



ESCUELA DE
GEOLOGÍA

**ESTUDIO DE LA PARAGÉNESIS MINERAL Y OCURRENCIA DE LA
PLATA EN EL DEPÓSITO ESTRATOLIGADO Cu-(Ag) PORTALES,
REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE**

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para optar al
Título de Geólogo

JAVIER ANDRÉS MALLEA LILLO

Profesora guía:

GISELLA PALMA LIRA

Miembros de la Comisión Evaluadora de Examen:

IGNACIO MAUREIRA JOFRÉ

EDUARDO SALAZAR ARIAS

SANTIAGO, CHILE

AGOSTO 2023

ESTUDIO DE LA PARAGÉNESIS MINERAL Y LA OCURRENCIA DE LA PLATA EN EL DEPÓSITO ESTRATOLIGADO Cu-(Ag) PORTALES, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE

La mina subterránea Portales, corresponde a un depósito estratoligado Cu-(Ag), hospedado en rocas sedimentarias de la Franja Cretácica, a lo largo de la Cordillera de la Costa del centro de Chile. Aunque este yacimiento ha estado en producción desde aproximadamente 1940, hasta la fecha no se han llevado a cabo estudios mineralógicos detallados.

El objetivo principal de esta tesis es caracterizar mineralógicamente la litología, alteración hidrotermal y mineralización de la mina Portales, a través de la descripción de muestras de mano y secciones transparentes-pulidas. Además, se examina la ocurrencia y distribución del cobre, la plata y la materia orgánica mediante observaciones y análisis de química semicuantitativa utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM). Asimismo, se presenta una columna estratigráfica esquemática de la litología que hospeda el yacimiento y una secuencia paragenética que resume los principales eventos de alteración hidrotermal y mineralización.

La secuencia sedimentaria que hospeda la mineralización se compone de lutitas, fangolitas y areniscas. Además, se identifican al menos cuatro eventos de mineralización/alteración hidrotermal que formaron el yacimiento Portales. El evento de pre-mineralización se caracteriza por la presencia de bitumen, pirita y pirita framboidal. Este primer evento es seguido por el evento principal de mineralización de cobre y plata (Evento I), en el cual precipitan la mayoría de los sulfuros del sistema, incluyendo bornita, calcopirita, calcosina-digenita, galena y stromeyerita. Durante esta etapa también se observan reemplazos de calcosina por bornita y, en menor medida, de bornita por digenita. El segundo evento de mineralización (Evento II) involucra un extenso y generalizado reemplazo de bornita y galena por calcopirita. El último evento de mineralización es de carácter supérgeno y se caracteriza por la formación de hematita, así como por el reemplazo local de bornita por digenita y covelina.

Los resultados de este estudio sugieren que la mineralización en la mina Portales presenta un fuerte control tanto litológico como estructural. El mecanismo de precipitación y acumulación de sulfuros es fundamentalmente por reducción de los fluidos mineralizados con la materia orgánica (bitumen y restos fósiles plantas) contenida en las lutitas y fangolitas. De manera subordinada, la disolución y reprecipitación de los carbonatos que conforman las areniscas calcáreas actúan como agentes de neutralización de los fluidos mineralizados. Los análisis SEM sugieren que la plata se incorpora preferentemente como solución sólida en bornita y calcosina-digenita, así como micropartículas de stromeyerita y posiblemente clorargirita.

SOLO USO ACADÉMICO

*“Para ver el Mundo en un grano de arena
y el Cielo en una flor silvestre
abarca el infinito en la palma de tu mano
y la eternidad en una hora.”*

William Blake

*“Cuando otras personas esperan que nosotros seamos
como ellos quieren, nos obligan a destruir a la persona
que realmente somos. Es una forma sutil de matar”*

Jim Morrison

“La mayor gloria no es no caer nunca, sino levantarse siempre”

Nelson Mandela

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesora guía Gisella por su apoyo incondicional, por hacer más agradable el proceso de aprendizaje, motivarme a aprender y seguir adelante con este trabajo hasta concretarlo, gracias por creer en mis capacidades. También agradecer a mi comisión, Ignacio Maureira y Eduardo Salazar por su ayuda, disposición y el tiempo dedicado a lo largo de este proceso. Además, a la empresa minera Cerro Negro S.A. y su equipo de trabajo, los cuales tuvieron una muy buena disposición, y también a Cabrera que hizo posible el nexo con la empresa.

A mi hermana, Francisca a quien le copie tanto la carrera como la dieta vegetariana y las ganas de aprender didgeridoo, gracias por tu apoyo desde que teníamos el club luna, por motivarme y convencerme siempre de que puedo más. A mi hermano Nicolas, por acompañarme a caminar cuando el estrés ya no daba más, por maratonear y ver estrenos de anime, por siempre estar.

A mi Madre, Susana Lillo, una mujer icono, una guerrera, un espíritu indomable y fuerte, pero en fondo blanda y tierna como abuelita, gracias por apoyarme en cada proceso de mi vida y siempre creer en mí, gracias por todo lo que me has dado, gracias a ti he aprendido mucho sobre la vida. A mi Padre, Juanito, por enseñarme lo básico y a pesar de todo siempre brindarme una mano, por creer en todas mis ideas alocadas y decirme que si a todas, que todo es posible.

Un agradecimiento especial a las michis que han sido parte de mi vida universitaria, Morita una gatita muy tierna y dócil, con tanto cariño por entregar, gracias por acompañarnos durante los momentos más difíciles en la casa, chimuela, te extraño siempre. Nami, la regalona de la casa, por acompañarme en todos mis trasnoches y darme mucho amor, te amamos, aunque destruyas todo, eres el alma de la casa y una de mis motivaciones más grandes.

Gracias a mis amigos de la vida Diego, JP, Araya, Nacho y Toto, que, aunque no hablemos mucho, ambas partes sabemos que siempre estamos uno para el otro, gracias por escucharme y entenderme en muchas ocasiones.

A las amistades que me dejó la universidad, en especial a todo al mejor grupito 420/Formación Oficial, sin ustedes mi vida universitaria no hubiera sido lo mismo, gracias por tremendas juntas y todos los momentos vividos.

A los grandes amigos que he ganado durante los últimos 7 años Max C, Seba, Jorge, Nacha Yasky, Shaggy, Diego N, Cata, Dani, Conchita, Pablito, Chelo, Wis y a todos los pibes, gracias por ser parte de este proceso y por el apañe incondicional en todo momento.

Finalmente agradecer a todos los que me ayudaron un poco en momentos de discusión científica y en laboratorio, gracias Mati S, Nacho N, Raul U y en especial a Raul Alee que sin tu ayuda las descripciones hubieran sido eternas. Gracias a todas las personas que fueron parte de este largo camino, me llevo un montón de enseñanzas y cariño.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Presentación y Formulación Del Problema	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivos Generales	3
1.2.2. Objetivos Específicos	5
1.3. Hipótesis	5
1.4. Metodología	5
1.4.1. Compilación Bibliográfica	5
1.4.2. Trabajo en Terreno	6
1.4.3. Obtención y Preparación de Muestras	7
1.4.4. Microscopía Óptica	7
1.4.5. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	7
1.5. Ubicación y Accesos	8
1.6. Marco Tectónico	9
2. Marco Geológico	9
2.1. Geología Regional	9
2.1.1. Unidades Estratificadas	11
2.1.1.1. Formación Las Chilcas (Albiano – Campaniano)	11
2.1.2. Depósitos No Consolidados	11
2.1.3. Rocas Intrusivas	11
2.1.3.1. Superunidad Illapel	11
2.1.3.2. Unidad San Lorenzo	13
2.1.4. Estructuras	13
2.1.4.1. Dominio Central (Rivano, 1996)	13
2.1.4.2. Sistema de Fallas de Atacama	14
2.2. Geología Distrital	14
2.2.1. Formación Las Chilcas	14
2.2.1.1. Miembro Pitipeumo	14
2.2.1.2. Miembro Tabón	15
2.2.1.3. Miembro Ñilhue	15

2.2.1.4. Miembro El Calvario _____	16
2.2.2. Intrusivos _____	16
2.2.3. Estructuras _____	17
2.2.4. Alteración Hidrotermal y Mineralización _____	18
2.2.4.1. Alteración Hidrotermal _____	18
2.2.4.2. Mineralización _____	19
2.3. Estratoligado Cu-(Ag) Cerro Negro _____	19
3. Resultados _____	22
3.1. Litología _____	22
3.1.2. Lutitas bituminosas _____	23
3.1.3. Fangolitas _____	24
3.1.4. Brechas hidrotermales _____	26
3.1.4.1. Brecha hidrotermal basal _____	26
3.1.4.2. Brecha hidrotermal mineralizada _____	27
3.1.5. Areniscas _____	29
3.1.6. Dique andesítico _____	33
3.2. Materia Orgánica _____	35
3.3. Alteración Hidrotermal _____	36
3.4. Mineralización _____	38
3.5. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) _____	41
3.5.1. Sector Renata Norte _____	42
3.5.2. Sector Blanco Este _____	46
4. Discusiones _____	49
4.1. Geología del Depósito _____	49
4.1.1. Litologías _____	50
4.1.2. Secuencia Paragenética de Alteración y Mineralización _____	51
4.1.3. Control de la Mineralización _____	55
4.1.4. Ocurrencia de la Plata _____	59
4.2. Modelo Genético _____	59
4.3. Implicancias Metalogénicas para la Franja Cretácica _____	61

5. Conclusiones	65
6. Referencias	67
Anexos	71

SOLO USO ACADÉMICO

Índice de Figuras

- Figura 1:** Distribución espacial de los principales depósitos estratoligados Cu-(Ag) dentro de la Franja Jurásica (color morado) y Franja Cretácica (color verde) de Chile. La estrella (color rosado) indica la ubicación del yacimiento Portales en donde se enfoca este estudio. Modificado de Maureira et al. (2022), Maksaev y Zentilli (2002) y Kojima et al. (2009). Sistema de Fallas de Atacama tomado de Brown et al., (1993). _____ 4
- Figura 2:** Mapa de túneles de la mina Portales. La figura muestra 4 sectores principales de la mina: Renata Norte, Renata Sur, Barbaro y Blanco Este. Las estrellas de colores indican los lugares en donde se tomaron las muestras para este estudio (P1 a P11). Modificado de shapefile de líneas facilitado por empresa Cerro Negro S.A. _____ 6
- Figura 3:** (a) Mapa de ubicación a escala continental, donde se indica con color rojo la Región de Valparaíso. Mapa elaborado con Oceans basemap en el software ArcGis v.10.8. (b) Mapa de ubicación de la mina Portales con las principales rutas y localidades. Mapa elaborado con Imagery basemap con el software ArcGis v.10.8. _____ 8
- Figura 4:** Marco tectónico durante el Jurásico y Cretácico Inferior. Tomada de Scheuber y González (1999), modificado de Jaillard et al. (1990). _____ 9
- Figura 5:** Mapa geológico regional con las principales formaciones volcanoclásticas, unidades intrusivas y zonas de alteración hidrotermal aledañas a la mina Portales. Modificado de Rivano et al., (1993). _____ 10
- Figura 6:** Columna estratigráfica generalizada de la Cordillera de la Costa. Tomada de Boyce et al., (2020) _____ 17
- Figura 7:** Plano estructural local exponiendo las principales tendencias de estructuras y diques (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018). _____ 18
- Figura 8:** Perfil representativo del depósito estratoligado Cu-(Ag) Cerro Negro. Tomado de Elgueta et al. (1990). _____ 21
- Figura 9:** Fotografía del frente de explotación del sector Renata Norte de la mina Portales. Las litologías de base a techo son: M1: intercalación de lutitas (tonalidad negruzca) y areniscas (tonalidad rojiza); M2: lutitas; M3: intercalación de capas finas de lutitas con areniscas; y M4: lutitas. _____ 23
- Figura 10:** Lutita calcárea bituminosa con cúmulos de arenisca calcárea subordinada A. Fotografía de muestra de mano. B. Rechazo de la sección transparente-pulida PO-7. Se observan claramente láminas negruzcas de materia orgánica. C. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X. Se observan láminas de bitumen de color negruzco en la lutita. D. Sección pulida

PO-7, en donde es posible diferenciar bitumen (negruzco), lutita (gris-pardo) y arenisca (rojizo).

24

Figura 11: Fangolita calcárea A. Fotografía de muestra de mano. B. Rechazo de sección transparente-pulida PO-5, en donde se aprecian cúmulos negruzcos de materia orgánica. C. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X. D. Sección transparente-pulida (PO-5), en donde se distinguen claramente los cúmulos/láminas de color negruzco correspondientes a materia orgánica. _____ 25

Figura 12: Brecha hidrotermal basal A. Fotografía muestra de mano. B. Rechazo de sección transparente-pulida PO-13, la cual presenta tonalidades rojizas producto de la hematización. 26

Figura 13: Brecha hidrotermal basal. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X la sección transparente-pulida PO-13. Se aprecia la textura brechosa y se distingue la matriz y clastos. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados. Se observa la matriz compuesta por carbonatos y polvo de roca, mientras que los clastos corresponden a fragmentos de andesita. C. Sección transparente-pulida PO-13. Se observa claramente los tonos rojizos de la roca producto de la hematización. Cb: Carbonatos; Pl: Plagioclasa. _____ 27

Figura 14: Brecha hidrotermal mineralizada. A. Fotografía de muestra de mano. B. Rechazo de la sección pulida PO-11, donde se aprecia claramente los clastos y la matriz de brecha. ____ 28

Figura 15: Brecha hidrotermal mineralizada. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X. Se reconoce la matriz (color negro) y los clastos (color pardo). B. Fotomicrografía a nicoles cruzados, donde se muestran los clastos de chert y la matriz carbonatada, con presencia de polvo de roca entre los granos de carbonatos. C. Sección transparente-pulida PO-11. Se distinguen claramente los clastos de chert con una apariencia translúcida y la matriz de tonalidades grisáceas y negruzcas. Cb: Carbonatos. _____ 29

Figura 16: Arenisca calcárea hematizada. A. Fotografía muestra de mano. En la parte superior se observa mineralización de calcopirita asociada a bitumen. B. Rechazo de sección transparente-pulida PO-17. Se observa la arenisca tonalidad rojiza y, en la parte superior la mineralización de calcopirita concordante a las láminas de bitumen. _____ 30

Figura 17: Arenisca calcárea hematizada. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X. Se observa textura clástica, clastos hematizados y cemento calcáreo. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados, en la cual se observa el cemento de carbonatos. Cb: Carbonatos. _____ 31

Figura 18: Arenisca silicificada. A. Fotografía de muestra de mano. Se observa una intercalación de bandas rojizas de arenisca y bandas de color blanquecino de sílice. B. Rechazo de la sección transparente-pulida PO-16, donde se muestran las tonalidades rojizas y blanquecinas de las bandas de arenisca y sílice. _____ 32

Figura 19: Arenisca silicificada. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X, donde se observan los clastos con textura obliterada. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados. Se distingue el cemento constituido totalmente por sílice microcristalino y cuarzo con un tamaño de grano variable. _____ 33

Figura 20: Dique andesítico micro-porfídico cloritizado. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X. Se observan fenocristales de plagioclasa (Pl), cavidades rellenas por carbonato (Cb) y clorita (Chl) alterando la masa fundamental y en menor medida a plagioclasas. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados. C. Muestra de mano con una vetilla de carbonato (Cb). _ 34

Figura 21: Fotomicrografías a luz reflejada de los dos tipos de materia orgánica. A y B. Bitumen angular grisáceo asociado con mineralización de calcopirita, bornita y calcosina. C. Bitumen globular asociado a bornita, bitumen angular diseminado y restos fósiles de plantas que alojan diseminados de bornita. D. Bitumen globular asociado a bornita y bitumen angular asociado a diseminados de bornita y calcosina. _____ 35

Figura 22: Fotomicrografías representativas de los minerales de alteración en las rocas hospedantes del sector Renata Norte. A. Cristales de cuarzo y epidota en bitumen, junto con carbonatos diseminados los cuales se disponen alrededor del bitumen. B. Cristales de plagioclasa albitizados en fangolita. C. Clorita y epidota asociado con galena (mineral opaco). D. Asociación de carbonato-epidota. Cb: Carbonatos; Ep: Epidota; Qz: Cuarzo; Ab: Albita; Chl: Clorita. _____ 37

Figura 23: Fotomicrografías representativas de los minerales de alteración hidrotermal en las rocas hospedantes del depósito Portales, sector Blanco Este. A. Carbonatos como matriz de brecha. B. Carbonatos diseminados, en vetilla y parches. Cb: Carbonatos. _____ 38

Figura 24: Fotomicrografías representativas de la mineralización sulfurada en la mina Portales. A. Bornita (Bn) siendo reemplazada por calcopirita (Ccp) en vetilla, además de calcopirita diseminada en los alrededores de la vetilla. B. Mineralización de calcopirita (ccp) en forma de "mantos" concordantes a las láminas de bitumen (Bit). Además, se observan cristales de bornita (Bn) diseminada dentro del bitumen. C. Galena (Gn) en vetillas siendo reemplazada por calcopirita (Ccp) a partir de los bordes de grano. Además, se observan cristales de calcopirita (Ccp) diseminada en los alrededores de la vetilla. D. Calcosina (Cct) siendo reemplazada por bornita (Bn), la cual a su vez es reemplazada por calcopirita (Ccp). _____ 39

Figura 25: Fotomicrografías representativas de la mineralización sulfurada en la mina Portales. A. Calcosina (Cct) en vetillas cortando a bitumen (Bit) y diseminada, además de bornita (Bn) reemplazando a calcosina (Cct) y también presente de manera diseminada. B. Bornita (Bn) asociada a bitumen globular y también alojada en porosidades de restos fósiles de planta, algunos cristales diseminados son reemplazados por covelina (Cv). C. Calcosina (Cct) diseminada

asociada a carbonatos (Cb). D. Mismo sector que "C", pero en luz transmitida y nicoles cruzados.

_____ 40

Figura 26: Fotomicrografías representativas de la mineralización sulfurada en la mina Portales.

A. Mineralización de bornita (Bn) y calcopirita (Ccp) en matriz de brecha carbonatada, donde la calcopirita reemplaza la bornita. B. Cristales de calcosina (Cct) diseminados siendo reemplazados por bornita (Bn). _____ 41

Figura 27: Microfotografía de SEM del sector Renata Norte. Los sulfuros digenita-calcosina (Dg-Cct) y bornita (Bn) se observan asociados con materia orgánica, como agregados finos o de mayor tamaño hacia los bordes de los cúmulos de materia orgánica. _____ 43

Figura 28: Microfotografía de SEM del sector Renata Norte. Los sulfuros digenita-calcosina (Cct-Dg) y bornita (Bn) se observan asociados con materia orgánica, diseminados y en vetillas. Asimismo, estos sulfuros se observan en los bordes de la materia orgánica como agregados masivos, y formando granos diseminados. También se presenta stromeyerita (Str) dentro de la materia orgánica. _____ 44

Figura 29: Microfotografía de SEM del sector Renata Norte. Los sulfuros bornita (Bn) y stromeyerita (Str) se observan asociados con materia orgánica de forma diseminada, y masivos en contacto con el borde de esta. Además, se presentan cristales diseminados de bornita (Bn) aledaños a la materia orgánica. _____ 45

Figura 30: Microfotografía de SEM del sector Renata Norte. Se observa posible clorargirita (Clor) diseminada y probablemente mezclada con micro- o nanocristales de calcita, además de calcita euhedral diseminada. La materia orgánica se presenta diseminada y también en contacto con bordes de clastos de cuarzo. Abreviaciones: Cal: calcita; Qz: cuarzo; Fsp-K: feldespatos potásicos; Clor: clorargirita. _____ 46

Figura 31: Microfotografía de SEM de brecha hidrotermal mineralizada del sector Blanco Este. Cristales de calcopirita (Ccp) y bornita (Bn) diseminadas asociadas espacialmente a materia orgánica (venillas negras) y calcita (Cal). _____ 47

Figura 32: Microfotografía de SEM de brecha hidrotermal mineralizada del sector Blanco Este. Se observa mineralización de bornita (Bn) diseminada y rellenando espacios. Adicionalmente, se distinguen cristales de bornita reemplazando pirita (Py) euhedral a subhedral con hábito cúbico e inclusiones de materia orgánica. Abreviaciones: Bn: bornita; Cal: calcita; Qz: cuarzo; Fsp-K: feldespatos potásicos. _____ 48

Figura 33: Microfotografía de SEM de brecha hidrotermal mineralizada del sector Blanco Este. Se observa una vetilla irregular de materia orgánica con bornita diseminada en sectores, cortando un cristal de bornita. Además, se aprecian carbonatos (Cal) rellenando espacios. _____ 49

Figura 34: Columna estratigráfica esquemática del yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales. A: Frente de explotación de la mina Portales, se observa una intercalación de areniscas calcáreas (rojizas) con lutitas (negruzcas). B: Bitumen globular asociado a bornita (Bn), bitumen angular diseminado y restos fósiles de plantas que alojan cristales diseminados de bornita (Bn). C: Mineralización de calcopirita (ccp) en forma de “mantos” concordantes a las láminas de bitumen.

