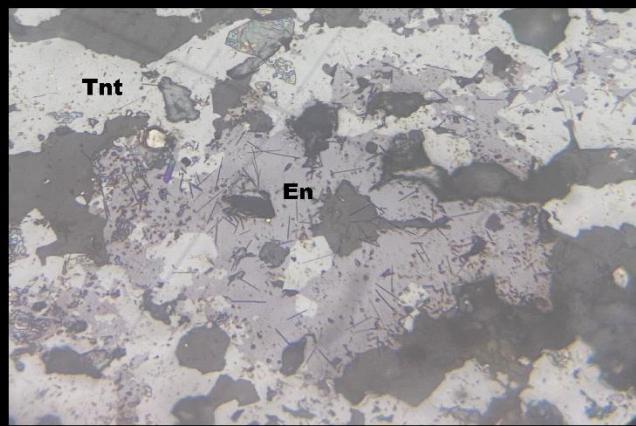
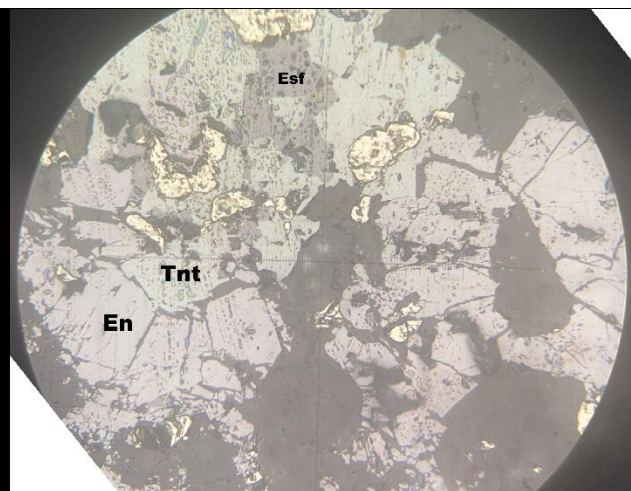
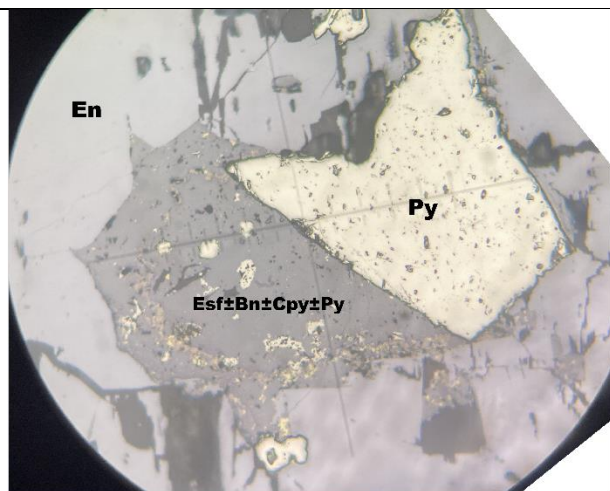
Minerales Metálicos (37%)

Porcentajes: Pirita (55%), tenantita (28%), enargita (15%), calcopirita (2%), trazas de esfalerita, bornita y galena.

Secuencia Paragenética: Pirita+ tenantita + calcopirita ± bornita-esfalerita-galena → enargita.

Veta central de unos 2 cm formada por abundante tenantita en intercrecimiento con pirita. Paralela a esta, se desarrollan múltiples vetillas finas similares. La tenantita es en general masiva a subhedral, y puede contener a modo de inclusiones pequeñas pintas de calcopirita, bornita y esfalerita. Escasos granos de galena aparecen diseminados. La pirita posee un hábito subhedral de grano medio.

Posterior a esto, inyectándose a través de las múltiples fracturas existentes en las vetillas de tenantita se desarrolla enargita reemplazándola. Esta tiene un hábito en general masivo y desde los bordes, ingresa hacia la estructura central para rellenar cavidades. Es raro observar cristales subhedrales o euhedrales como es común en otros cortes transparentes, lo que puede correlacionarse con la profundidad a la que se encuentra la muestra (Bajo la cota de 1250 m s.n.m.)



Minerales de Ganga (50%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (50%), cuarzo primario (20%), alunita (16%), caolinita y otras arcillas (6%), pirofilita (3%), dickita (3%), anhídrita (2%).

Observaciones: Se reconocen clastos de la brecha freática consistentes en agregados de arcillas tipo caolinita y cuarzo primario, los cuales a menudo son rodeados o sobrepuestos por agregados de alteración argílica avanzada de cuarzo fino y alunita.

Minerales Metálicos (50%)

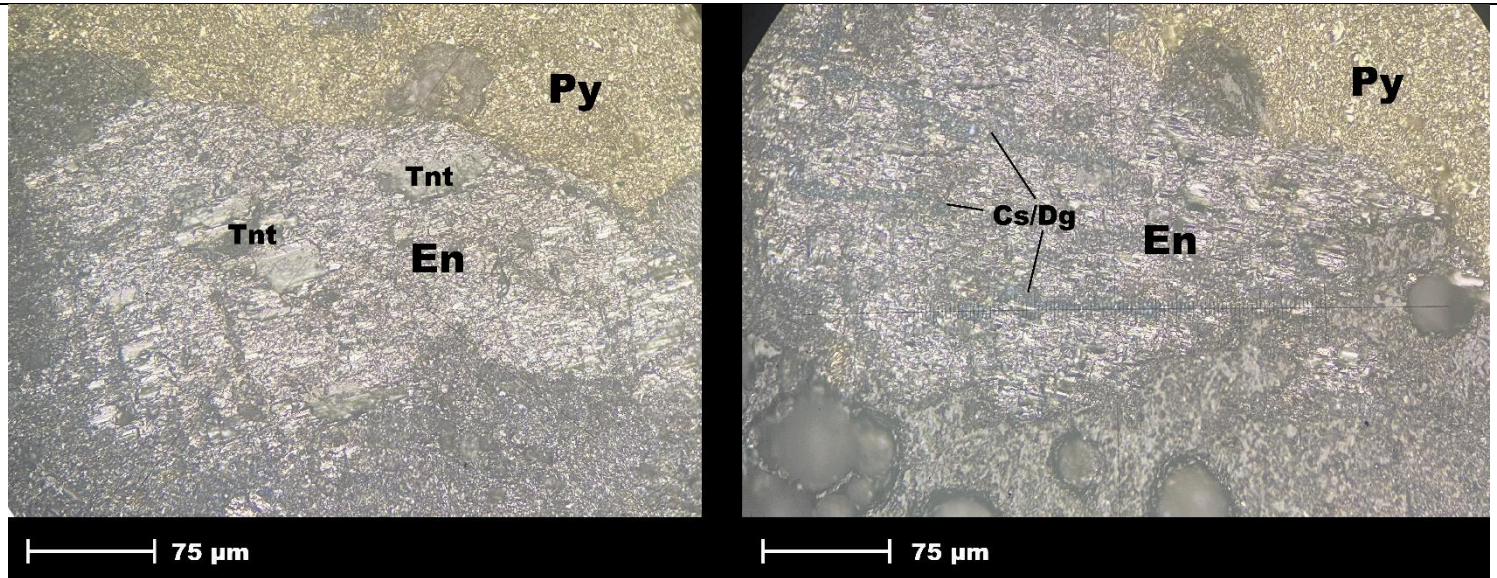
Porcentajes: Pirita (65%), enargita (30%), tenantita (10%), esfalerita (5%), trazas de galena, bornita y calcopirita.