51

Figura 35: Pirita framboidal (PyF) en areniscas grises de grano fino, mina Portales, sector Ramón (al norte del sector Renata Norte).

53

Figura 36: Secuencia paragenética de alteración hidrotermal y mineralización del yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales. Se identifican cuatro eventos principales: pre-mineralización, mineralización (Evento I y II) y supérgeno. La proporción de los minerales va de acuerdo con el grosor de las barras. Las letras sobre las barras indican los principales estilos de mineralización. Abreviaciones: C: cemento; V: vetilla; M: matriz de brecha; P: parches; V_i: vetillas compuestas por más de un mineral; D: diseminados; R: reemplazo.

55

Figura 37: Modelo de generación de hidrocarburos para el depósito estratoligado Cu-(Ag) Lorena. Extraído de Herazo et al. (2020).

57

Figura 38: Modelo genético esquemático del depósito estratoligado Cu-(Ag) Portales. La figura muestra los eventos propuestos en orden temporal para la formación del depósito Portales. Modificado de Maureira et al. (2022). Ver texto principal para mayor detalle.

61

Figura 39: Distribución de los depósitos estratoligados Cu-(Ag) de edad Jurásica y Cretácica en Chile. Los depósitos destacados con fondo amarillo tienen presencia de materia orgánica. Modificado de Vilches, (2018), Maksaev y Zentilli, (2002) y Kojima et al. (2009).

63

1. Introducción

1.1. Presentación y Formulación Del Problema

Los depósitos estratoligados Cu-(Ag) o “mantos tipo chileno” se disponen en dos franjas metalogénicas dentro de la Cordillera de la Costa del norte y centro de Chile entre los 22° y 34°S (Maksaev y Zentilli, 2002; **Figura 1**). La franja del norte (18-26°S) aloja depósitos de edad Jurásica (Kojima et al., 2009), mientras que la franja del centro (26-34°S) aloja depósitos de edad Cretácica Inferior (Zentilli et al., 1997; Cisternas y Hermosilla, 2006; Kojima et al., 2009). Este tipo de depósito corresponde a la tercera fuente de cobre (Cu) en Chile, después de los depósitos del tipo pórfido cuprífero y óxidos hierro-cobre-oro (IOCG). Adicionalmente, pueden contener concentraciones significativas de plata (Ag).

Los depósitos estratoligados Cu-(Ag) de la Franja Jurásica se hospedan en secuencias volcánicas y volcanoclásticas (por ejemplo, Formación Camarca, Oficina Viz y La Negra; Kojima et al., 2009). Los yacimientos Mantos de la Luna, Mantos del Pacífico, Buena Esperanza y Michilla (**Figura 1**) se alojan principalmente en basaltos y andesitas porfídicas de la Formación La Negra, a excepción de Mantos Blancos (**Figura 1**) que se hospeda en una serie típicamente bimodal de rocas riolíticas y andesíticas (Maksaev y Zentilli, 2002). El yacimiento Mantos Blancos corresponde al depósito de mayor tamaño dentro de esta franja, con un tonelaje de 500 Mt a una ley de 1% Cu (Sato 1984; Maksaev y Zentilli, 2002; Cornejo et al., 2006; Ramírez et al., 2006; Kojima et al., 2009). La mineralización de calcopirita, bornita, digenita y galena ocurre principalmente de forma diseminada, amígdalas, vetillas, matriz de brecha y *stockwork* (Espinoza et al., 1996).

Los depósitos estratoligados Cu-(Ag) de la Franja del Cretácico Inferior, se formaron en cuencas continentales de intra-arco durante un régimen tectónico extensional. Estos depósitos se hospedan en rocas volcánicas y/o volcano-sedimentarias con intercalaciones de lutitas, calizas y areniscas (por ejemplo, Formación Las Chilcas, Veta Negra y Lo Prado; Camus, 1990; Sillitoe, 2003; Maksaev y Zentilli, 2002; Kojima et al., 2009; Maureira et al., 2022). Los yacimientos más importantes son Lo Aguirre y El Soldado (**Figura 1**), los cuales se encuentran alojados en rocas volcánicas. Mientras que los yacimientos Cerro Negro, Talcuna, Catemu y Uchumi (**Figura 1**) se hospedan en secuencias predominantemente sedimentarias y/o volcano-sedimentarias (Camus, 1990; Elgueta, 1990; Maksaev y Zentilli, 2002; Kojima et al., 2009). En particular, el yacimiento El

Soldado contiene un tonelaje de 200 Mt a una ley de 1,35% Cu (Boric et al., 2002; Wilson et al., 2003a).

En general, la mineralización hipógena en los yacimientos estratoligados Cu-(Ag) está principalmente compuesta por calcopirita, bornita, calcosina, pirita, además de menores contenidos de esfalerita y galena. Los minerales de ganga más comunes son calcita, hematita, epidota y magnetita. En las secuencias volcánicas, se observan amígdalas rellenas de ceolitas, pumpellyita y prehnita, lo cual evidencia un metamorfismo regional de muy bajo grado (Zentilli et al., 1997; Wilson y Zentilli, 1999; Morales et al., 2005; Kojima et al., 2009; Maureira et al., 2022). Por su parte, la Formación La Negra exhibe un metamorfismo regional de muy bajo a bajo grado, evidenciado por la asociación mineral de clorita, epidota, cuarzo, sericita, prehnita, pumpellyita, ceolitas y actinolita. La alteración hidrotermal de las rocas que hospedan la mineralización corresponde a un metasomatismo sódico, seguido de una alteración cálcica, la cual puede ser difícil de diferenciar del metamorfismo regional (Losert, 1973; Sato, 1984; Elgueta et al., 1990; Kojima et al., 2003; Oliveros, 2005; Cisternas y Hermosilla, 2006; Oliveros et al., 2008).

Una de las características principales de los depósitos estratoligados Cu-(Ag) de la Franja Jurásica Cretácica es la presencia de bitumen y/o materia orgánica asociado con la mineralización, el cual actuaría como una trampa geoquímica para la precipitación de sulfuros de cobre (Elgueta, 1990; Zentilli et al., 1997; Wilson y Zentilli, 1999; Makshev y Zentilli, 2002; Herazo et al., 2020; Maureira et al., 2022). La fuente del azufre (S) en este tipo de depósitos ha sido determinada mediante isótopos estables de azufre ($\delta^{34}\text{S}$). En general, los yacimientos de la Franja Jurásica presentan valores de $\delta^{34}\text{S}$ muy cercanos a cero, lo que refleja una fuente magmática del S. Mientras que los yacimientos de la Franja Cretácica presentan valores de $\delta^{34}\text{S}$ muy negativos, lo que indica un aporte de S por reducción bacteriana de sulfatos marinos (Carrillo-Rosúa et al., 2014; Maureira et al., 2022 y referencias contenidas). Sin embargo, recientemente se reportó el primer hallazgo de pirobitumen en el yacimiento Lorena de edad Jurásica, ubicado dentro del Distrito Las Luces (Herazo et al., 2020; **Figura 1**). Adicionalmente, los análisis geoquímicos del bitumen del yacimiento Lorena revelan altas concentraciones de metales y una fuente orgánica del sulfuro (Herazo et al., 2020).

La plata es el principal subproducto en los depósitos estratoligados Cu-(Ag), sin embargo, su ocurrencia y los factores que controlan su ocurrencia y distribución han sido muy poco estudiados. De acuerdo con Reich et al. (2013) y Maureira et al. (2022), la plata se incorporaría como solución sólida dentro de sulfuros de cobre como bornita, calcopirita y calcosina, u ocurriría como nanoinclusiones “invisibles” o micropartículas de sulfuros de plata. Por ejemplo, en el yacimiento

Mantos Blancos, la bornita contiene entre 81 y 649 ppm Ag, mientras que la calcopirita contiene entre 0,61 y 2,21 ppm Ag (Reich et al., 2013).

El presente trabajo de tesis se enfoca en la mina subterránea Portales, un yacimiento estratoligado Cu-(Ag) de edad Cretácica ubicado en la región de Valparaíso (**Figura 1**), y perteneciente a la Compañía Minera Cerro Negro S.A. La mineralización de cobre y plata se encuentra hospedada en una secuencia de rocas sedimentarias de la Formación Las Chilcas, la cual se caracteriza por la presencia de abundante materia orgánica. Sin embargo, a pesar de que este yacimiento se encuentra en explotación desde aproximadamente el año 1940, hasta la fecha no se han realizado estudios mineralógicos detallados. Adicionalmente, existen escasos antecedentes geológicos sobre los depósitos estratoligados chilenos Cu-(Ag) chilenos hospedados en secuencias de rocas puramente sedimentarias.

El objetivo principal de este estudio es realizar una caracterización de la litología, alteración hidrotermal y mineralización del yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales, además de construir una columna estratigráfica esquemática de la litología que hospeda la mineralización y una secuencia paragenética que resuma los principales eventos de alteración hidrotermal y mineralización. Adicionalmente, se examina la ocurrencia de la plata y materia orgánica, y se discuten los principales factores geológicos que controlan la mineralización del sistema. Para alcanzar estos objetivos, se llevan a cabo descripciones de muestra de mano y petrocalcográficas de secciones transparentes-pulidas mediante microscopía óptica. Además, se obtienen imágenes detalladas y datos composicionales semi-cuantitativos a través de microscopía electrónica de barrido (SEM). La Franja Cretácica presenta un significativo potencial económico, por lo que este estudio pretende contribuir al entendimiento geológico de los depósitos estratoligados Cu-(Ag) del Cretácico.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

El objetivo general de este estudio es caracterizar la litología, alteración hidrotermal y mineralización de cobre y plata, así como establecer una secuencia paragenética de los principales eventos de mineralización y alteración hidrotermal que dieron origen al depósito estratoligado Cu-(Ag) Portales.



Figura 1: Distribución espacial de los principales depósitos estratoligados Cu-(Ag) dentro de la Franja Jurásica (color morado) y Franja Cretácica (color verde) de Chile. La estrella (color rosado) indica la ubicación del yacimiento Portales en donde se enfoca este estudio. Modificado de Maureira et al. (2022), Maksaev y Zentilli (2002) y Kojima et al. (2009). Sistema de Fallas de Atacama tomado de Brown et al., (1993).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Describir secciones transparentes-pulidas obtenidas a partir de muestras de mano representativas del interior de los túneles de la Mina Portales, dando énfasis en la caracterización de la litología, alteración hidrotermal y mineralización.
- Generar una columna estratigráfica esquemática que describa las principales litologías sedimentarias que conforman la roca que hospeda la mineralización.
- Establecer una secuencia paragenética que resuma los principales eventos de mineralización y alteración hidrotermal que dieron origen al depósito Portales.
- Determinar la ocurrencia de la mineralización de sulfuros de cobre y su asociación con la materia orgánica.
- Examinar la mineralización de plata mediante análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM), con el fin de identificar su ocurrencia como solución sólida con sulfuros de cobre o como microinclusiones de partículas de plata.

1.3. Hipótesis

La mina Portales corresponde a un depósito estratoligado Cu-(Ag) de edad Cretácica, alojado en una secuencia de rocas sedimentarias. Se postula que la mineralización de sulfuros de cobre, principalmente bornita, digenita y calcopirita, está estrechamente asociada a la presencia de materia orgánica.

Además, se plantea que la mineralización de plata (Ag) se presenta en asociación con los sulfuros de cobre, ya sea en forma de micro- a nano inclusiones dentro de dichos sulfuros, o bien, como solución sólida en la bornita y/o calcopirita.

1.4. Metodología

1.4.1. Compilación Bibliográfica

En una primera etapa se realizó una compilación bibliográfica de los depósitos estratoligados Cu-(Ag) de la Cordillera de la Costa del norte y centro de Chile, además de la geología regional y local del Distrito Portales. También, se recopilieron informes internos de la mina Portales facilitados por la Compañía Minera Cerro Negro S.A, donde se describen las características geológicas del distrito minero.

1.4.2. Trabajo en Terreno

El día 10 de mayo del 2022 se efectuó el trabajo de terreno, en donde se tomaron 35 muestras de roca del interior de la mina Portales. Cabe destacar, que este yacimiento se explota mediante el método *room and pillar*, por lo que el foco principal de muestreo fueron las paredes y pilares de la mina que contenían mineralización de Cu visible, sectores de la mina en donde se observaron cambios litológicos importantes de la secuencia sedimentaria hospedante, zonas con abundantes vetillas de sulfuros y/o presencia de materia orgánica.

La **Figura 2** muestra los puntos muestreados (P1 a P11) dentro del interior de la mina Portales. Las muestras de roca se obtuvieron de los siguientes puntos: PO-1, PO-4, PO-10 y PO-16 (**P1**); PO-13 (**P2**); PO-7 (**P4**); PO-2, PO-3, PO-17, PO-18, PO-19 y PO-20 (**P6**); PO-9 (**P7**); PO-5 y PO-15 (**P9**); PO-6, PO-11, PO-12 y PO-14 (**P10**); y, finalmente PO-8 (**P11**).

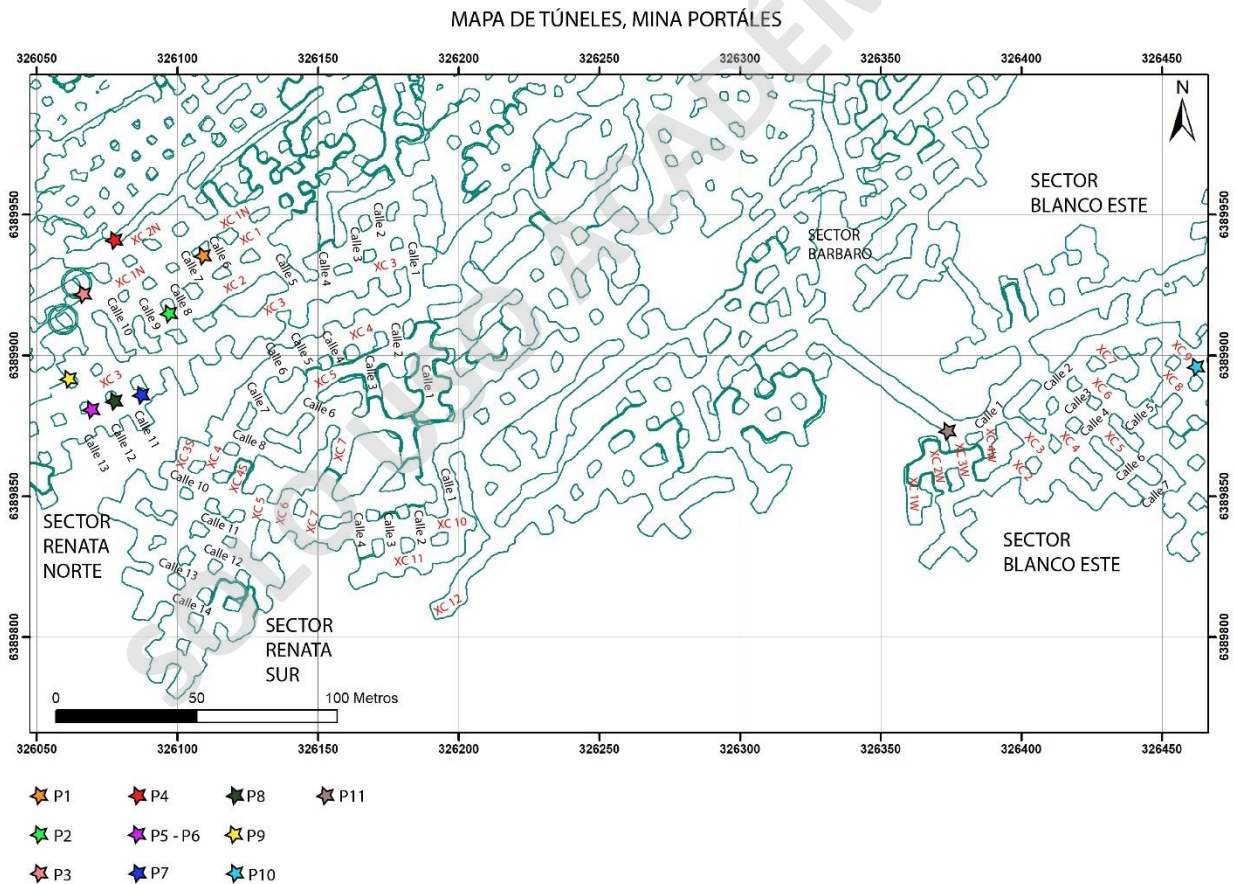


Figura 2: Mapa de túneles de la mina Portales. La figura muestra 4 sectores principales de la mina: Renata Norte, Renata Sur, Barbaro y Blanco Este. Las estrellas de colores indican los lugares en donde se tomaron las muestras para este estudio (P1 a P11). Modificado de *shapefile* de líneas facilitado por empresa Cerro Negro S.A.

1.4.3. Obtención y Preparación de Muestras

Se describieron de manera macroscópica un total de 35 muestras de mano obtenidas del interior de la mina Portales. Posteriormente, se seleccionaron 20 para la preparación de secciones transparentes-pulidas. Los criterios para la selección de estas muestras se basaron en su representatividad, cambios en la litología de la roca hospedante, presencia de sulfuros y/o materia orgánica, así como su distribución espacial dentro de la mina Portales.

1.4.4. Microscopía Óptica

Se describieron 20 secciones transparentes-pulidas con énfasis en el reconocimiento mineralógico, paragénesis mineral, temporalidad y texturas, con el fin de caracterizar la litología y los principales eventos alteración hidrotermal y mineralización. Este proceso se registró mediante la toma de microfotografías.

Las secciones transparentes-pulidas fueron estudiadas utilizando un microscopio óptico de polarización marca NIKON, modelo eclipse E200 mediante luz transmitida y reflejada.

1.4.5. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Posterior al estudio de microscopía óptica, se seleccionaron dos secciones transparentes-pulidas (PO-19 y PO-11) para realizar un análisis mineralógico de detalle mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). La muestra PO-19 corresponde al sector Renata Norte de la mina Portales (**Figura 2**). Esta muestra fue seleccionada por los altos contenidos de cobre y plata que se registran en dicho sector de la mina. La muestra PO-11 corresponde a una del sector Blanco Este (**Figura 2**) y se seleccionó por su alto contenido de ley visual de cobre.

El objetivo del análisis de SEM es determinar la ocurrencia de la plata en el yacimiento Portales, es decir, microinclusiones versus solución sólida. Asimismo, se identifican las principales microtexturas, morfologías y asociaciones mineralógicas de la plata, y se lleva a cabo un análisis químico semi-cuantitativo en áreas de interés (por ejemplo, zonas con abundantes sulfuros de cobre y materia orgánica).

El microscopio electrónico de barrido (SEM, ZEISS GeminiSEM 360) se ubica en la Facultad de Ciencias Naturales, Matemáticas y del Medio Ambiente de la Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago. El SEM está equipado con un espectrómetro de dispersión de energía (EDS) y un detector de electrones retro-dispersados (BSED).

1.5. Ubicación y Accesos

El Distrito Minero Portales se encuentra en la V Región de Valparaíso, específicamente en la provincia de Petorca, comuna de Cabildo (**Figura 3**). Este yacimiento se encuentra ubicado a 13 km al sureste del Distrito Cerro Negro. El Distrito Cerro Negro se sitúa a 95 km al norte de Santiago aproximadamente y unos 27 km al sureste de Cabildo (**Figura 3**).