Secuencia Paragenética: Pirita + tenantita + esfalerita → pirita + enargita.

La mineralización tiene una ocurrencia principal a modo de rellenos asociados a la matriz de una brecha freática. La etapa más temprana observada corresponde a una paragénesis de tenantita-esfalerita en agregados masivos, estando ambos minerales en solución sólida con bordes suaves. Les acompaña pirita fina, diseminada, en general de tamaño inferior a los 30 micrones.

Una etapa posterior de enargita reemplaza a la tenantita principalmente desde los bordes, y también mediante el desarrollo de cristales sobre los agregados previos. Lo más común es que los remanentes de tenantita se conserven en las zonas centrales de las masas de cúmulos y que hayan sufrido un reemplazo total hacia el exterior. El hábito de la enargita es mayoritariamente de cristales prismáticos subhedrales, aunque se observan también agregados finos de cristales amorfos, acompañada por pirita también subhedral, de mayor tamaño de grano que la descrita previamente.

CT34 (DDHBUF-20B, Metro 700.5)



Minerales de Ganga (40%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (40%), caolinita y otras arcillas (25%), alunita (20%), dickita (9%), anhidrita (3%), pirofilita (2%), calcita (1%)

Observaciones: La formación de texturas de mosaico entre los granos de mineralización pirita-enargita y los cúmulos de dickita pirofilita parecen indicar una formación contemporánea. La anhidrita es muy local y se encuentra asociada a una vetilla mineralizada.

Minerales Metálicos (60%)

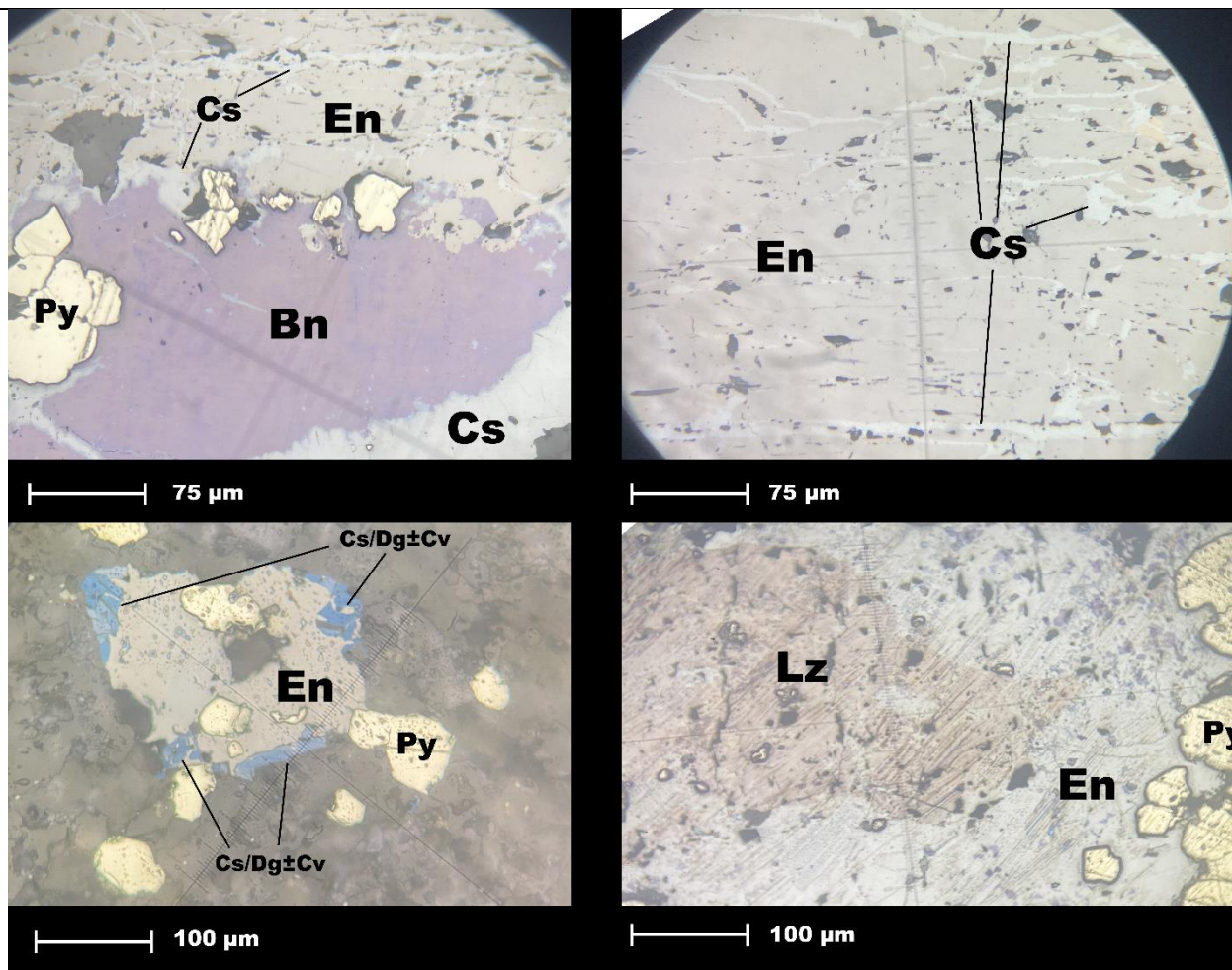
Porcentajes: Pirita (54%), enargita (32%), tenantita (8%), calcosina/digenita (4%), bornita (2%).

Secuencia Paragenética: Pirita+tenantita±bornita → pirita+enargita → calcosina/digenita.

La principal ocurrencia de la mineralización sulfurada es en cúmulos de hasta 1 mm de diámetro y menores venillas finas. La primera etapa de mineralización descrita, formada por la paragénesis de tenantita subhedral fina + bornita masiva + pirita diseminada se observa como remanentes en ciertos sectores, siendo en la mayoría de los casos reemplazadas por completo por una nueva fase de enargita-pirita masiva gruesa.

La enargita puede desarrollarse tanto como cristales prismáticos subhedrales que alcanzan hasta los 200 µm, así como en agregados cristalinos finos, y presenta evidencias de reemplazar a tenantita-bornita al generarse en los bordes de estas y/o desarrollarse relleno de fracturas dentro de las vetas previas.

La calcosina se reconoce como una fase posterior a la enargita, introduciéndose en los planos de la exfoliación en los cristales y bordeando pirita.



Minerales de Ganga (74%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (66%), alunita (20%), cuarzo primario (8%), dickita (5%), caolinita y otras arcillas (3%).

Observaciones: La principal veta con mineralización sulfurada se ve asociada a cuarzo secundario en mosaico grueso acompañado por dickita de relleno.

Minerales Metálicos (26%)

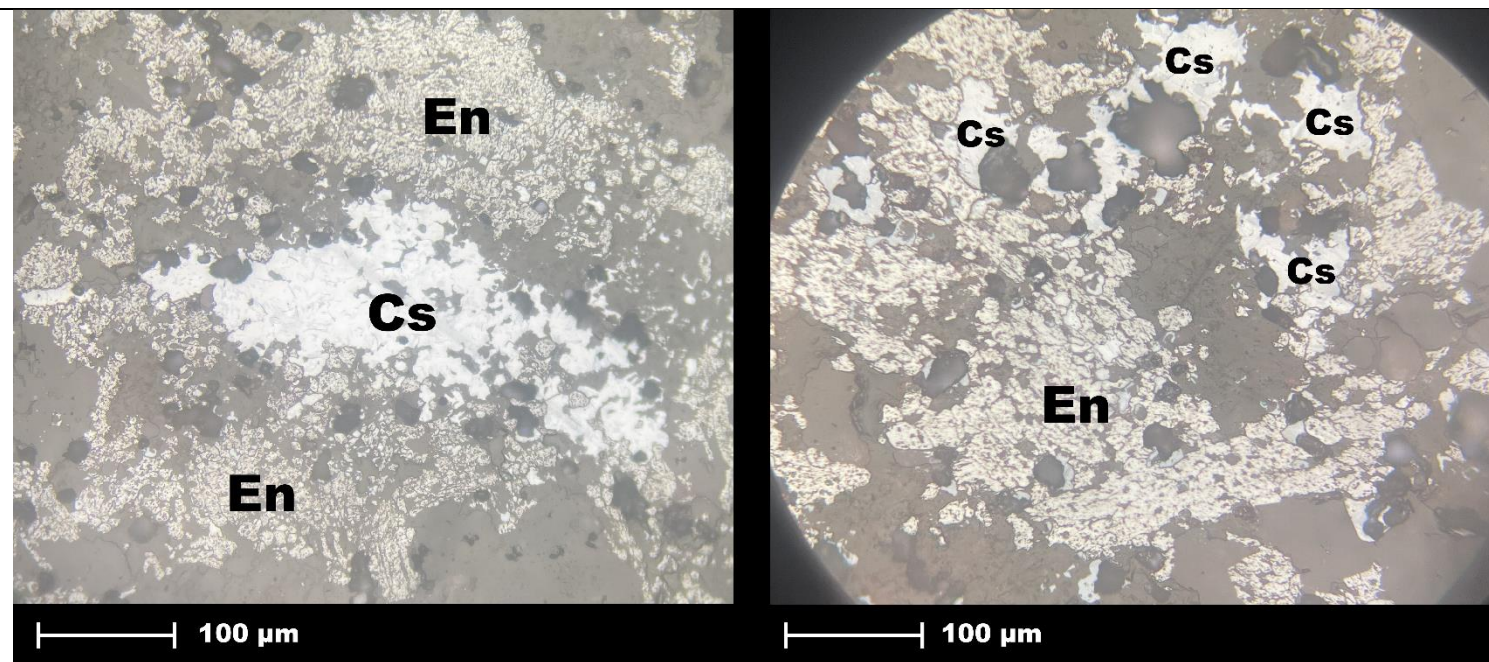
Porcentajes: Pirita (60%), enargita (14%), calcosina (13%), luzonita (7%), bornita (5%), tenantita (1%), trazas de calcopirita.

Secuencia Paragenética: Bornita → pirita+enargita+luzonita+calcosina → tenantita.

La mineralización sulfurada consiste principalmente en pirita y enargita anhedrales finas diseminadas, además de una veta principal en la cual se concentra, primeramente, una fase central de bornita con pátina purpura, la cual se ve reemplazada tanto por cristales subhedrales de enargita/luzonita como por calcosina/digenita.

Los cristales de enargita-luzonita se desarrollan mayoritariamente hacia los bordes de la veta central, y se caracterizan por presentar una solución sólida de ambas fases, probablemente ante la fluctuación de la temperatura en el fluido mineralizador. La calcosina, por su parte, puede presentarse tanto como bordes en la bornita como en vetillas que cruzan los cristales.

Una fase de tenantita, reconocida como posterior a la enargita, se desarrolla en fracturas y planos de debilidad de los cristales, además de generar cierto pseudomorfismo. La acompañan trazas de calcopirita.



Minerales de Ganga (74%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (44%), alunita (28%), cuarzo primario (12%), caolinita y otras arcillas (10%), dickita (4%), pirofilita (2%)

Observaciones: Se reconocen fracturas y oquerosidades entre los cuarzos primarios que han sido rellenadas por agregados de cuarzo secundario + alunita+ dickita + pirofilita.