Para llegar a la zona de estudio desde Cabildo, se debe tomar la ruta E-41 dirección sureste y seguir por 23 km hasta llegar a la intersección con la ruta E-461, donde se debe tomar esta última por aproximadamente 10 km. Los primeros 7,5 km son de camino pavimentado; después, los últimos 2,5 km son por un camino de tierra que conduce finalmente a la entrada del Distrito Cerro Negro (**Figura 3**). Desde el distrito Cerro Negro, se accede al Distrito Portales a través de caminos privados.

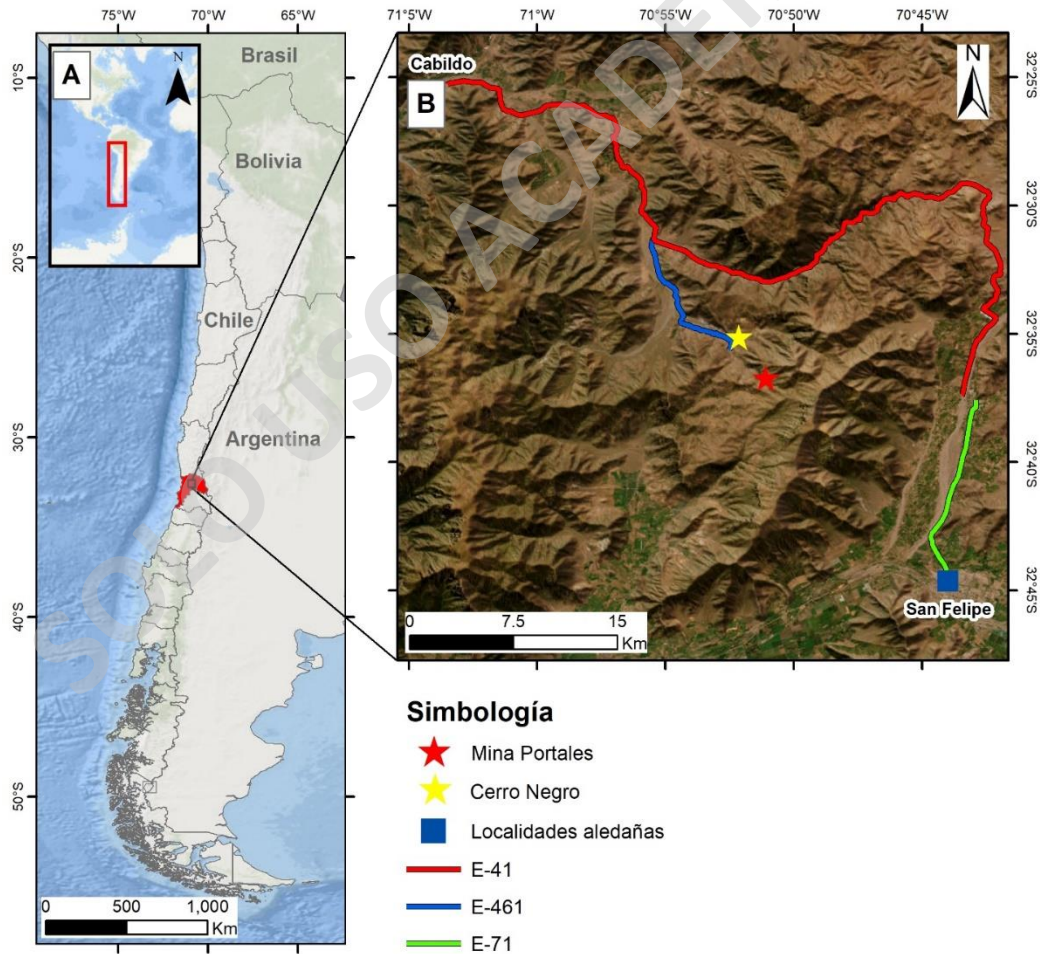


Figura 3: (a) Mapa de ubicación a escala continental, donde se indica con color rojo la Región de Valparaíso. Mapa elaborado con Oceans basemap en el software ArcGis v.10.8. (b) Mapa de ubicación de la mina Portales con las principales rutas y localidades. Mapa elaborado con Imagery basemap con el software ArcGis v.10.8.

1.6. Marco Tectónico

El arco magmático de los Andes del norte de Chile se ha estado desplazando hacia el este desde el Jurásico inferior. Durante el Cretácico Inferior el régimen tectónico era extensional, debido a una subducción oblicua sinistral de alto ángulo entre la placa de Phoenix (Aluk) y la placa Sudamericana (Scheuber y González, 1999; Morata y Aguirre, 2003; **Figura 4**).

Específicamente, el magmatismo del Cretácico Inferior de la Cordillera de la Costa entre los 32°30' y 33°30'S de Chile central está representado por el plutón Caleu y la sucesión volcano-sedimentaria hospedante, donde el régimen tectónico extensional de Cretácico Inferior se ha registrado por la variación isotópica (Sr – Nd) secular (Parada et al., 2005).

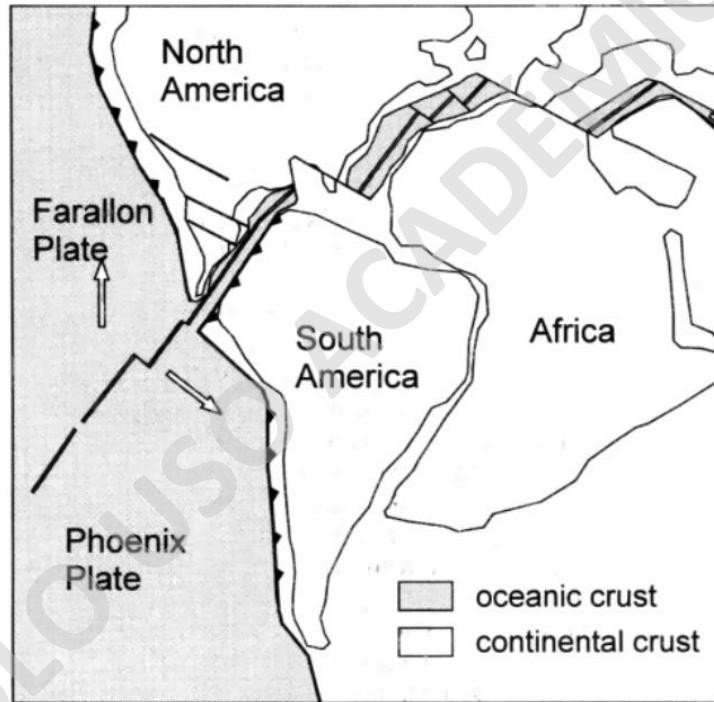


Figura 4: Marco tectónico durante el Jurásico y Cretácico Inferior. Tomada de Scheuber y González (1999), modificado de Jaillard et al. (1990).

2. Marco Geológico

2.1. Geología Regional

La **Figura 5** muestra el mapa geológico regional que abarca a los distritos Portales y Cerro Negro, con las principales formaciones volcanoclásticas (unidades estratificadas) y unidades intrusivas que se describen en el presente capítulo.

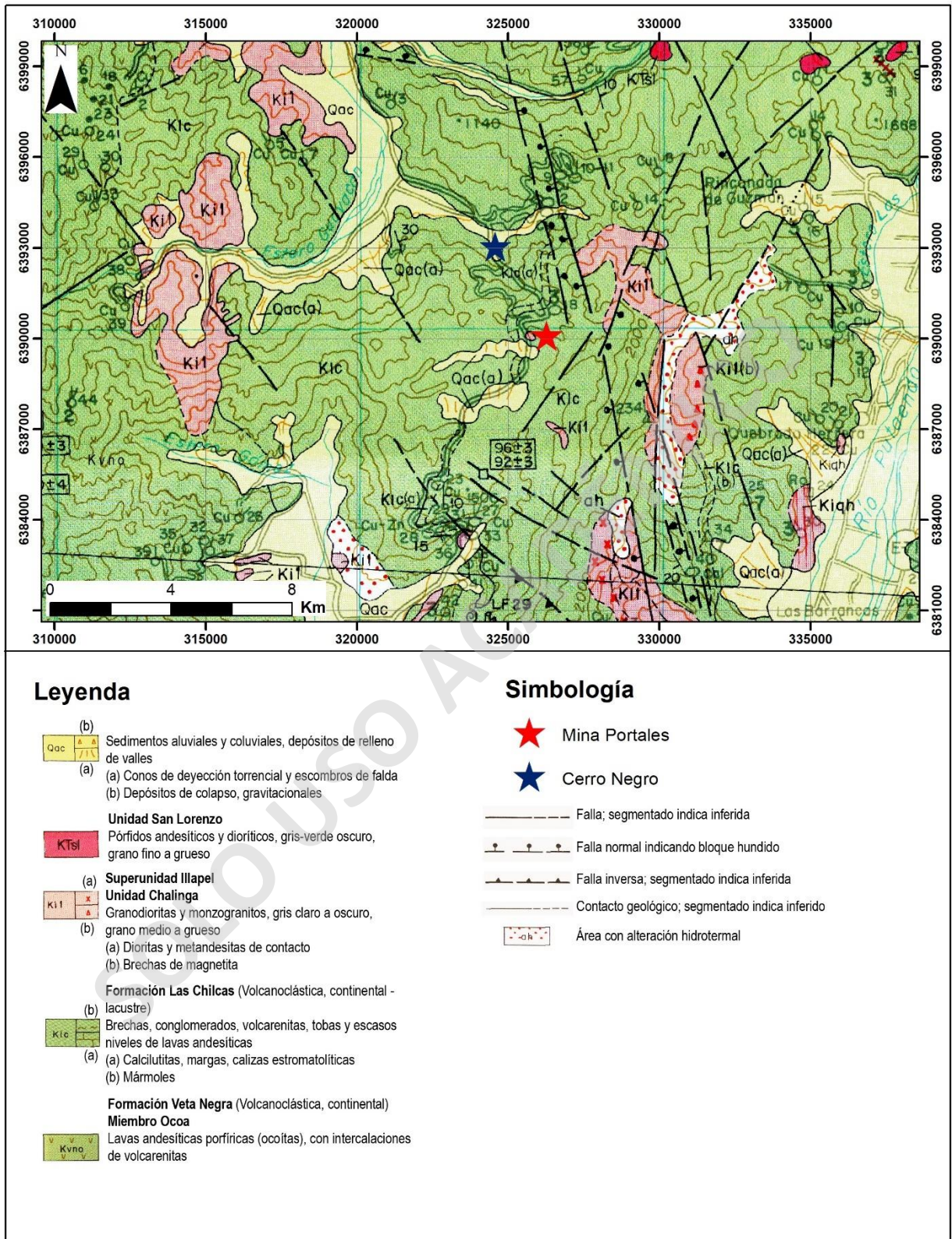


Figura 5: Mapa geológico regional con las principales formaciones volcanoclásticas, unidades intrusivas y zonas de alteración hidrotermal aledañas a la mina Portales. Modificado de Rivano et al., (1993).

2.1.1. Unidades Estratificadas

2.1.1.1. Formación Las Chilcas (Albiano – Campaniano)

La Formación Las Chilcas presenta una edad entre 105 – 82 Ma obtenida mediante el método geocronológico U-Pb en circones detríticos (Boyce et al., 2020). Esta formación sobreyace mediante discordancia angular a la Formación Cerro Morado y subyace inconformemente al Miembro Tabón de la Formación Lo Valle, las cuales se componen principalmente por tobas (Boyce et al., 2020). Se estima una potencia entre 3.000 y 7.000 m para la Formación Las Chilcas (Boyce, 2015 y referencias contenidas).

La Formación Las Chilcas consiste en una sucesión volcano-sedimentaria de origen marino y continental (dependiendo del miembro), además de lavas y tobas. Boyce et al. (2020) describe el siguiente esquema estratigráfico de base a techo: (1) Miembro Pitipeumo, compuesto de calizas, areniscas, lavas y conglomerados; (2) Miembro Tabón, compuesto de brechas, conglomerados y areniscas; (3) Miembro Ñilhue, que se compone de calizas, margas calcilutitas y calciarenitas; y (4) Miembro Calvario, que sobreyace en discordancia sobre el Miembro Ñilhue, y se compone por conglomerados, areniscas, tobas, andesitas brechosas, brechas volcánicas y sedimentarias.

2.1.2. Depósitos No Consolidados

Los sedimentos cuaternarios no consolidados corresponden a sedimentos aluviales, coluviales y depósitos de relleno de valles, los cuales se correlacionan con los cursos de agua actuales. De acuerdo con Rivano et al., (1993) y Rivano (1996), estos depósitos pueden clasificarse en 2 tipos: (1) depósitos de valle y conos de deyección, constituidos por acumulaciones de gravas y rípios, regular a mal estratificados, además de arenas y limos bien estratificados; y (2) depósitos de colapso gravitacional, que corresponden a deslizamientos en masa de grandes proporciones, los cuales actualmente se encuentran estabilizados y con vegetación.

2.1.3. Rocas Intrusivas

2.1.3.1. Superunidad Illapel

De acuerdo con Rivano et al. (1985), la Superunidad Illapel comprende un conjunto de cuerpos intrusivos de dimensiones que van desde batolitos a stocks, los cuales se distribuyen en una

franja irregular de rumbo N20°-30°W, la cual coincide con lineamientos y fallas regionales descritas en la Hoja de Quillota y Portillo (Rivano, 1993).

Las unidades que se reconocen dentro de la Superunidad Illapel son la Unidad La Campana, Unidad Chalinga, Unidad Quebrada Herrera y Unidad Chagres.

- *Unidad La Campana (Tidy, 1970)*

La Unidad La Campana se extiende en un área aproximada de 8 km², compuesta por gabros y dioritas subordinadas, de color gris y de grano grueso a medio (1 a 4 mm).

La edad determinada mediante el método geocronológico K-Ar en plagioclasa es de 66 ± 8 Ma (Tidy et al., 1970).

- *Unidad Chalinga (Rivano et al., 1985)*

Esta unidad constituye aproximadamente el 95% del total de la Superunidad Illapel y es la única unidad que aflora en la zona de estudio. Se conforma por cuarzo-monzonitas, cuarzo-monzodioritas, granodioritas y monzogranitos, con una predominancia de las facies granodioríticas de biotita y hornblenda a tonalíticas, y en menor proporción las facies de monzonitas y cuarzo-monzodioritas.

La edad determinada mediante el método geocronológico K-Ar en anfíboles, hornblenda, biotita, plagioclasa y roca total es entre los 139 ± 5 Ma y los 79 ± 2 Ma, lo que indica una edad fundamentalmente Cretácica Inferior a Cretácica Superior Basal (Cenomaniano) (Rivano et al., 1985).

- *Unidad Quebrada Herrera (Rivano, 1996)*

Esta unidad se define como un cuerpo plutónico de aproximadamente 3 Km de largo en dirección norte-sur, con un ancho de unos 0,7 a 1,5 km. La Unidad Quebrada Herrera corresponde a un cuerpo monzonítico de color verde, de tamaño de grano medio y sin cuarzo. Además, está cortado por diques andesíticos microporfídicos a porfídicos.

- *Unidad Chagres (Rivano, 1996)*

Esta unidad corresponde a un cuerpo plutónico de color rosado a anaranjado que intruye a la Unidad Chalinga. Petrográficamente, la Unidad Chagres corresponde a un sienogranito hololeucocrático de grano fino a medio que es intruido por diques andesíticos subparalelos.

2.1.3.2. Unidad San Lorenzo

Esta unidad definida por Rivano et al., (1985), se extiende de forma continua aproximadamente desde los 30°S hasta los 33°S. Se constituye por pequeños cuerpos intrusivos con distribución filoniana con dimensiones de hasta 6 km². Estos cuerpos se describen como pórfidos andesíticos y andesitas microgranulares con textura que varía de holocristalina porfídica a glomeroporfídica (Rivano, 1996).

A escala regional, la Unidad San Lorenzo se encuentra asociada a una franja de alteración hidrotermal caracterizada por la ocurrencia de natroalunita, caolinita y alunita, conocido localmente como “combarbalita” (Rivano, 1996).

La edad determinada mediante el método geocronológico K-Ar en plagioclasas, anfíbol y feldespato varía entre los 63 ± 2 Ma y los 86 ± 3 Ma, situando a esta unidad intrusiva en el Cretácico Superior (Camus et al., 1986). Particularmente, la edad obtenida por Rivano y Sepulveda (1991) obtuvieron una edad de 65 Ma para esta unidad, ubicándola en el rango Santoniano a Maastrichtiano (Rivano, 1996).

2.1.4. Estructuras

2.1.4.1. Dominio Central (Rivano, 1996)

Según Rivano (1996) las estructuras de la Hoja Quillota Portillo (Rivano, 1993) se dividen en tres grandes dominios, de oeste a este: Dominio Costero, Dominio Central y Dominio Cordillerano. La zona de estudio se encuentra dentro del Dominio Central, el cual se caracteriza por una deformación suave, limitada a pliegues que favorecen el desarrollo de fallas extensionales, y localmente, estructuras *horst* en zonas con esfuerzos compresivos que se originan en sus bordes, presentando fallas inversas y cabalgamientos locales.

El estilo de plegamiento es suave y amplio (de centenares de metros a kilómetros) en curvatura, donde este estilo de deformación da origen a relieves monoclinales hacia el este (Rivano, 1996).

En la zona de estudio se observa un conjunto de fallas que varían sus orientaciones de NNW-SSE a NW-SE, mientras que existe otro dominio local de fallas de orientación NE-SW (**Figura 5**). Al noreste de la mina Portales (**Figura 5**) se observan dos fallas normales paralelas que comparten el mismo bloque colgante. Más al sur se dispone una falla normal de orientación NE-SW, además de una falla inferida de la misma orientación (**Figura 5**).

2.1.4.2. Sistema de Fallas de Atacama

El Sistema de Fallas de Atacama es un rasgo estructural de primer orden de orientación preferencial N-S, que se extiende por más de 1.000 km a lo largo de la Cordillera de la Costa del norte de Chile (St Amand y Allen, 1960; **Figura 1**). Este sistema se subdivide en dos tramos de mayor envergadura, cóncavos hacia el occidente, y que convergen hacia Bahía de Nuestra Señora en la zona noroeste de la Hoja Taltal (Naranjo y Puig, 1984).

De acuerdo con Charrier et al. (2007), se identifica una etapa de deformación extensional durante el Jurásico superior, y posteriormente una etapa de desplazamiento sinistral y exhumación de las unidades del Cretácico Inferior. El desplazamiento sinistral se ha relacionado con la convergencia oblicua de la placa de Phoenix (Aluk) durante el límite Jurásico-Cretácico (Larzon y Pitman, 1972).

La datación de una muestra de gabro obtenida en Caleta Coloso mediante el método geocronológico ^{40}Ar - ^{39}Ar en biotita entrega una edad de 139.5 ± 0.6 Ma. Esto indica que la deformación tuvo lugar en el Cretácico Inferior, lo que coincide con una datación K-Ar en roca total de una milonita al norte de Paposos que arroja una edad de 139 ± 5 Ma (Hervé, 1987)

2.2. Geología Distrital

La mina Portales se encuentra alojada en rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Las Chilcas. Esta formación fue dividida en cuatro miembros por Thomas (1958) y posteriormente fue modificada por Boyce et al. (2020) (**Figura 6**).

2.2.1. Formación Las Chilcas

La Formación Las Chilcas se constituye de base de techo por el Miembro Pitipeumo, Miembro Tabón, Miembro Ñilhue y el Miembro El Calvario (Boyce et al., 2020). Particularmente, la mineralización de la mina Portales se encontraría hospedada en el Miembro Ñilhue, dentro de una secuencia sedimentaria compuesta por lutitas y areniscas con materia orgánica, margas y algunos niveles de jaspe (Reporte mina Portales, 2018).

2.2.1.1. Miembro Pitipeumo

El Miembro Pitipeumo sobreyace en discordancia angular a la Formación Cerro Morado (**Figura 6**) representando al miembro basal de la Formación Las Chilcas. Boyce et al., (2020) documentaron un espesor de 280 m para el Miembro Pitipeumo.

Las litologías que comprenden este miembro corresponden a areniscas finas calcáreas en la base, seguido de areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados en la zona media, y una sucesión de lavas andesíticas-dacíticas cubiertas por conglomerados y areniscas en el techo (**Figura 6**). Los ambientes de formación registrados en el Miembro Pitipeumo corresponden a sistemas lacustres y una transgresión marina registrada en la base. Asimismo, se identifican sistemas fluviales errantes y trenzados. Por último, la actividad volcánica queda registrada por una intercalación de lavas en el techo.