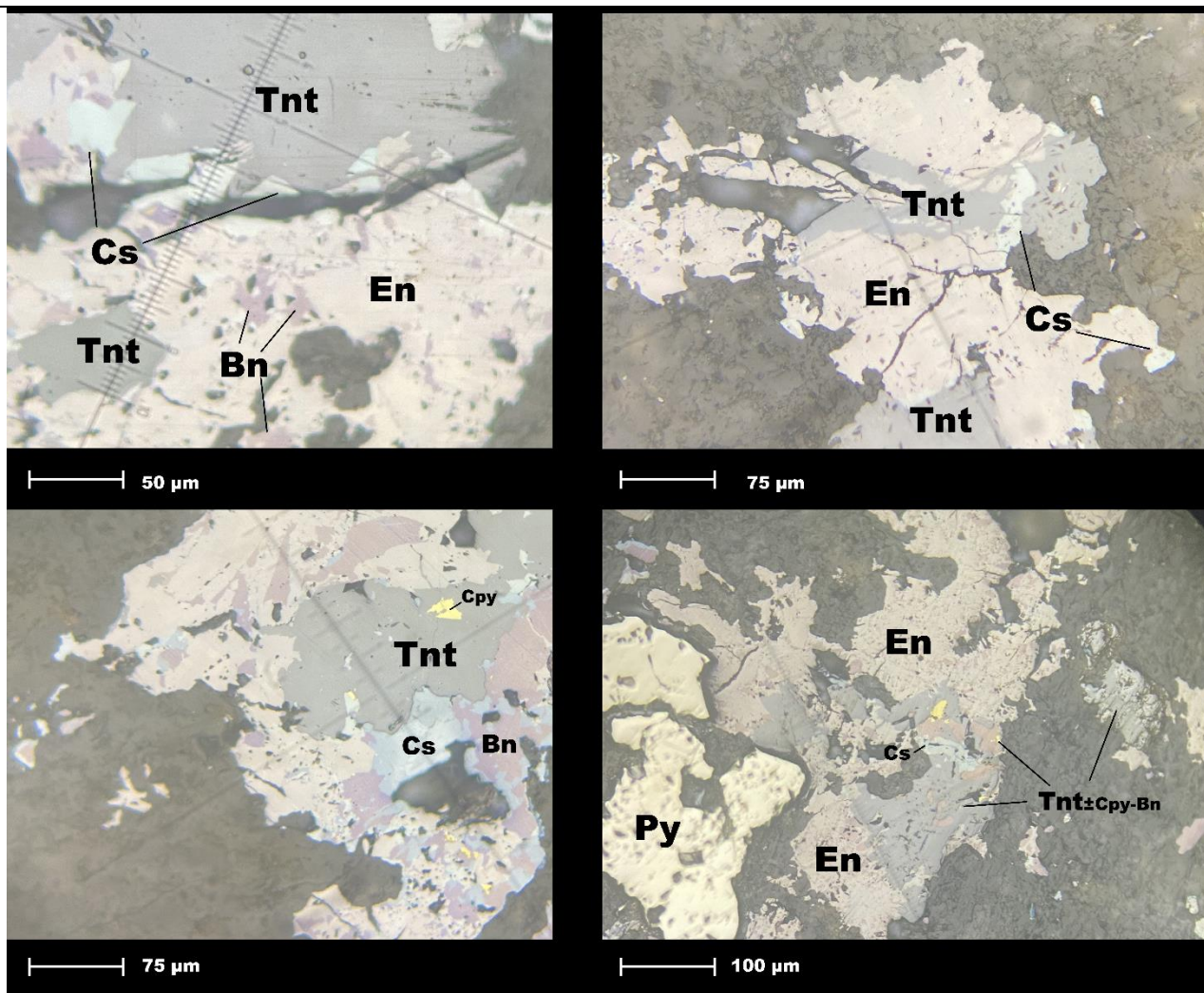
Minerales Metálicos (26%)

Porcentajes: Enargita (42%), pirita (40%), calcosina (16%), tenantita (2%), trazas de esfalerita y calcopirita.

Secuencia Paragenética: Tenantita+calcopirita+esfalerita → pirita+enargita+calcosina.

La mayor parte del corte consiste en enargita anhedral a subhedral fina diseminada, acompañada por calcosina masiva y en pequeños lóbulos de relleno. Más escasamente puede reconocerse enargita prismática fina a acicular localmente. Esta etapa de la mineralización se ve acompañada por pirita masiva a subhedral, generalmente ordenada en vetillas y rellenando espacios. Muy escasamente puede reconocerse una etapa de mineralización anterior consistente en tenantita, esfalerita y calcopirita, ocluida dentro de masas de enargita.

El análisis textural del corte, en general caracterizado por mineralización masiva o de cristales fracturados se correlaciona directamente con la zona de falla observada en el trabajo previo de observación macroscópica del sondaje.



Minerales de Ganga (30%)

Porcentajes: Alunita (42%), cuarzo secundario (38%), caolinita y otras arcillas (10%), cuarzo primario (4%), dickita (4%), pirofilita (2%).

Observaciones: Las zonas donde se concentra preferencialmente la mineralización contienen abundante alunita acicular fina rodeando los cúmulos, por lo cual se asume un proceso genéticamente relacionado entre este mineral y los sulfuros.