Para el Miembro Pitipeumo se determinó una edad de 105 a 100 Ma, obtenida mediante el método geocronológico U-Pb en circones.

2.2.1.2. Miembro Tabón

Al norte del Valle Aconcagua el Miembro Tabón sobreyace en discordancia angular a la Formación Cerro Morado, mientras que al sur del Valle Aconcagua este sobreyace al Miembro Pitipeumo mediante una incorformidad (**Figura 6**). Se estima una potencia de 1.750 m para este Miembro (Boyce et al., 2020).

El Miembro Tabón se constituye de distintas litologías, incluyendo conglomerados intercalados con flujos andesíticos en ciertos sectores de la base, intercalaciones de conglomerados con areniscas conglomerádicas y limolitas en la zona medial, mientras que en el techo se presentan niveles tobáceos, conglomerádicos, brechosos, areniscas y limolitas (**Figura 6**). Los ambientes registrados corresponden a sistemas fluviales errantes y sistemas de abanicos aluviales.

Para el Miembro Tabón se determinó una edad de 100 a 95 Ma, obtenida mediante el método geocronológico U-Pb en circones.

2.2.1.3. Miembro Ñilhue

El Miembro Ñilhue sobreyace al Miembro Tabón (**Figura 6**) y contiene fósiles de moluscos, almejas, restos de plantas y fragmentos de árbol en las capas de caliza. Este miembro presenta una potencia aproximada de 825 m en su localidad tipo (Boyce et al., 2020).

Las litologías presentes corresponden a intercalaciones de algunos nódulos de chert, margas y calciarenitas, además de algunos estratos de calcilutitas (**Figura 6**). En algunos sectores, este miembro se encuentra alterado a mármol lo que se ha asociado a intrusiones emplazadas durante el Oligoceno. Los ambientes de formación registrados en el Miembro Ñilhue corresponden a sistemas lacustres e inundaciones de aguas marinas o continentales.

Para el Miembro Ñilhue se determinó una edad de 95 a 91 Ma, la cual se obtuvo mediante el método geocronológico U-Pb en circones.

2.2.1.4. Miembro El Calvario

En general, el Miembro El Calvario sobreyace al Miembro Ñilhue (**Figura 6**), y en la ausencia de este último miembro, se sobreyace inconformemente al Miembro Tabón y subyace inconformemente a la Formación Lo Valle (**Figura 6**). La potencia de este miembro es de 820 m aproximadamente (Boyce et al., 2020).

Las litologías que lo constituyen corresponden a conglomerados en la base, seguido de lavas andesíticas intercaladas con conglomerados en la zona medial (**Figura 6**). Por último, en el techo se registra una sucesión de lavas andesíticas (**Figura 6**), y sobre esta conglomerados y brechas sedimentarias. Los ambientes de formación reconocidos son sistemas de abanicos aluviales, además de una intensa actividad volcánica.

Para el Miembro El Calvario se determinó una edad de 91 a 83 Ma, obtenida mediante el método geocronológico U-Pb en circones.

2.2.2. Intrusivos

En el Distrito Portales se observan una serie de diques con una orientación preferencial NE, que se asocian a fallas con bajo desplazamiento. Los diques son de composición andesítica con textura porfídica (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018).

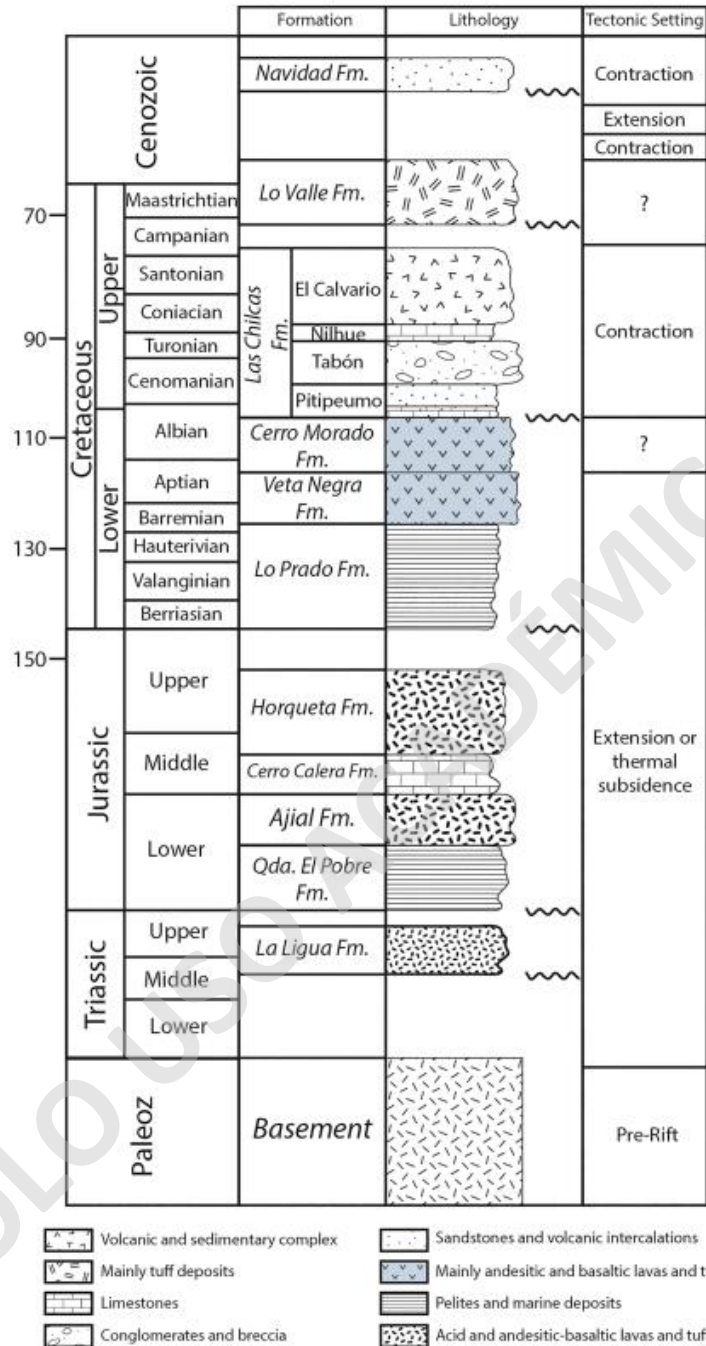


Figura 6: Columna estratigráfica generalizada de la Cordillera de la Costa. Tomada de Boyce et al., (2020)

2.2.3. Estructuras

Las estructuras que se observan dentro del Distrito Portales corresponden principalmente a fallas normales de alto ángulo (65 – 85°) y bajo desplazamiento, por lo general en el orden de 50 cm a 2 m, y en algunos casos hasta de 10 a 12 m. En el distrito se observan ciertas evidencias de

movimientos normales con una componente de rumbo (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018).

Las estructuras principales presentan orientaciones preferencialmente NE y NW (**Figura 7**). Las primeras son más recurrentes, generan menores desplazamientos y se asocian a la intrusión de diques en el sector. Mientras que las estructuras NW generan desplazamientos levemente mayores y parecen ser los principales agentes transportadores de fluidos hidrotermales (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018).

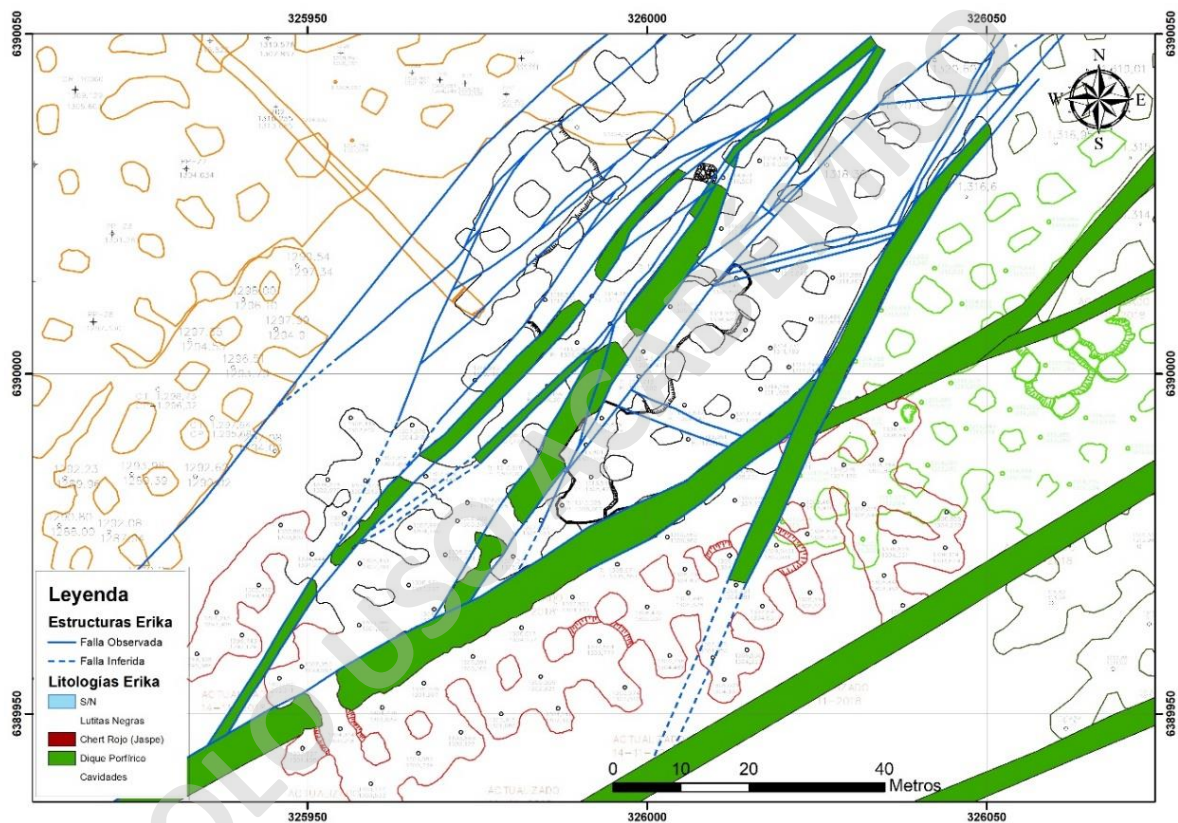


Figura 7: Plano estructural local exponiendo las principales tendencias de estructuras y diques (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018).

2.2.4. Alteración Hidrotermal y Mineralización

2.2.4.1. Alteración Hidrotermal

Las litologías reconocidas en el sector evidencian una alteración argílica y silicificación de baja intensidad. Además, en algunos niveles, y particularmente en la brecha basal, se presenta

alteración propilítica de fuerte intensidad y pervasiva la cual ocurre principalmente en vetillas (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018).

2.2.4.2. Mineralización

La mineralización de cobre y plata de la mina Portales se encuentra alojada en niveles sedimentarios de areniscas, lutitas, así como en los niveles basales de chert rojo (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018). Las principales menas corresponden a calcopirita, bornita y menor calcosina. A pesar de que se han registrado concentraciones significativas de plata, a la fecha se desconocen las fases minerales que la contienen.

En algunos sectores de la mina Portales se identifican escasos oxidados de cobre como malaquita y crisocola. Por otra parte, la mineralogía de ganga se compone principalmente por cuarzo, jaspe y piritita (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018).

La mineralización de mena ocurre principalmente diseminada y usualmente se encuentra muy fina en la matriz de rocas sedimentarias, así como reemplazos selectivos en minerales máficos, vetillas y reemplazos de restos de materia orgánica (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018).

2.3. Estratoligado Cu-(Ag) Cerro Negro

El yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Cerro Negro es el que se encuentra más cerca de la mina Portales (**Figura 1** y **Figura 3**). El cuerpo mineralizado presenta un largo de 2200 m con una orientación preferencial NNE (**Figura 8**; Elgueta et al., 1990). El ancho varía entre 100 a 600 m con un espesor entre 2 a 55 m. La mineralización se presenta claramente como un cuerpo continuo que puede ser separada en distintas unidades (**Figura 8**).

Específicamente, el depósito Cerro Negro se encuentra alojado en el Miembro Pitipeumo de la Formación Las Chilcas (Munizaga et al., 1994). La mineralización se hospeda principalmente dentro de la Unidad Brecha Diablo (**Figura 8**), la cual se describe como una toba de lapilli andesítica y localmente transicional a areniscas y conglomerados (Elgueta et al., 1990).

La Unidad Brecha Diablo se compone de clastos ecuantes, angulares y bien seleccionados de andesitas/andesitas basálticas de grano fino con escasas vesículas. La textura es clasto-soportada con una fina matriz de cristales de tamaño ceniza, en donde comúnmente los espacios intersticiales se encuentran rellenos de cemento cálcico-clorítico (Elgueta et al., 1990). Esta

unidad se extiende por 20 km² y presenta un espesor máximo de 120 m en el área de la mina (Elgueta et al., 1990).

El límite superior de la Unidad Brecha Diablo está dado por el contacto con lutitas calcáreas y areniscas finas. Esta unidad, con un espesor máximo de 40 m, presenta una forma lenticular y es concordante con el cuerpo mineralizado (**Figura 8**). Adicionalmente, contiene abundantes fósiles de flora y fauna de agua fresca, así como remanentes de vertebrados no identificados (Elgueta et al., 1990). Localmente, se observa fuertemente silicificada y con escasa mineralización de sulfuros de cobre (Elgueta et al., 1990). Por otra parte, el límite inferior de la Unidad Brecha Diablo está dado por el contacto con la unidad de “areniscas rojas” (**Figura 8**), las cuales se describen como areniscas feldespáticas con intercalaciones de conglomerados andesíticos y ocasionalmente con lentes de sedimentos calcáreos finos (Elgueta et al., 1990). Por último, colindando en los bordes este y norte del cuerpo mineralizado se encuentra un *sill* andesítico porfídico, el cual generalmente se presenta sobre las areniscas inferiores y bajo las limolitas calcáreas (**Figura 8**).

La mineralización de sulfuros se compone, en orden de abundancia, de calcopirita, pirita, bornita, calcosina, magnetita, hematita, galena y esfalerita (Elgueta et al., 1990). Estos ocurren generalmente como disseminados muy finos (0.07 – 1.1 mm) como parte del cemento de la matriz de la toba de lapilli, y en menor medida dentro de los clastos. Un 5% del total de sulfuros se presenta en vetillas discontinuas e irregulares (Elgueta et al., 1990).

El cuerpo mineralizado presenta una zonación vertical característica (Elgueta et al., 1990). La zona superior se caracteriza por la asociación calcosina-bornita, con abundante galena y esfalerita, y presenta concentraciones significativas de plata. Progresivamente, hacia la zona inferior, la asociación calcosina-bornita cambia a bornita-calcopirita, y luego calcopirita-pirita, hasta las zonas más inferiores donde domina la pirita en la base (Elgueta et al., 1990).

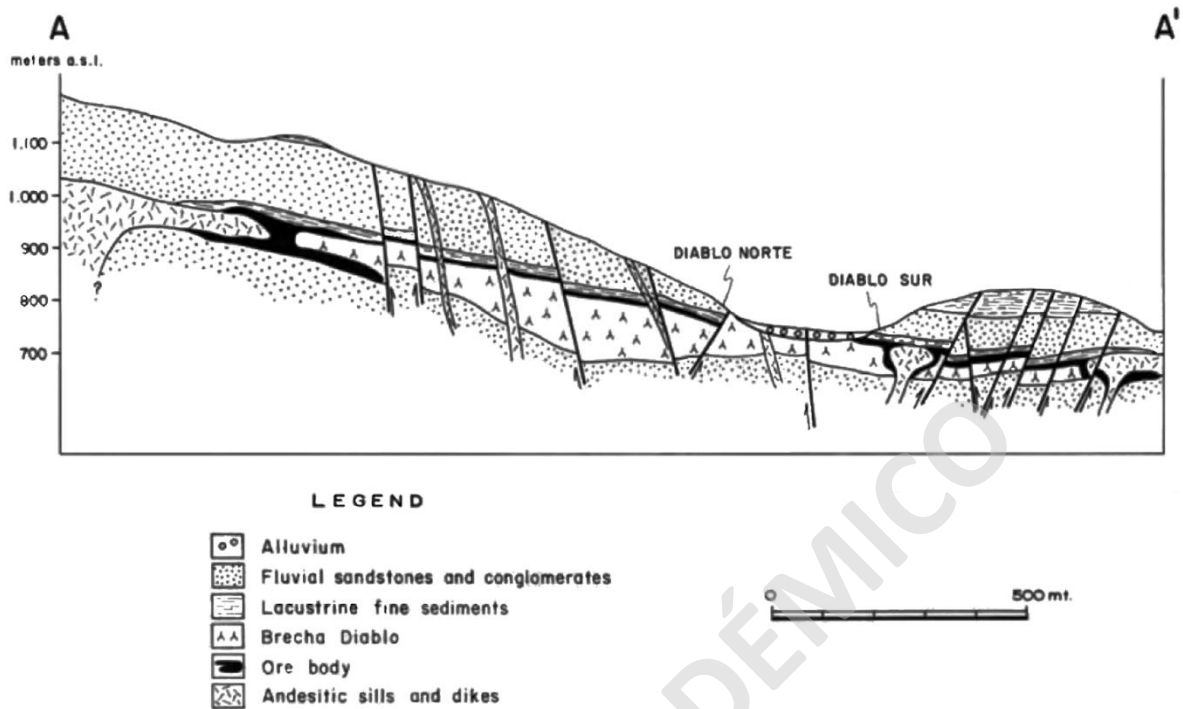


Figura 8: Perfil representativo del depósito estratoligado Cu-(Ag) Cerro Negro. Tomado de Elgueta et al. (1990).

La alteración hidrotermal característica es una fuerte silicificación local en las limolitas superiores al cuerpo mantiforme. Esta alteración consiste en cuarzo microcristalino con un contenido menor de minerales de arcilla, que son cortados por vetillas de calcita. También se observa una silicificación pervasiva en la Brecha Diablo (Elgueta et al., 1990). Por otra parte, las plagioclasas del *sill* presentan albitización moderada a intensa (Elgueta et al., 1990).

En el sector de la mina se observan fallas normales con desplazamientos mayores a los 100 m, las cuales han separado el cuerpo mineralizado en varios bloques (**Figura 8**). Estas fallas normales se habrían formado en etapas tempranas, durante el desarrollo de la cuenca, y posteriormente habrían sido reactivadas después de la formación del cuerpo mineralizado (Elgueta et al., 1990).

3. Resultados

En el siguiente capítulo se presentan los principales resultados de este estudio, incluyendo las observaciones a muestra de mano y petro-calcográficas de 20 secciones transparentes-pulidas de la mina Portales (**Figura 2**). La mayoría de las muestras descritas corresponden al sector oeste de la mina (sector Renata Norte) y en menor medida al sector este de la mina (sector Blanco Este) (**Figura 2**). Adicionalmente, se exponen los resultados del análisis de dos muestras representativas de la mina Portales mediante el uso de microscopio electrónico de barrido (SEM).

3.1. Litología

La secuencia sedimentaria representativa de la mina Portales se observa claramente en uno de los frentes de explotación del sector Renata Norte (**Figura 9**). En el sector Blanco Este, no fue posible acceder a ningún frente de explotación representativo, dado a la gran cantidad de material particulado en suspensión. No obstante, según los geólogos de la mina Portales (comunicación oral), las litologías observadas en el sector Blanco Este son similares a las del sector Renata Norte, pero adicionalmente se observan brechas hidrotermales mineralizadas. En este sector, la secuencia sedimentaria es cortada por diques andesíticos cloritizados estériles. Cabe destacar, que en las rocas descritas en este estudio no se identificó el evento metamórfico regional de bajo grado descrito por Sato (1984).

Las descripciones macroscópicas de muestras de mano y petrográficas de las secciones transparentes-pulidas, indican que la secuencia sedimentaria que aloja al yacimiento Portales se conforma principalmente por lutitas bituminosas, fangolitas a fangolitas arenosas con bitumen y areniscas calcáreas hematizadas y/o silicificadas (**Figura 9; Anexo A**).



Figura 9: Fotografía del frente de explotación del sector Renata Norte de la mina Portales. Las litologías de base a techo son: M1: intercalación de lutitas (tonalidad negruzca) y areniscas (tonalidad rojiza); M2: lutitas; M3: intercalación de capas finas de lutitas con areniscas; y M4: lutitas.

3.1.2. Lutitas bituminosas

De manera macroscópica (**Figura 10A**), las lutitas bituminosas se caracterizan por su color grisáceo con tonos negruzcos correspondientes a cúmulos de materia orgánica (**Figura 10B, C y D**). Estas se componen de clastos tamaño limo y en menor medida de tamaño arcilla. Los fragmentos mayores se constituyen mayoritariamente por cristales de plagioclasa, feldespato y cuarzo. El cemento generalmente es calcáreo, e irreconocible en algunos sectores. Entre los planos de fisibilidad de las lutitas, se pueden observar láminas rellenas con materia orgánica, con una abundancia variable que oscila entre un 5 a 10%. Adicionalmente, se reconocen algunas lutitas con escasa porosidad primaria (menos del 5% del volumen total de la roca), la cual se presenta sin rellenos.

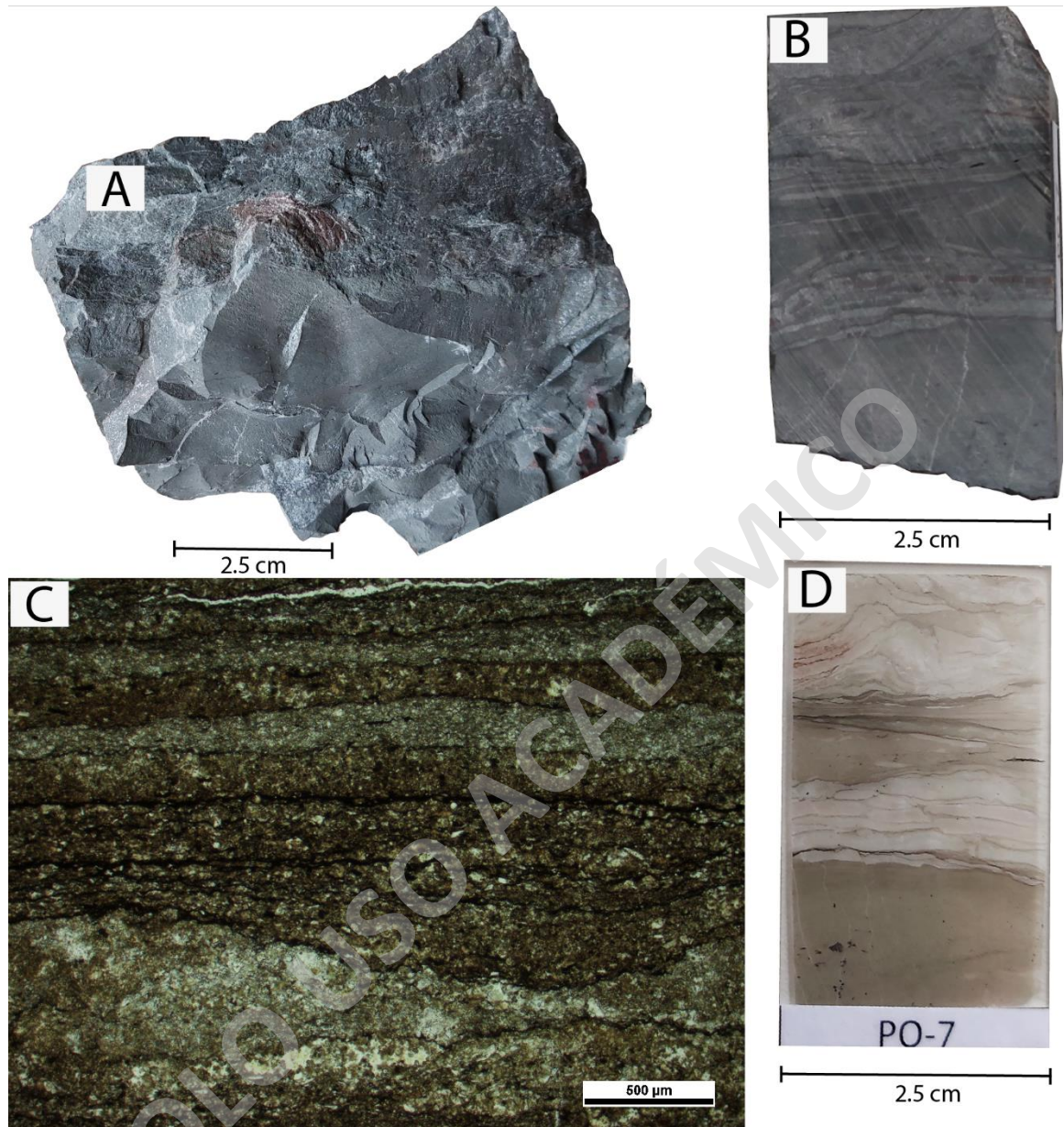


Figura 10: Lutita calcárea bituminosa con cúmulos de arenisca calcárea subordinada A. Fotografía de muestra de mano. B. Rechazo de la sección transparente-pulida PO-7. Se observan claramente láminas negruzcas de materia orgánica. C. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X. Se observan láminas de bitumen de color negruzco en la lutita. D. Sección pulida PO-7, en donde es posible diferenciar bitumen (negruzco), lutita (gris-pardo) y arenisca (rojizo).

3.1.3. Fangolitas

Las fangolitas se caracterizan por su color grisáceo, con escasos cúmulos negruzcos de materia orgánica (**Figura 11A, B y D**). Estas se constituyen mayoritariamente de clastos tamaño limo y en menor de tamaño arcilla. Se reconocen principalmente cristales de plagioclasa, feldespato y cuarzo (**Figura 11C**). En general, la porosidad primaria de las fangolitas es baja (menos de un 10

% volumen total de la roca). Las fangolitas se diferencian de las lutitas bituminosas debido a la inexistencia de planos de fisibilidad, así como a su menor contenido de materia orgánica.

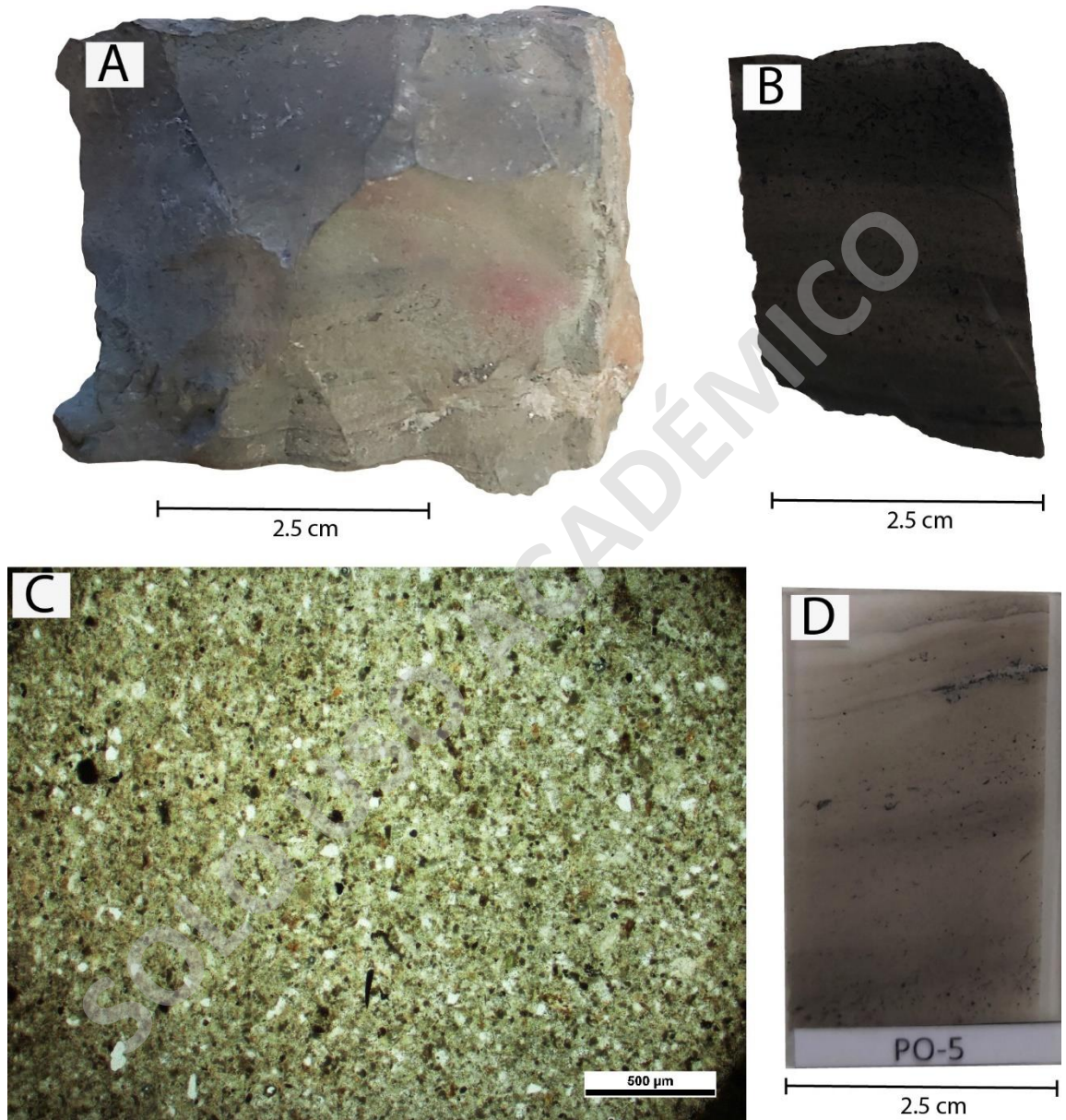


Figura 11: Fangolita calcárea A. Fotografía de muestra de mano. B. Rechazo de sección transparente-pulida PO-5, en donde se aprecian cúmulos negruzcos de materia orgánica. C. Fotomicrografía a nicols paralelos con aumento 4X. D. Sección transparente-pulida (PO-5), en donde se distinguen claramente los cúmulos/láminas de color negruzco correspondientes a materia orgánica.

3.1.4. Brechas hidrotermales

En el sector Blanco Este de la mina Portales (**Figura 2**), se reconocen al menos dos tipos de brechas hidrotermales: la brecha hidrotermal basal y brecha hidrotermal mineralizada. Estas litologías se diferencian por su posición estratigráfica respecto al manto mineralizado, así como por la composición de sus clastos, la alteración hidrotermal y la mineralización (**Figura 12-Figura 15**). Una descripción detallada de cada una de estos tipos de brechas hidrotermales se presenta a continuación.

3.1.4.1. Brecha hidrotermal basal

Este tipo de brecha corresponde al estrato basal del manto mineralizado, por ende, estratigráficamente siempre se observa por debajo de este. La brecha hidrotermal basal se caracteriza a muestra de mano, principalmente por sus tonalidades verdosas producto de una cloritización predominante, y en menor medida, tonalidades rojizas asociada con la hematización de la misma (**Figura 12A y Figura 12B**).



Figura 12: Brecha hidrotermal basal A. Fotografía muestra de mano. B. Rechazo de sección transparente-pulida PO-13, la cual presenta tonalidades rojizas producto de la hematización.

La brecha hidrotermal basal se clasifica como monomítica, compuesta por clastos de andesita, caracterizados por cristales de plagioclasa inmersos en una masa fundamental levemente alterada a clorita. Se reconocen al menos 2 familias de plagioclasa debido a la presencia de fenocristales y microlitos. La matriz de la brecha se constituye por polvo de roca y carbonatos (**Figura 13A, B**), donde se reconocen cristales de calcita subhedrales de grano fino a grueso. Además, ocasionalmente se observan parches de carbonato dentro de los clastos de andesita (**Figura 13A, B**).

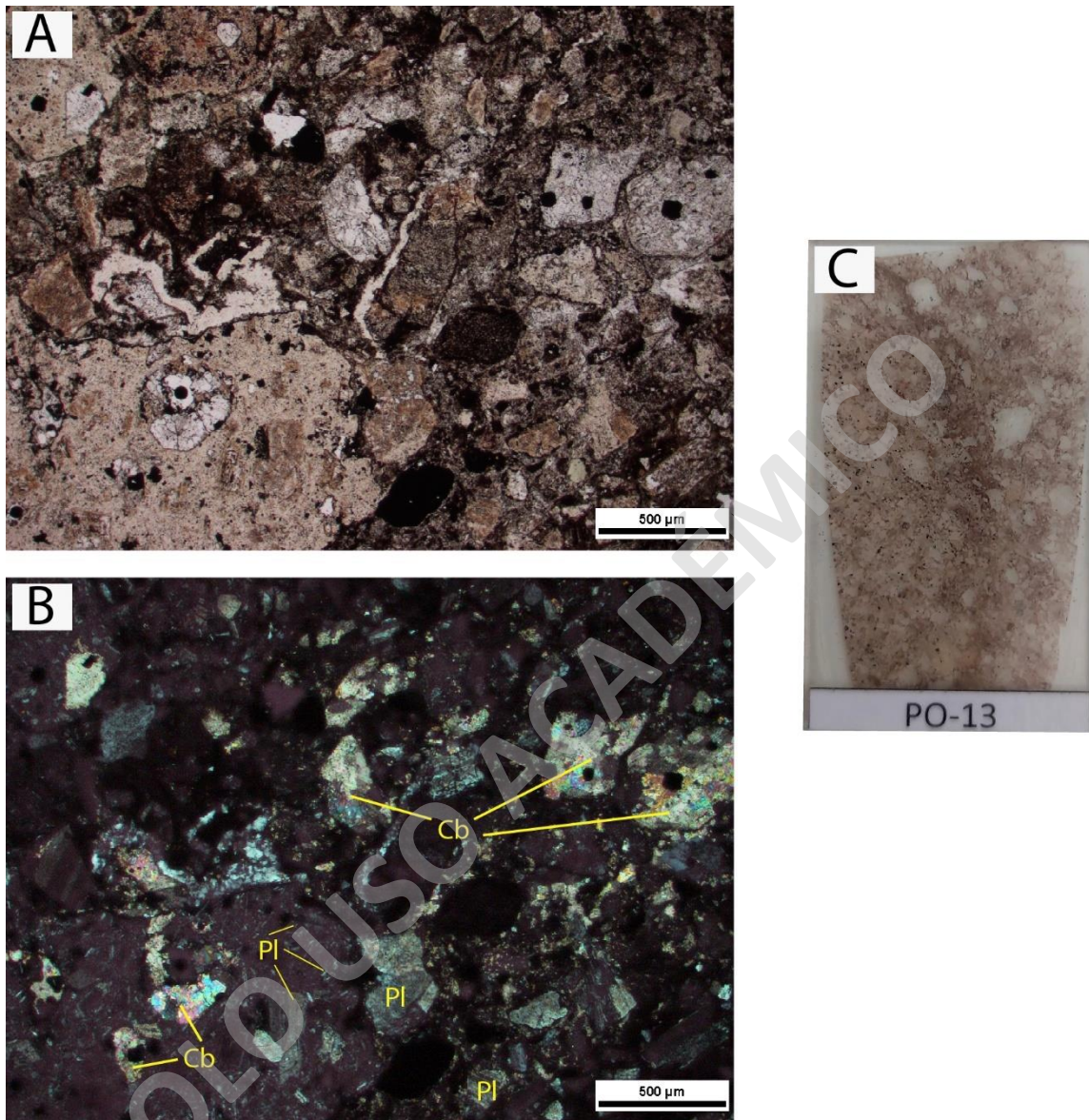


Figura 13: Brecha hidrotermal basal. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X la sección transparente-pulida PO-13. Se aprecia la textura brechosa y se distingue la matriz y clastos. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados. Se observa la matriz compuesta por carbonatos y polvo de roca, mientras que los clastos corresponden a fragmentos de andesita. C. Sección transparente-pulida PO-13. Se observa claramente los tonos rojizos de la roca producto de la hematización. Cb: Carbonatos; Pl: Plagioclasa.

3.1.4.2. Brecha hidrotermal mineralizada

La brecha hidrotermal mineralizada se caracteriza por su color grisáceo oscuro con tonalidades negruzcas (**Figura 14A, B**). Esta brecha presenta clastos que se reconocen en muestra de mano por sus tonalidades blanquecinas a grisáceas (**Figura 14A, B**). Al observar al microscopio óptico, se nota que los clastos están compuestos principalmente de *chert*, es decir, cuarzo

microcristalino; en ocasiones, se encuentran acompañados por cúmulos de calcedonia, parches de carbonatos y sulfuros de cobre diseminados. La matriz se compone de polvo de roca y carbonatos (**Figura 15A, B**), en donde se reconocen cristales de calcita mayormente subhedrales de grano fino a grueso. Adicionalmente, la matriz se encuentra mineralizada con sulfuros de cobre diseminados (bornita y calcopirita), siendo estos de mayor tamaño y abundancia que los sulfuros que se presentan en los clastos.



Figura 14: Brecha hidrotermal mineralizada. A. Fotografía de muestra de mano. B. Rechazo de la sección pulida PO-11, donde se aprecia claramente los clastos y la matriz de brecha.

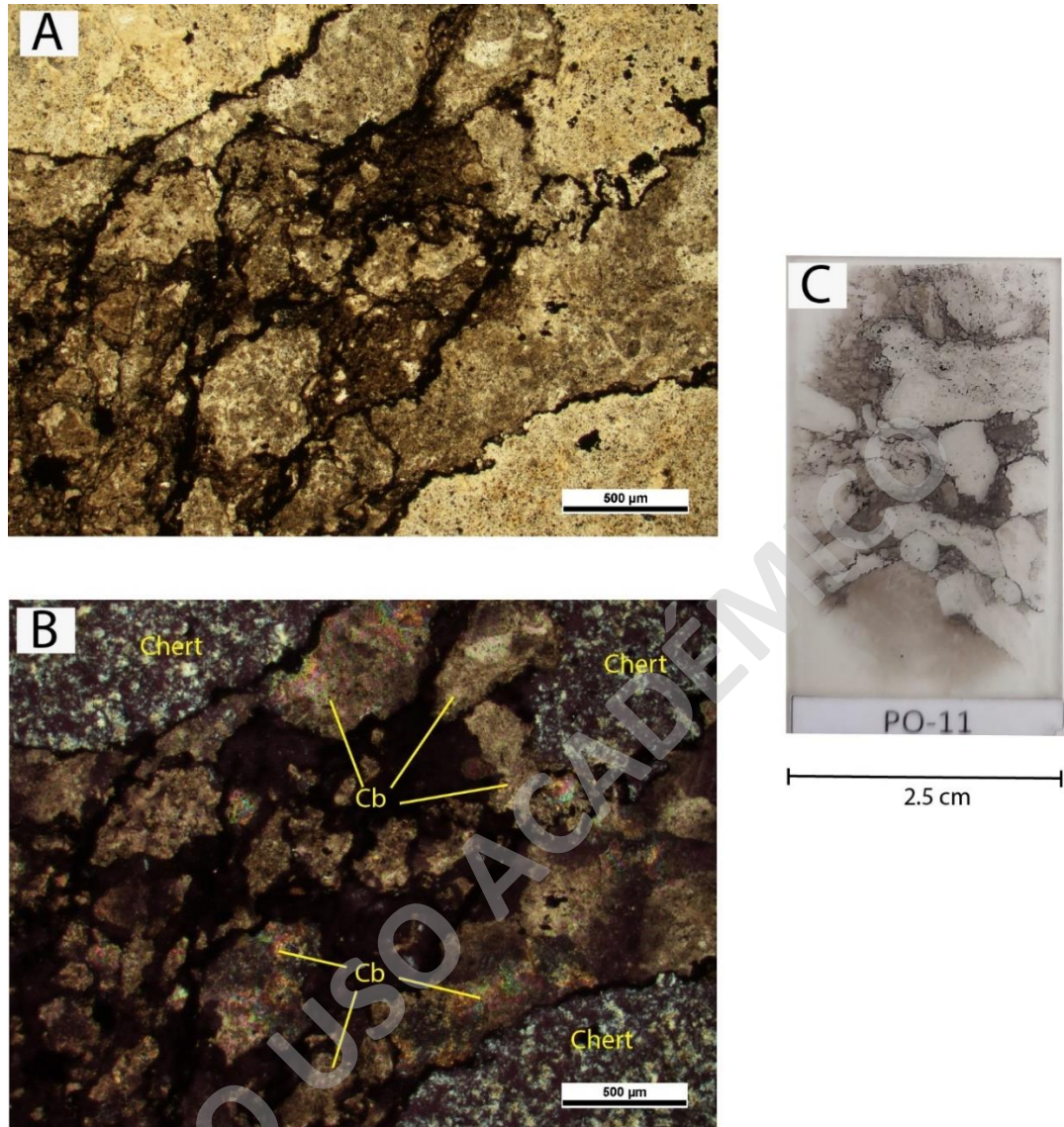


Figura 15: Brecha hidrotermal mineralizada. A. Fotomicrografía a nicols paralelos con aumento 4X. Se reconoce la matriz (color negro) y los clastos (color pardo). B. Fotomicrografía a nicols cruzados, donde se muestran los clastos de chert y la matriz carbonatada, con presencia de polvo de roca entre los granos de carbonatos. C. Sección transparente-pulida PO-11. Se distinguen claramente los clastos de chert con una apariencia translúcida y la matriz de tonalidades grisáceas y negruzcas. Cb: Carbonatos.