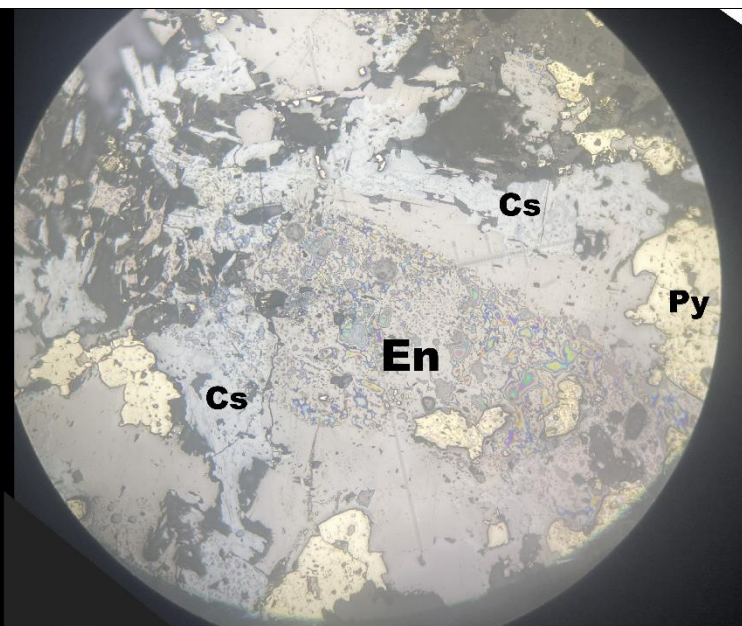
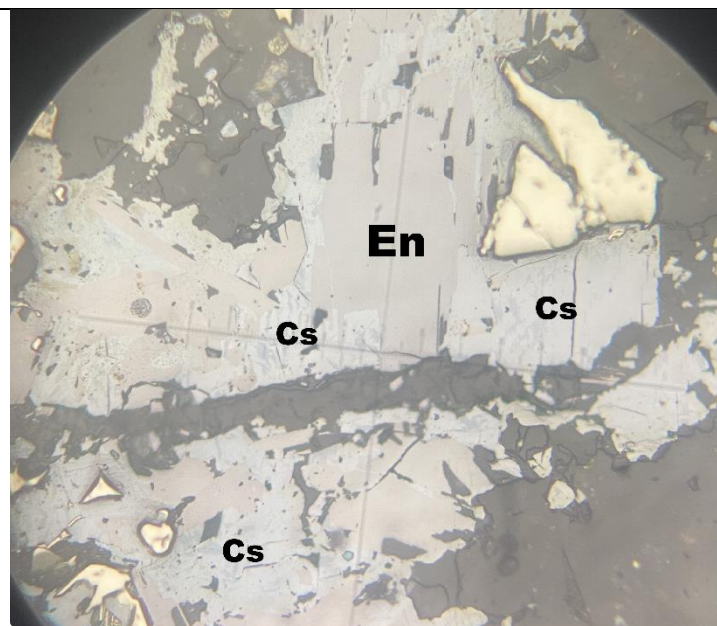
Minerales Metálicos (70%)

Porcentajes: Pirita (30%), enargita (25%), bornita (20%), tenantita (12%), calcopirita (8%), calcosina/digenita (5%).

Secuencia Paragenética: Pirita+enargita+calcosina → tenantita+bornita+calcopirita.

Se reconoce abundante mineralización de enargita, sobre todo en cúmulos de cristales prismáticos que pueden alcanzar hasta 5 mm, acompañada de pirita subhedral a redondeada. Le acompaña calcosina, en lo que se reconoce es una fase levemente posterior, relleno de fracturas y a modo de pequeñas inclusiones con bordes redondeados suaves.

Una fase que reemplaza a la anterior, formada predominantemente por tenantita con menor calcopirita y bornita, se inyecta sobre todo desde bordes fracturados hacia los cristales, desarrollándose sobre la paragénesis previa. Las texturas de reemplazo más evidentes son vetillas de tenantita cortando calcosina, pseudomorfismo sobre enargita y recristalización en las zonas más fracturadas.



Minerales de Ganga (68%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (70%), cuarzo primario (14%), caolinita y otras arcillas (8%), alunita (4%), dickita (4%)

Observaciones: Se reconocen al menos tres eventos distintos de cuarzo: El primario, remanente de la silicificación original, luego uno de grano medio en cristales pseudo-hexagonales asociado a incipiente alteración cuarzo-alunítica, y finalmente mosaicos de cuarzo fino rodeando los cúmulos mineralizados.

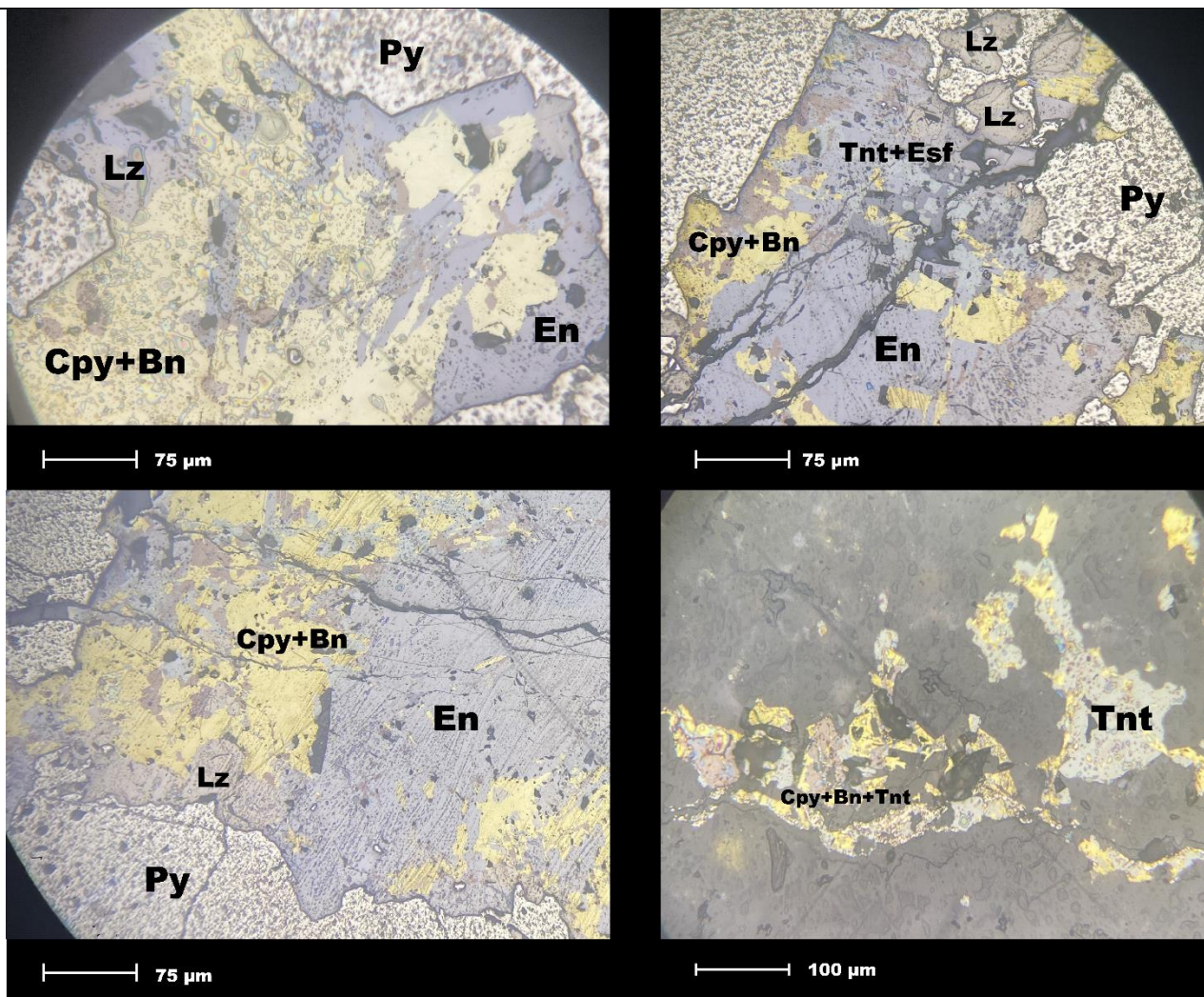
Minerales Metálicos (32%)