3.1.5. Areniscas

En la mina Portales se identifican dos tipos de areniscas: areniscas calcáreas hematizadas y areniscas silicificadas.

La arenisca calcárea hematizada se caracteriza por exhibir una textura clástica y tonalidad rojiza (**Figura 16A, B**). Los clastos poseen un tamaño que varía de arena media a gruesa, mostrando una textura obliterada y un alto grado de hematización. La matriz se conforma de granos de

tamaño arena fina y en menor medida tamaño limo. El cemento está compuesto exclusivamente por carbonatos, y se pueden identificar cristales de calcita subhedrales en agregados de grano grueso (Figura 17A, B).



Figura 16: Arenisca calcárea hematizada. A. Fotografía muestra de mano. En la parte superior se observa mineralización de calcopirita asociada a bitumen. B. Rechazo de sección transparente-pulida PO-17. Se observa la arenisca tonalidad rojiza y, en la parte superior la mineralización de calcopirita concordante a las láminas de bitumen.

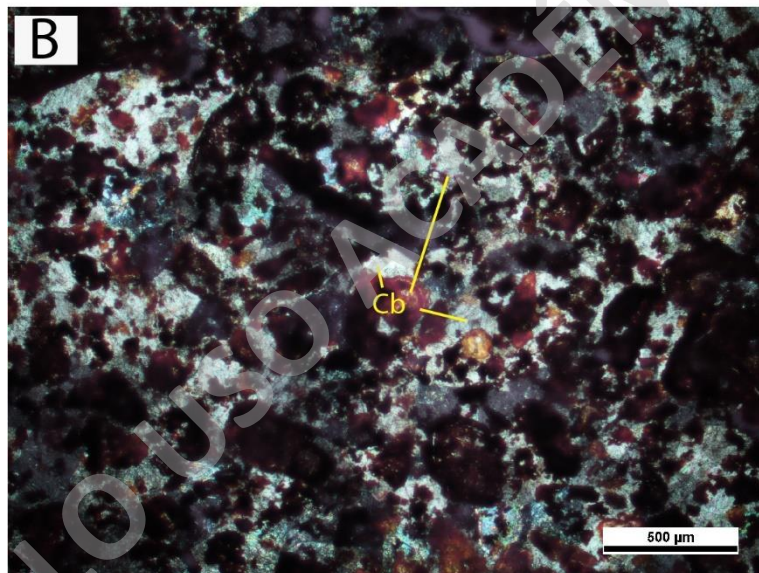
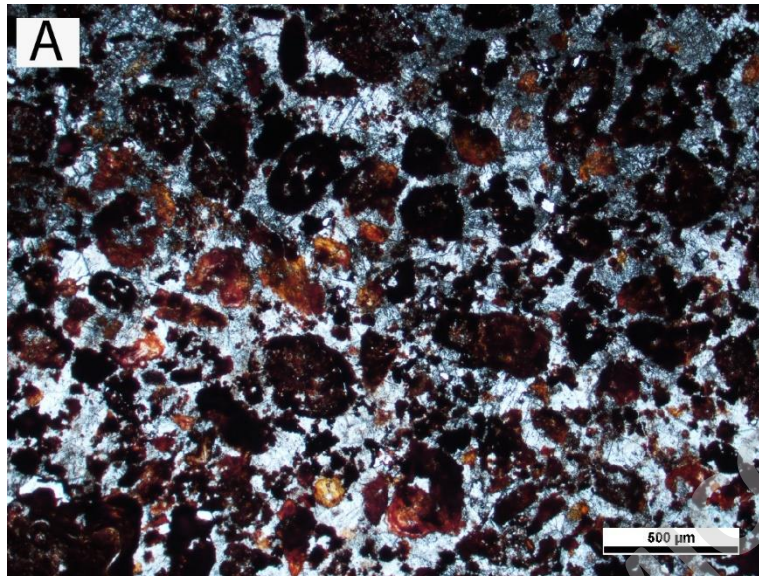


Figura 17: Arenisca calcárea hematizada. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X. Se observa textura clástica, clastos hematizados y cemento calcáreo. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados, en la cual se observa el cemento de carbonatos. Cb: Carbonatos.

La arenisca silicificada se distingue por su tonalidad rojiza, pero exhibe un brillo vítreo característico de la sílice (**Figura 18A, B**). En general, los clastos presentan textura obliterada y se encuentran totalmente reemplazados por sílice microcristalino y en menor cantidad por hematita. El cemento se constituye principalmente por sílice microcristalino y calcedonia subordinada (**Figura 19A, B**).

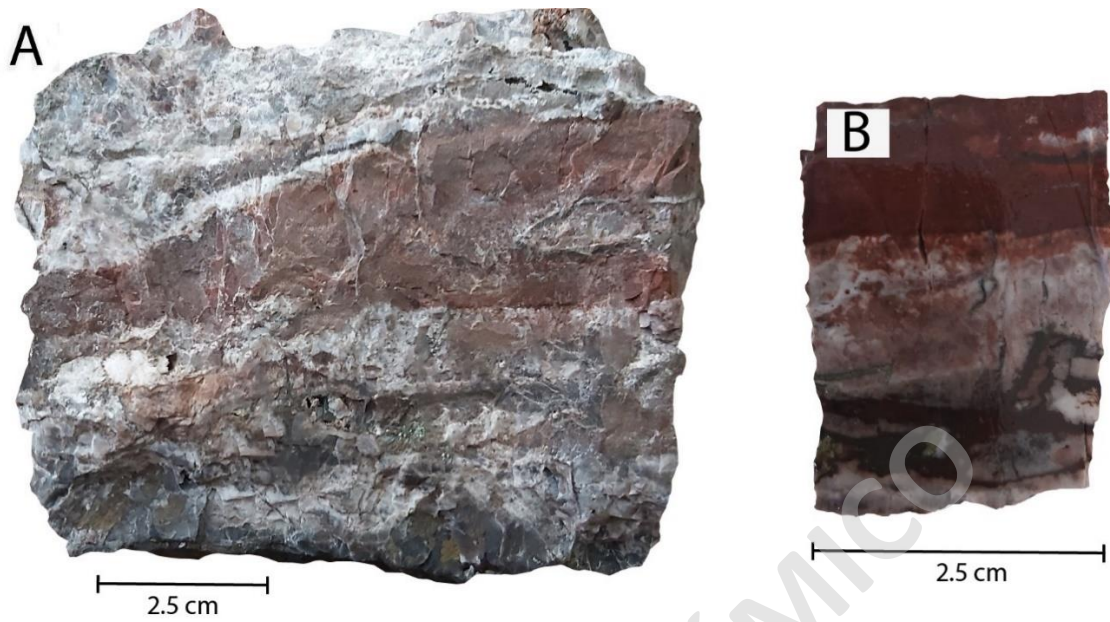


Figura 18: Arenisca silicificada. A. Fotografía de muestra de mano. Se observa una intercalación de bandas rojizas de arenisca y bandas de color blanquecino de sílice. B. Rechazo de la sección transparente-pulida PO-16, donde se muestran las tonalidades rojizas y blanquecinas de las bandas de arenisca y sílice.

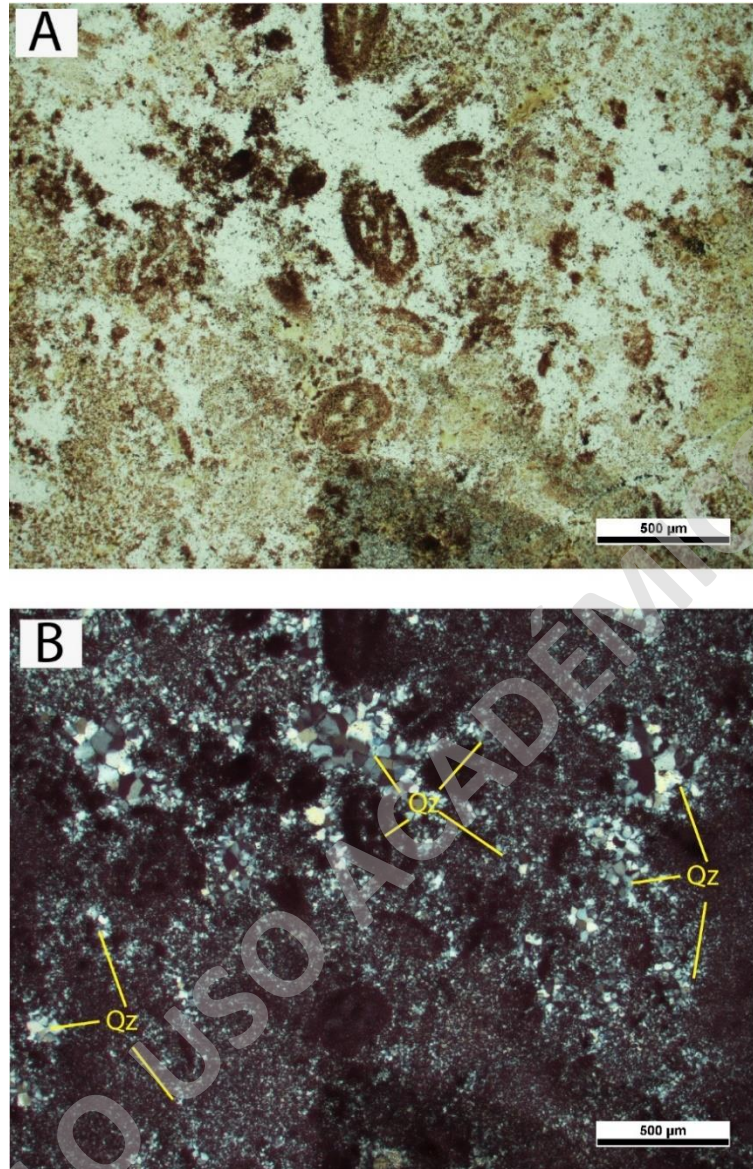


Figura 19: Arenisca silicificada. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X, donde se observan los clastos con textura obliterada. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados. Se distingue el cemento constituido totalmente por sílice microcristalino y cuarzo con un tamaño de grano variable.

3.1.6. Dique andesítico

En el sector Blanco Este de la mina Portales (**Figura 2**), se observan diques que cortan la secuencia sedimentaria que aloja la mineralización. Estos diques presentan tonalidades verdosas a muestra de mano, lo cual se asocia a cloritización (**Figura 20C**). La textura de la roca es hipidiomórfica, inequigranular y microporfídica, con fenocristales de plagioclasa de grano fino a medio (< 2 mm). A través del microscopio óptico, se observar de manera más detallada la textura microporfídica (**Figura 20A, B**), con fenocristales de plagioclasa inmersos en una masa

fundamental microcristalina. La alteración a clorita ocurre como agregados microcristalinos en la masa fundamental, y en menor medida reemplazando a las plagioclasas (**Figura 20A, B**). Localmente se reconocen carbonatos en forma de finas vetillas y como relleno de cavidades o espacios abiertos (**Figura 20**).

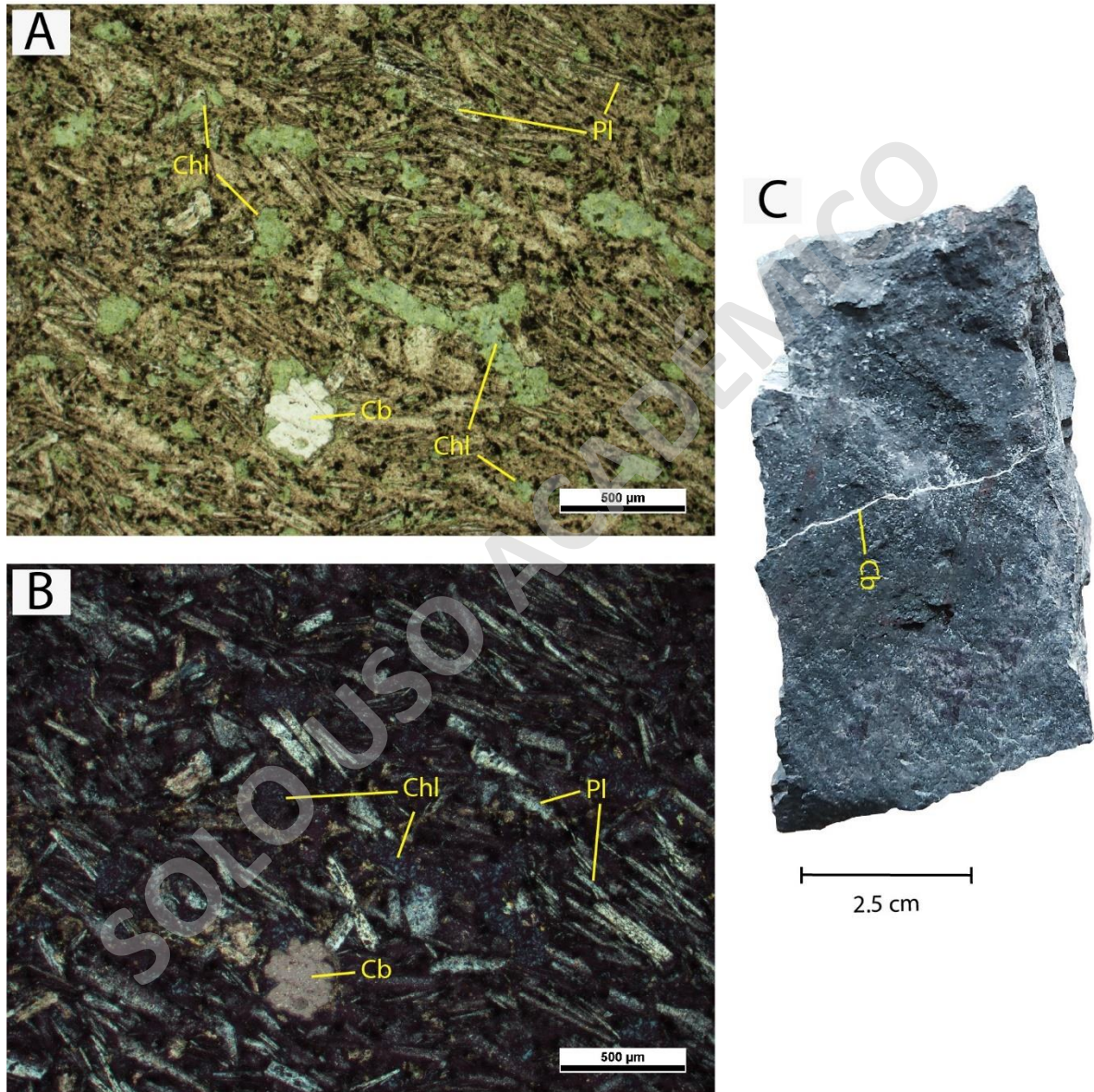


Figura 20: Dique andesítico microporfídico cloritizado. A. Fotomicrografía a nicoles paralelos con aumento 4X. Se observan fenocristales de plagioclasa (Pl), cavidades rellenas por carbonato (Cb) y clorita (Chl) alterando la masa fundamental y en menor medida a plagioclasas. B. Fotomicrografía a nicoles cruzados. C. Muestra de mano con una vetilla de carbonato (Cb).

3.2. Materia Orgánica

En las secciones transparentes-pulidas se identificaron dos tipos de materia orgánica: bitumen y restos de plantas fósiles (**Figura 21**). Estos tipos de materia orgánica se distinguen por su color, forma, porosidad y estructuras. Aunque ambos tipos de materia orgánica se encuentran asociadas a la ocurrencia de sulfuros de cobre como bornita, calcosina y calcopirita, la mineralización es más significativa cuando se asocia al bitumen que a los restos de plantas fósiles.

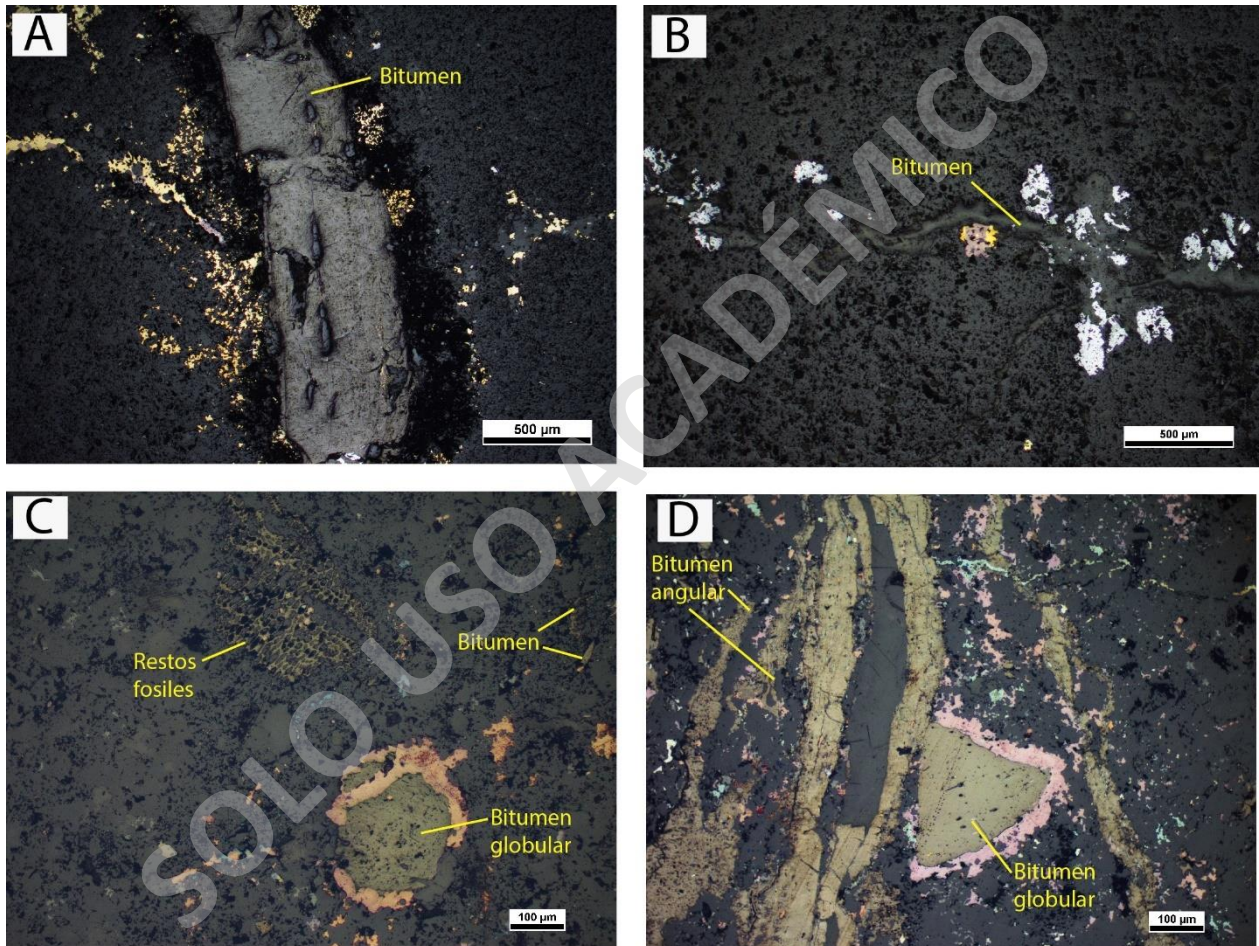


Figura 21: Fotomicrografías a luz reflejada de los dos tipos de materia orgánica. A y B. Bitumen angular grisáceo asociado con mineralización de calcopirita, bornita y calcosina. C. Bitumen globular asociado a bornita, bitumen angular diseminado y restos fósiles de plantas que alojan diseminados de bornita. D. Bitumen globular asociado a bornita y bitumen angular asociado a diseminados de bornita y calcosina.