Porcentajes: Pirita (62%), enargita (28%), calcosina/digenita (10%), trazas de hematita y titanomagnetita.

Secuencia Paragenética: Pirita ± óxidos de hierro → pirita + enargita → calcosina.

La mineralización sulfurada ocurre principalmente en cúmulos y una vetilla de 1 mm aproximadamente. Se reconoce una fase inicial de pirita masiva gruesa, con trazas de magnetita y hematita, altamente fracturada. Con posterior se desarrolla una fase de enargita que rellena los espacios entre los granos previos de pirita y los envuelve. El hábito es de masas cristalinas granulares a cristales subhedrales, y puede estar acompañada de una fase de pirita subhedral más fina.

La calcosina se reconoce como la etapa más tardía al presentar varias texturas que evidencian reemplazo sobre la enargita, ya sea desarrollo en sus bordes, reemplazo en planos de exfoliación, pseudomorfismo y relleno de fracturas por debilidad cristalográfica.



Minerales de Ganga (79%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (72%), caolinita y otras arcillas (12%), cuarzo primario (8%), dickita (6%), alunita (2%).

Observaciones: Las oquerosidades presentes entre los cuarzos primarios (que poseen un tamaño de hasta 2 mm) se han rellenado con agregados de cuarzo secundario muy fino, dickita y sulfuros (principalmente pirita).

Minerales Metálicos (21%)

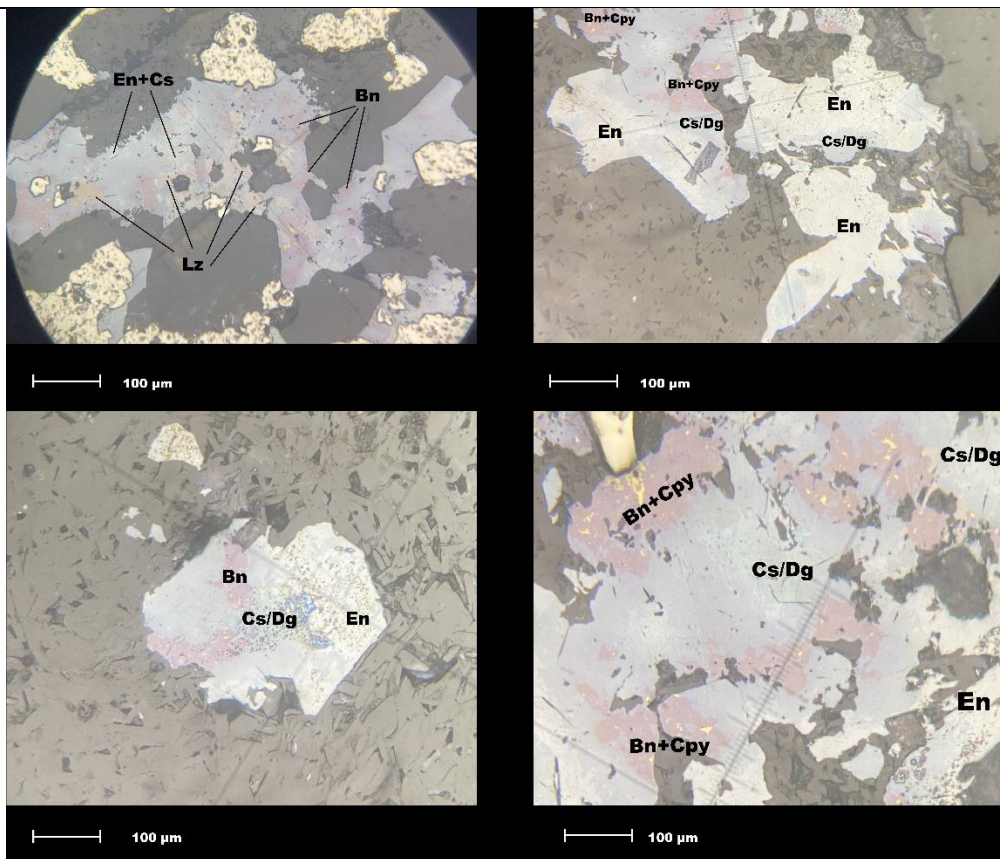
Porcentajes: Pirita (60%), enargita (14%), calcopirita (10%), bornita (9%), luzonita (3%), tenantita (3%), esfalerita (1%), trazas de galena y hematita.

Secuencia Paragenética: Pirita → calcopirita + bornita + tenantita + esfalerita → pirita + enargita.

La mineralización ocurre principalmente en cúmulos alargados, vetillas finas junto a cuarzo-dickita y diseminada. Se reconoce una primera etapa de pirita gruesa, masiva a subhedral, altamente fracturada. Entre las piritas se desarrolla posteriormente la paragénesis calcopirita-bornita-esfalerita-tenantita. Los primeros tres minerales se desarrollan de forma conjunta en complejos agregados masivos, mientras la tenantita suele aparecer en los bordes y cubriendo espacios.

Posteriormente, se reconoce el desarrollo de una fase de enargita pirita en cristales de tamaño cercano a 1 mm o masas cristalinas gruesas, que envuelven a la paragénesis de sulfuración intermedia, generando principalmente texturas de reemplazo de islas minerales con bordes angulosos y cristales remanentes de tipo “puzzle”. En zonas donde la mineralización es preferentemente diseminada la paragénesis calcopirita-bornita-tenantita se conserva en su mayoría sin ser reemplazada.