El bitumen, presenta una variación de color que va desde tonalidades grisáceas a parduzcas (**Figura 21**). Asimismo, se presenta en diferentes formas: globulares, angulosas y masivas. En algunos sectores, se observa bitumen siendo reemplazado por epidota y/o cuarzo microcristalino, o bien, bitumen siendo reemplazado por sulfuros de cobre (**Figura 21A** y **Figura 22A**). El bitumen

es poco común en las fangolitas y areniscas (menos de un 5-8%), donde solo se observa diseminado. En contraste, el bitumen es abundante en las lutitas (más de un 8-10%), en forma de aglomerados angulosos, globulares y masivo (**Figura 21C, D**), así como en finas láminas que rellenan espacios (**Figura 21B**).

Por otro lado, los restos fósiles de plantas suelen presentarse en tonalidades parduzcas y conservan sus estructuras porosas (**Figura 21C**). En ciertas áreas, se pueden identificar poros rellenos por sulfuros de cobre. En general, los restos fósiles de plantas se encuentran en zonas cercanas al bitumen. Sin embargo, en algunas áreas también se aprecian cúmulos aislados de restos fósiles de plantas sin la presencia de mineralización de sulfuros de cobre.

3.3. Alteración Hidrotermal

En términos generales, la alteración hidrotermal en el yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales es de baja intensidad, lo que ha permitido que gran parte de las texturas de las rocas se preserven adecuadamente. No obstante, se observa una alteración selectiva y pervasiva en las areniscas silicificadas/hematizadas. La mineralogía de alteración se compone principalmente por carbonatos, epidota, clorita, albita ± cuarzo. Es relevante mencionar que el carbonato es el mineral de alteración de mayor abundancia, presente en vetillas, parches, diseminado y como matriz de brecha.

La alteración hidrotermal asociada a la mineralización se limita a lutitas, fangolitas y brechas hidrotermales, que son las litologías que constituyen el manto mineralizado. Las asociaciones de alteración más típicas son: (1) cuarzo-epidota, en ocasiones asociada a bitumen; (2) calcita-epidota, en agregados euhedrales a subhedrales de grano grueso, la cual se ubica en zonas cercanas a mineralización de galena; (3) epidota-clorita, asociada a mineralización de galena, y, por último, (4) albita, la cual suele encontrarse aislada y asociada a sulfuros de cobre. Dado que las alteraciones hidrotermales en la mina Portales no exhiben una distribución espacial uniforme y presenta variaciones locales, se definen dos zonas o dominios de alteración: el sector Renata Norte y el sector Blanco Este (**Figura 2**).

En el sector Renata Norte, las rocas se encuentran principalmente alteradas a una asociación de epidota-clorita (**Figura 22C**) y epidota-carbonato (**Figura 22D**), frecuentemente acompañadas de mineralización de galena. Asimismo, se observa alteración epidota-cuarzo, con o sin galena, la cual en ocasiones se presenta asociada con bitumen (**Figura 22A**). También, se observa albitización principalmente en las lutitas y fangolitas (**Figura 22B**). En el área noreste del sector

Renata Norte, específicamente entre la calle 9 y calle 6 (**Figura 2**), la mineralogía de alteración está predominantemente compuesta por albita y carbonatos.

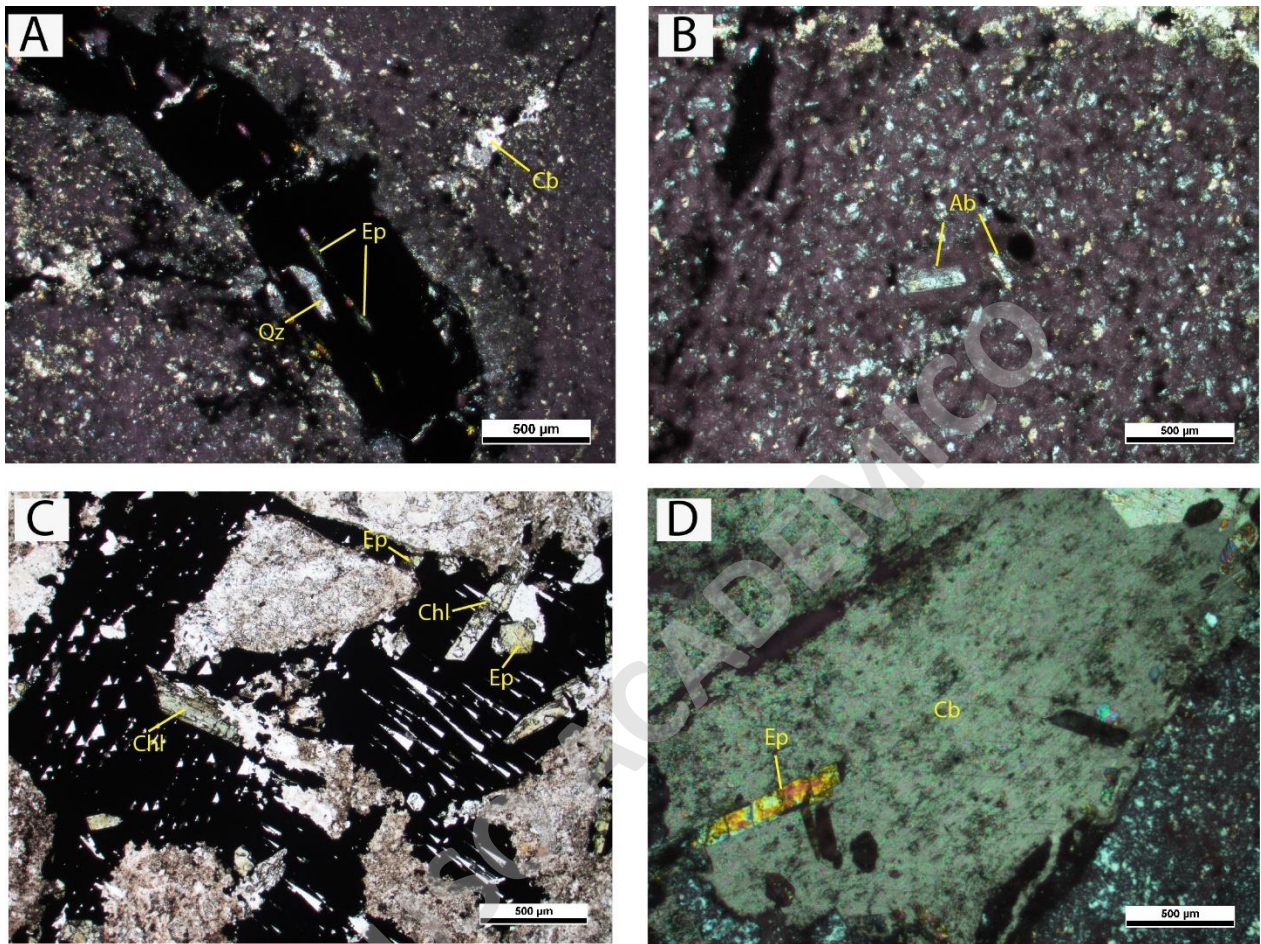


Figura 22: Fotomicrografías representativas de los minerales de alteración en las rocas hospedantes del sector Renata Norte. A. Cristales de cuarzo y epidota en bitumen, junto con carbonatos diseminados los cuales se disponen alrededor del bitumen. B. Cristales de plagioclasa albitizados en fangolita. C. Clorita y epidota asociado con galena (mineral opaco). D. Asociación de carbonato-epidota. Cb: Carbonatos; Ep: Epidota; Qz: Cuarzo; Ab: Albita; Chl: Clorita.

En el sector Blanco Este, específicamente en la calle XC 9 (**Figura 2**), la intensidad de alteración hidrotermal en las rocas es débil y está compuesta principalmente por carbonatos, junto con la presencia de clorita. Estos minerales se encuentran en forma de matriz de brecha, parches, vetillas y diseminados (**Figura 23B**). El dique andesítico muestreado en esta zona exhibe una alteración de clorita de intensidad débil en las plagioclasas, así como una alteración de clorita de mayor intensidad en la masa fundamental (**Figura 20**).

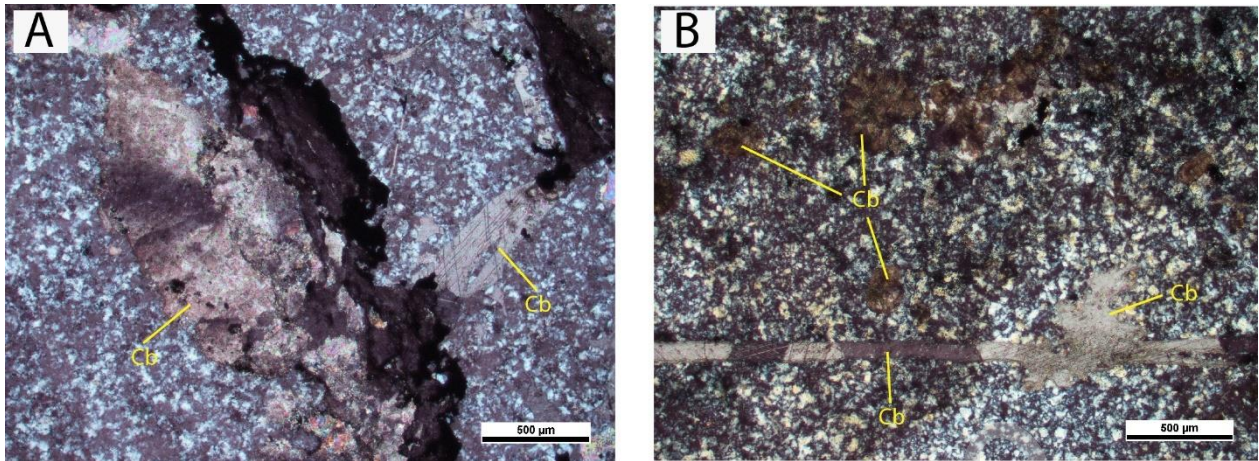


Figura 23: Fotomicrografías representativas de los minerales de alteración hidrotermal en las rocas hospedantes del depósito Portales, sector Blanco Este. A. Carbonatos como matriz de brecha. B. Carbonatos diseminados, en vetilla y parches. Cb: Carbonatos.

3.4. Mineralización

La mineralogía sulfurada en la mina Portales incluye calcopirita, bornita, calcosina, con una menor presencia de digenita, covelina y galena. Estos sulfuros exhiben diferentes estilos de mineralización, como diseminado, vetillas y como parte de la matriz de brecha. La mayor proporción de la mineralización sulfurada está asociada a la materia orgánica, principalmente al bitumen y en menor medida a restos fósiles de plantas, así como a los carbonatos.

En el sector Renata Norte, la mineralización de mena sigue el siguiente orden de abundancia: calcopirita > bornita > calcosina > galena > digenita > covelina. Estos minerales se encuentran diseminados, en vetillas y como reemplazos. Particularmente, la calcopirita se presenta en forma diseminada, vetillas y reemplazando a la bornita y galena (**Figura 24A, C**). Además, la calcopirita se observa formando “mantos”, los cuales se disponen de manera concordante a las láminas de bitumen, donde también se pueden observar algunos cristales diseminados de bornita (**Figura 24B**). La bornita se presenta en vetillas, algunas de las cuales están siendo reemplazadas por calcopirita (**Figura 24A**). También se presenta en forma diseminada y asociada a carbonatos y/o materia orgánica, como bitumen y restos fósiles de plantas (**Figura 25B**). Por otra parte, la calcosina está asociada con carbonatos (**Figura 25C, D**) y materia orgánica (bitumen y restos fósiles de planta). Se encuentra principalmente diseminada y ocasionalmente en vetillas finas (**Figura 25A**). En general, la calcosina suele ser reemplazada por bornita. Finalmente, la galena se observa diseminada y en vetillas, a menudo reemplazada por calcopirita (**Figura 24C**). El reemplazo de galena por calcopirita en las vetillas está restringido a los bordes de estas (**Figura**

24C). En el caso de los cristales diseminados de galena, el reemplazo por calcopirita puede llegar a ser total.

Finalmente, se observa un evento supérgeno de intensidad débil y local, el cual se caracteriza por la ocurrencia de mineralización de digenita y covelina, las cuales son muy poco abundantes (menor al 5% del total de sulfuros). Tanto la digenita como la covelina ocurren reemplazando a la bornita a partir de los bordes de grano.

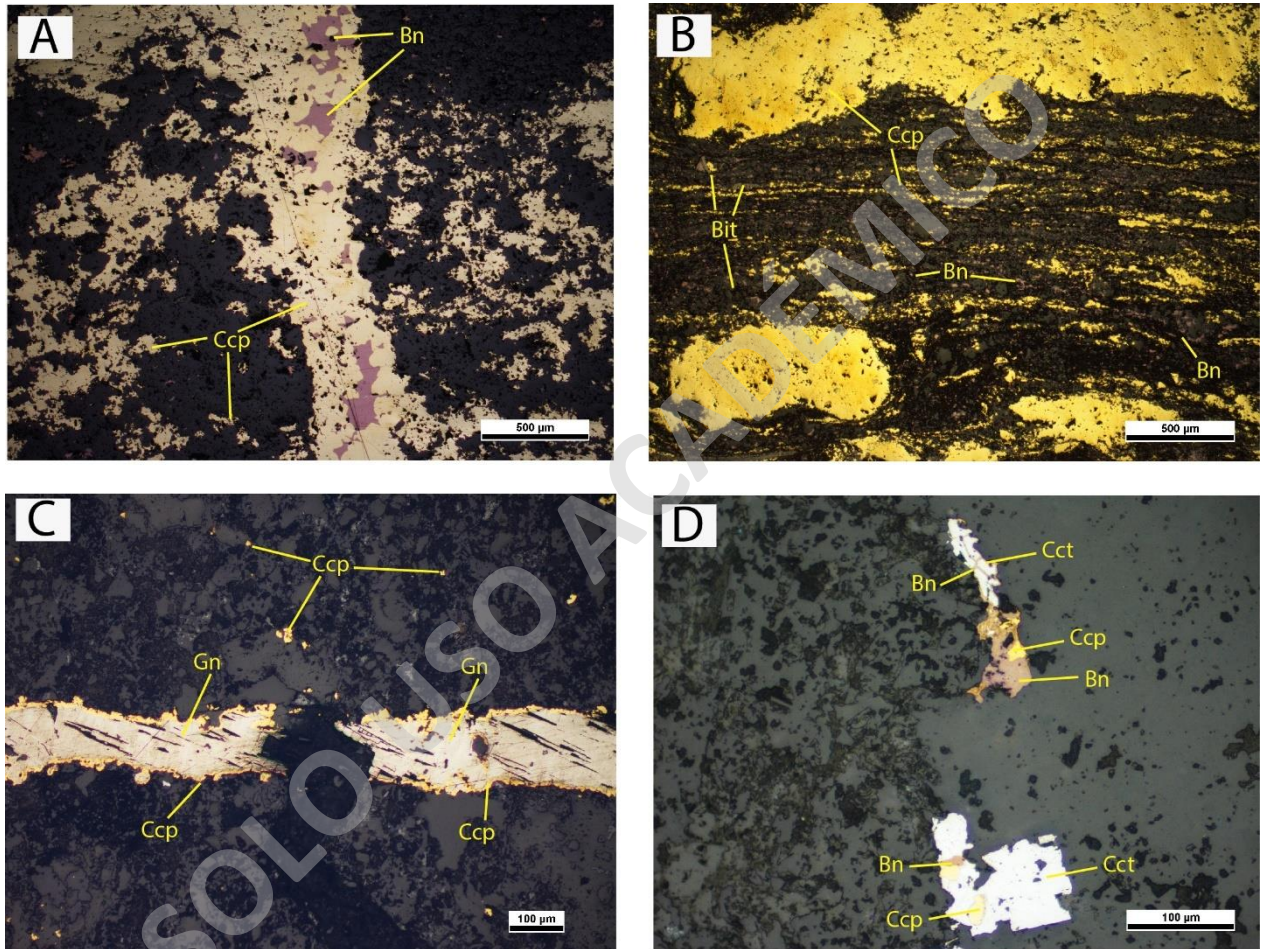


Figura 24: Fotomicrografías representativas de la mineralización sulfurada en la mina Portales. A. Bornita (Bn) siendo reemplazada por calcopirita (Ccp) en vetilla, además de calcopirita diseminada en los alrededores de la vetilla. B. Mineralización de calcopirita (ccp) en forma de "mantos" concordantes a las láminas de bitumen (Bit). Además, se observan cristales de bornita (Bn) diseminada dentro del bitumen. C. Galena (Gn) en vetillas siendo reemplazada por calcopirita (Ccp) a partir de los bordes de grano. Además, se observan cristales de calcopirita (Ccp) diseminada en los alrededores de la vetilla. D. Calcosina (Cct) siendo reemplazada por bornita (Bn), la cual a su vez es reemplazada por calcopirita (Ccp).

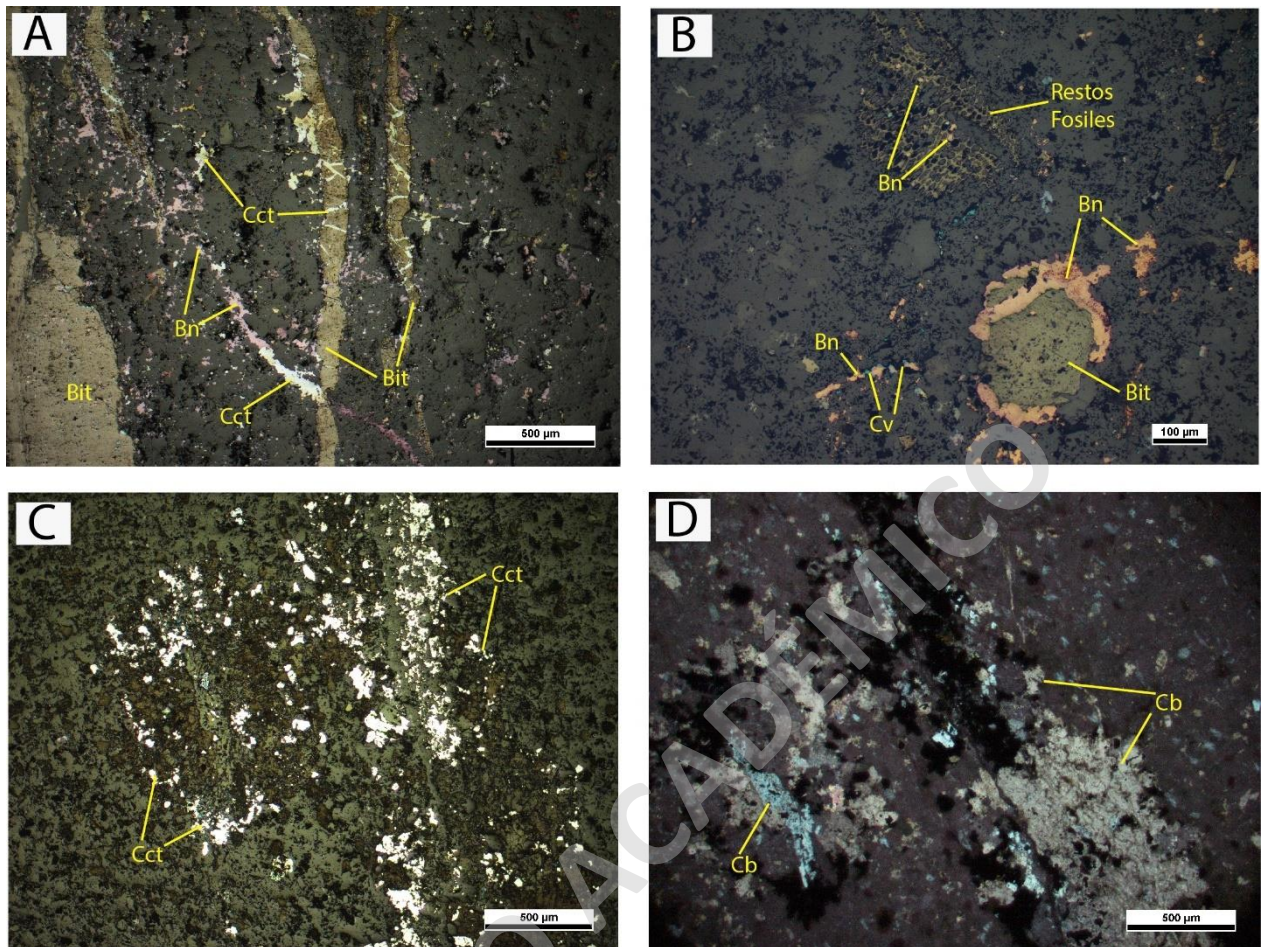


Figura 25: Fotomicrografías representativas de la mineralización sulfurada en la mina Portales. A. Calcosina (Cct) en vetillas cortando a bitumen (Bit) y diseminada, además de bornita (Bn) reemplazando a calcosina (Cct) y también presente de manera diseminada. B. Bornita (Bn) asociada a bitumen globular y también alojada en porosidades de restos fósiles de planta, algunos cristales diseminados son reemplazados por covellina (Cv). C. Calcosina (Cct) diseminada asociada a carbonatos (Cb). D. Mismo sector que “C”, pero en luz transmitida y nicoles cruzados.