CT43 (DDHBUF-95, Metro 389.4)



Minerales de Ganga (68%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (55%), alunita (20%), cuarzo primario (16%), dickita (6%), pirofilita (2%), yeso (1%).

Observaciones: Las zonas donde la mineralización de enargita es más abundante concentran abundante alunita acicular con un tamaño de unos 10 micrones, formando agregados con cuarzo secundario y dickita.

Minerales Metálicos (32%)

Porcentajes: Pirita (45%), bornita (25%), calcosina/digenita (13%), luzonita (8%), enargita (8%), tenantita (1%), trazas de calcopirita y covelina.

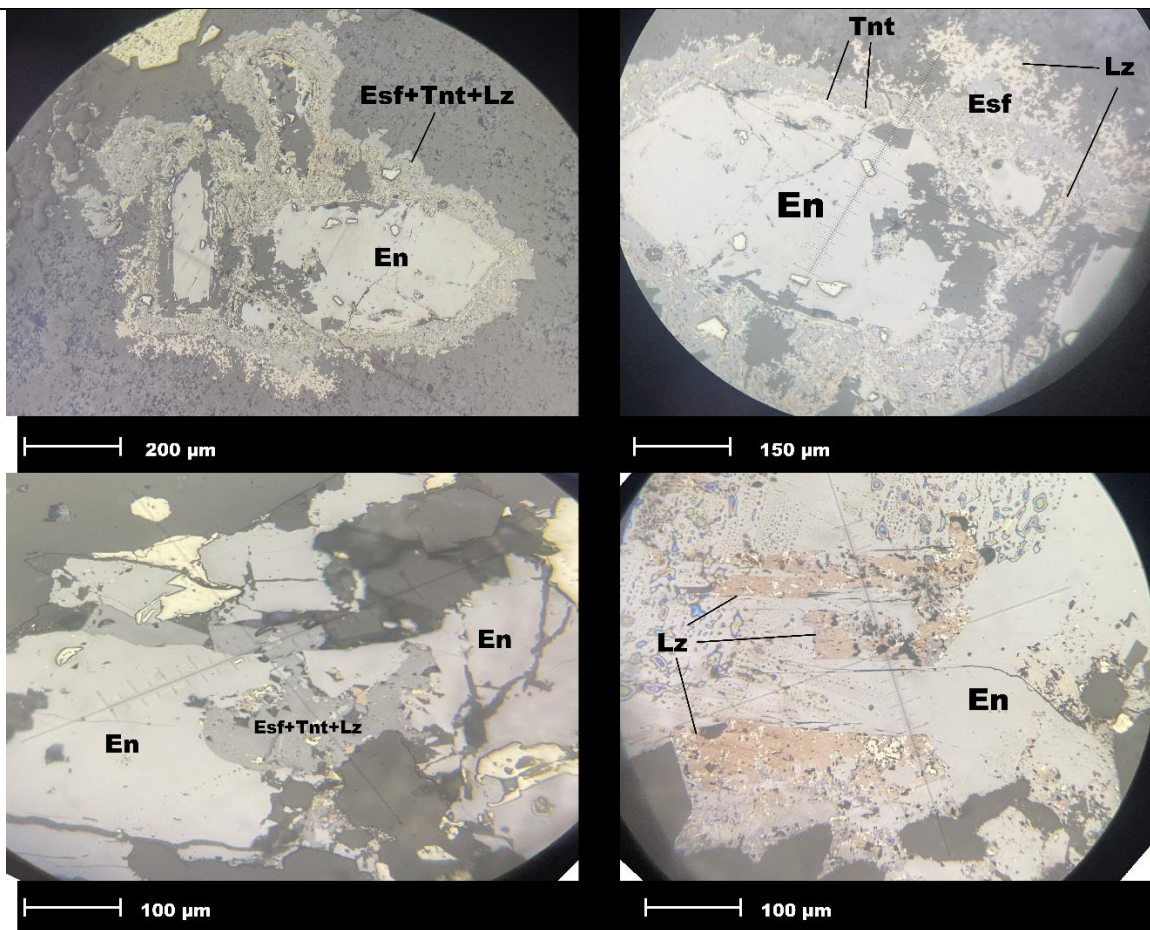
Secuencia Paragenética: Pirita + enargita → calcosina/digenita → bornita + tenantita ± calcopirita.

Mineralización principalmente en vetillas finas de pirita-enargita-enargita. La pirita se presenta como cristales subhedrales a masas alargadas y la enargita a modo de agregados cristalinos finos que rellenan espacios, con exsoluciones de luzonita.

Primeramente, se observa un reemplazo, sobre todo a modo de pseudomorfismo de calcosina sobre enargita, dejando en varias ocasiones remanentes a modo de islas de este último mineral. Los bordes de reemplazo entre ambas fases pueden ser angulosos o bien bastante suaves y redondeadas, lo que nos da a entender que ambas podrían formarse en un proceso sucesivo y temporalmente contiguos, como una sola etapa de alta sulfuración.

La relación textural de la bornita con los dos minerales mencionados anteriormente es compleja, pero se reconoce que ejerce un reemplazo sobre ellas, especialmente bordeando calcosina e inyectándose desde los bordes en cristales de enargita. Puede también, al igual que la calcosina, ejercer pseudomorfismo en cristales prismáticos y ocuparlos por completo. Está acompañada por trazas de calcopirita y en ocasiones de desarrolla junto a tenantita que bordea enargita.

CT44 (DDHBUF-49, Metro 553.0)



Minerales de Ganga (64%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (62%), alunita (38%), cuarzo primario (7%), caolinita y otras arcillas (5%), dickita (1%), pirofilita (1%)

Observaciones: Abundantes cristales aciculares de alunita acompañan la mineralización. Estos se desarrollan preferentemente siguiendo vetillas que rellenan los espacios entre los cuarzos primarios y en cúmulo rodeados por cuarzo secundario.

Minerales Metálicos (36%)

Porcentajes: Pirita (45%), enargita (26%), esfalerita (18%), luzonita (6%), tenantita (4%), calcopirita (1%), trazas de bornita y calcosina/digenita.

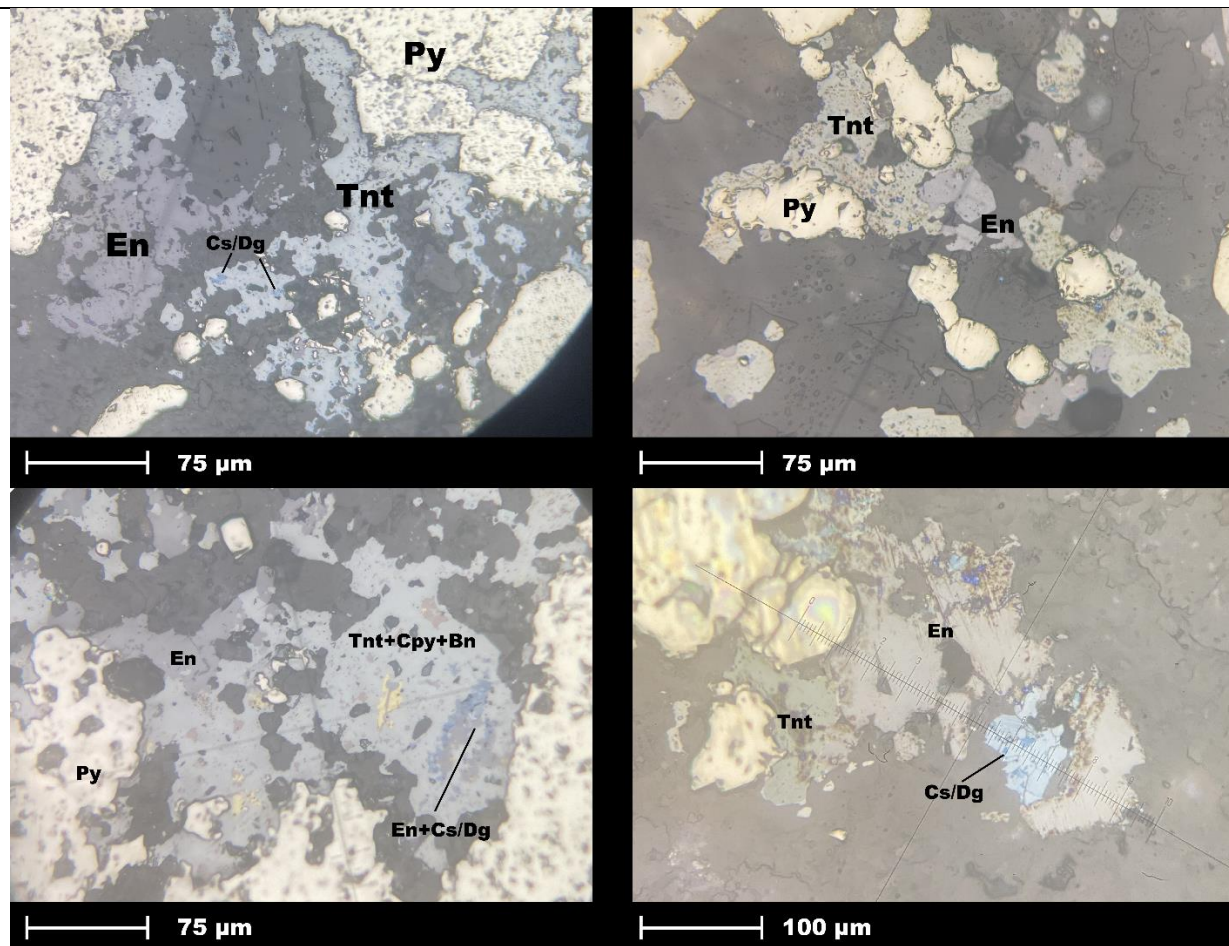
Secuencia Paragenética: Tenantita+calcopirita±bornita → pirita+enargita±calcosina → esfalerita+luzonita±tenantita±cpy.

Los primeros minerales de mena de la secuencia son remanentes de tenantita, calcopirita y bornita encontrados como islas con bordes cóncavos hacia el huésped dentro de cristales de enargita.

La fase de enargita-pirita se desarrolló a modo de grandes cristales subhedrales a euhedrales que pueden alcanzar hasta los 2 mm, con menores cristales pequeños diseminados. Esta fase puede contener a su vez trazas de calcosina en los bordes de la enargita.

Un proceso retrogrado dominado por esfalerita más tenantita y luzonita se reconoce a modo de bordes que cubren completamente a los cristales de enargita, o bien como rellenos en sus fracturas. La esfalerita masiva con blebs de calcopirita, mientras la tenantita puede estar en vetillas de relleno o agregados cristalinos finos. La relación textural de la luzonita con las demás fases es compleja, pues mayoritariamente aparece como inclusiones en ambas, pero puede también formarse como agregados que rodean a la esfalerita, en lo que podría ser un nuevo ascenso de la sulfuración en el sistema.

CT45 (DDHBUF-13, Metro 647.0)



Minerales de Ganga (74%)

Porcentajes: Cuarzo secundario (58%), alunita (20%), cuarzo primario (5%), dickita (4%), pirofilita (2%), caolinita y otras arcillas (1%).

Observaciones: Se reconocen cúmulos de cuarzo secundario muy fino y alunita acicular alargada que rellenan las oquerosidades entre los cristales de cuarzo primario. Posterior dickita parece rellena los espacios restantes junto a pirita masiva.

Minerales Metálicos (26%)

Porcentajes: Pirita (60%), tenantita (20%), enargita (14%), calcosina/digenita (4%), calcopirita (1%), covelina (1%), trazas de bornita y esfalerita.

Secuencia Paragenética: Pirita → pirita+tenantita±calcopirita±bornita±esfalerita → enargita+calcosina±covelina.

La mineralización del corte se concentra principalmente alrededor de cúmulos de pirita gruesa subhedral, que consiste en la primera etapa de mineralización visible, también concentrada en menor medida en vetillas. Esta pirita es rodeada e intersectada desde los bordes por una fase de tenantita masiva o en agregados finos, acompañada por pirita amorfa.

La tenantita suele ser reemplazada desde los bordes por la paragénesis enargita-calcosina, aunque otras texturas de reemplazo bastante comunes son el relleno de cavidades dentro de los cristales, reemplazo desde las fracturas y cristales con remanentes orientados. Sin embargo, varios cristales presentan esta asociación más bien a modo de soluciones solidas con bordes suaves, así como relaciones de corte complejas, lo que puede dar a entender que el evento de tenantita-enargita-calcosina ocurrió en un pulso temporalmente relacionado y como parte de la misma etapa evolutiva de la mineralización desde sulfuración intermedia a elevada.