En el sector Blanco Este, la mineralización se encuentra asociada principalmente a la ocurrencia de brechas hidrotermales, y en menor medida a fangolitas bituminosas. Los minerales de mena más abundantes son calcosina, bornita y calcopirita. La calcosina ocurre como diseminados finos a gruesos en la matriz de la brecha hidrotermal mineralizada (**Figura 26B**), y en menor medida diseminada en los clastos de *chert*. Además, la calcosina se encuentra asociada con la bornita en vetillas. Los bordes de los cristales de calcosina suelen observarse siendo reemplazados por bornita, y ocasionalmente se observa un reemplazo total. La bornita ocurre como diseminados finos a gruesos en la matriz de brecha (**Figura 26A**), y en menor medida también diseminada en clastos de *chert*. Asimismo, se la observa en vetillas, donde a menudo está siendo reemplazada por calcopirita. En algunas áreas, la mineralización de bornita se concentra en los bordes de los clastos de la brecha. Por otro lado, la calcopirita, también se presenta diseminada en la matriz de

brecha (**Figura 26A**), y al igual que en el sector Renata Norte, también se encuentra diseminada en asociación con la materia orgánica de las fangolitas.

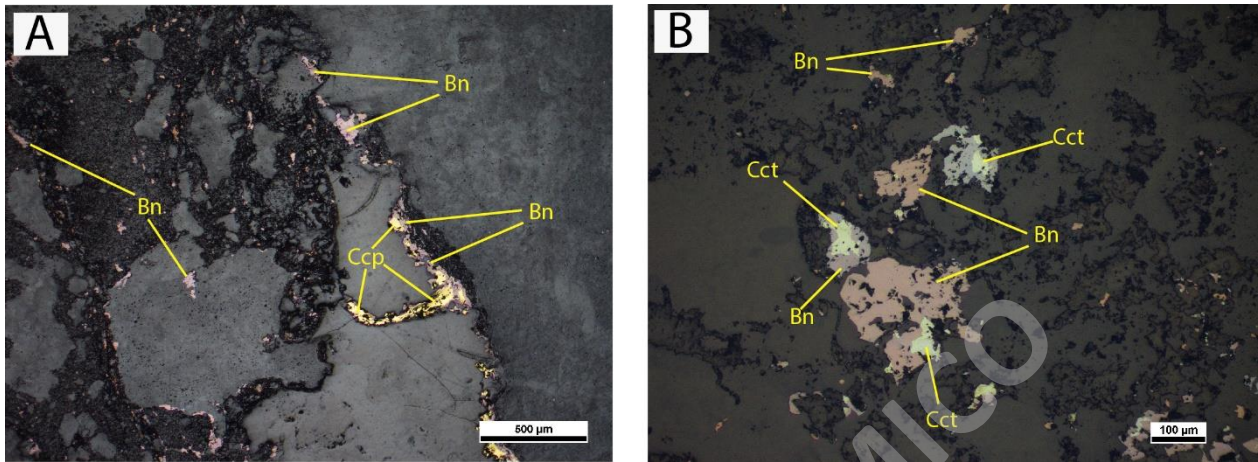


Figura 26: Fotomicrografías representativas de la mineralización sulfurada en la mina Portales. A. Mineralización de bornita (Bn) y calcopirita (Ccp) en matriz de brecha carbonatada, donde la calcopirita reemplaza la bornita. B. Cristales de calcosina (Cct) diseminados siendo reemplazados por bornita (Bn).

3.5. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), se obtuvieron imágenes de electrones retrodispersados (BSED) y datos de química mineral semi-cuantitativos de dos secciones transparentes-pulidas de los sectores Renata Norte (PO-19) y Blanco Este (PO-11). El análisis SEM se enfocó en los sulfuros, que se presentan de forma aislada o están asociados con materia orgánica y/o a carbonatos.

Para la determinación de la química mineral semi-cuantitativa, se examinan los espectros y la química mineral (porcentaje en peso, %peso) obtenida mediante SEM (**Anexo B**). Los resultados de los análisis químicos se comparan con las fórmulas estequiométricas de cada mineral para lograr la identificación más precisa posible de la fase mineral correspondiente. Específicamente, con respecto al análisis químico semi-cuantitativo de la materia orgánica, es necesario considerar que antes de llevar a cabo el análisis SEM, las muestras se recubrieron con una capa conductora de carbono (metalización). A continuación, se describen los principales resultados obtenidos.

3.5.1. Sector Renata Norte

Las imágenes BSED obtenidas mediante SEM de la lutita bituminosa (PO-19) muestran una abundante presencia de materia orgánica, la cual se observa de color negro (**Figura 27-Figura 30**). La ocurrencia de sulfuros de cobre (bornita y digenita-calcosina) y plata (stromeyerita) está estrechamente relacionada con la materia orgánica (**Figura 28**). Desde el punto de vista textural, esta materia orgánica se observa formando láminas, o bien, diseminada con bordes angulosos, además de encontrarse alrededor de las láminas (**Figura 27 y Figura 28**). Localmente, se puede notar que la materia orgánica se encuentra diseminada y dispuesta de manera concordante con los bordes de los cristales de cuarzo (**Figura 30**).

Mediante SEM, se reconoce la presencia de bornita, así como menor cantidad de calcosina-digenita, escasa stromeyerita y posible clorargirita. La bornita se observa diseminada y en contacto con bitumen. Incluso, se observa bornita diseminada muestra una disposición con una orientación preferencial o concordante en láminas y/o vetillas de materia orgánica (**Figura 27**). La calcosina-digenita se presenta diseminada dentro de la materia orgánica (**Figura 27 y Figura 28**), en forma de vetillas que cortan el bitumen (**Figura 28**), y en menor medida, en láminas paralelas gruesas y en contacto con láminas de materia orgánica (**Figura 28**). La stromeyerita, se observa exclusivamente diseminada en del bitumen (**Figura 28 y Figura 30**), asociada con calcosina-digenita y en menor medida con bornita diseminada. Finalmente, la clorargirita se observa solamente de manera local en forma de diseminados finos (**Figura 30**).

El análisis de química mineral semi-cuantitativa revela que los cristales de bornita y calcosina-digenita presentan contenidos de plata que varían entre 0,4 a 1,1 %peso Ag en los cristales de bornita (**Anexo B**), y entre 0,6 y 0,8 %peso Ag en los cristales de calcosina-digenita (**Anexo B**). Además, se identificó stromeyerita (CuAgS) con contenidos de plata que oscilan entre el 43 a 46.6 %peso Ag (**Anexo B**). Posiblemente también está presente la clorargirita (AgCl; **Anexo B**). Por otra parte, en la materia orgánica se detectaron contenidos variables de algunos elementos como Cl, S y Cu, y en menor medida aluminio Al, Mn y Na (**Anexo B**).

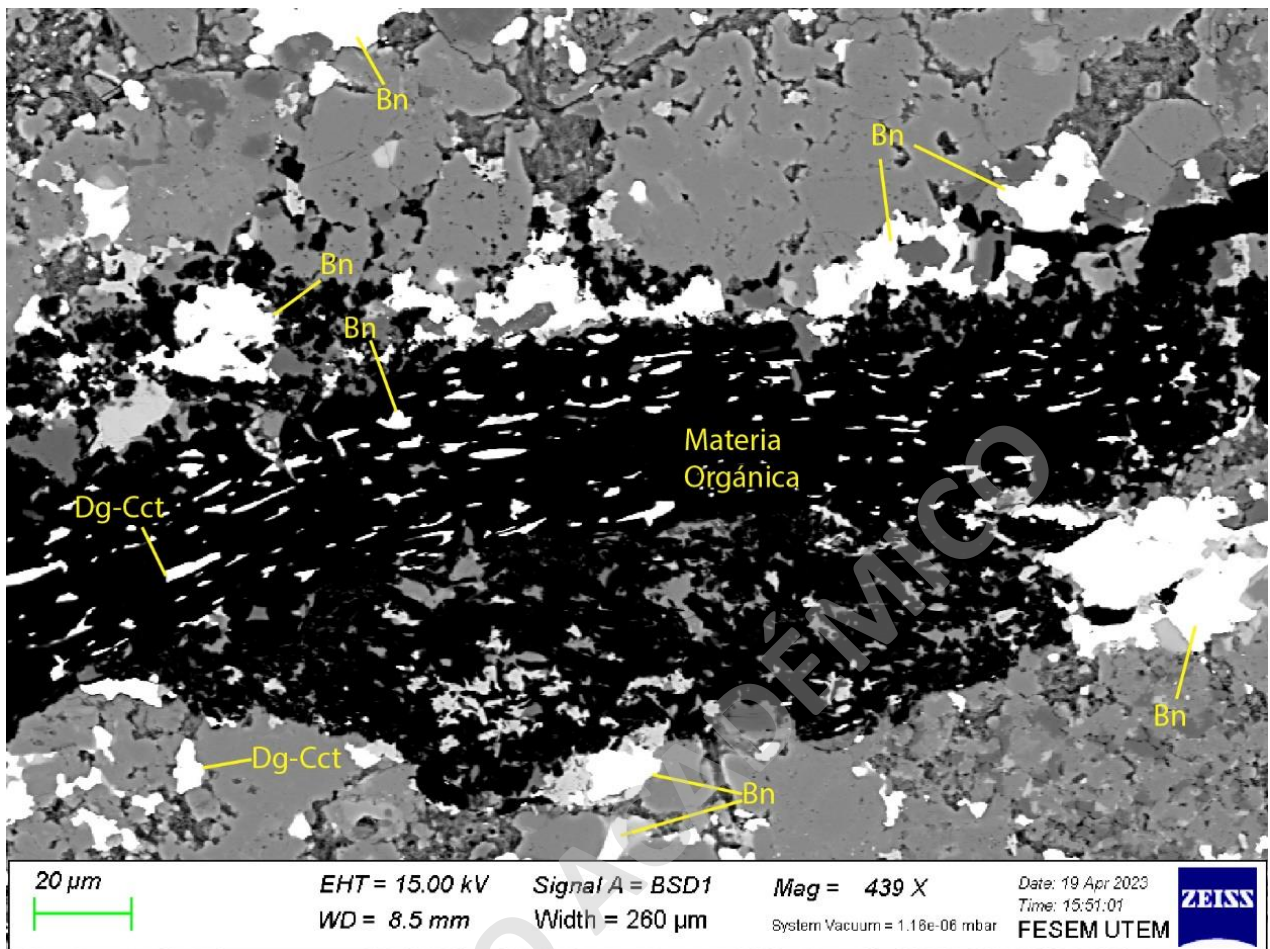


Figura 27: Microfotografía de SEM del sector Renata Norte. Los sulfuros digenita-calcosina (Dg-Cct) y bornita (Bn) se observan asociados con materia orgánica, como agregados finos o de mayor tamaño hacia los bordes de los cúmulos de materia orgánica.

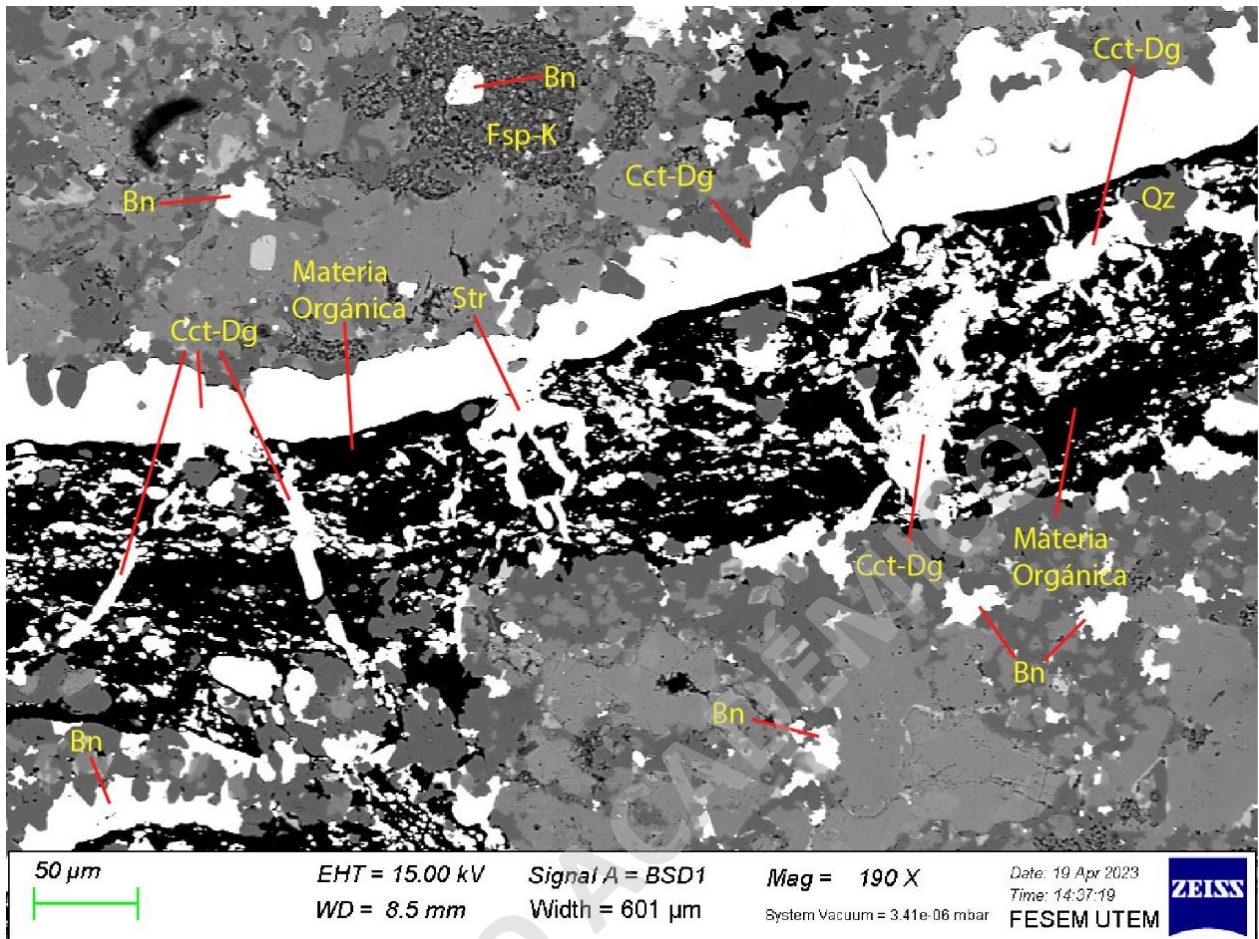


Figura 28: Microfotografía de SEM del sector Renata Norte. Los sulfuros digenita-calcosina (Cct-Dg) y bornita (Bn) se observan asociados con materia orgánica, diseminados y en vetillas. Asimismo, estos sulfuros se observan en los bordes de la materia orgánica como agregados masivos, y formando granos diseminados. También se presenta stromeyerita (Str) dentro de la materia orgánica.

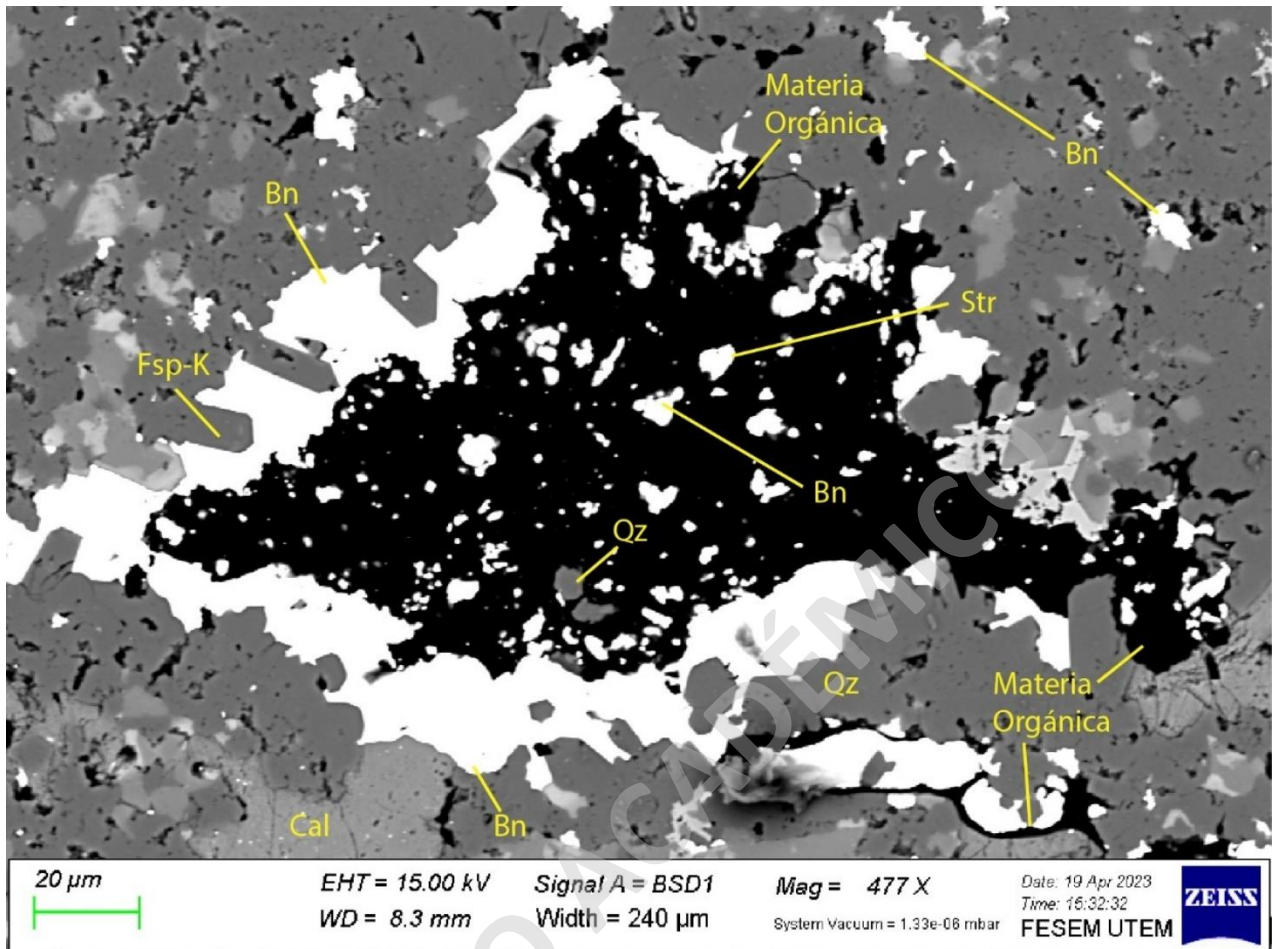


Figura 29: Microfotografía de SEM del sector Renata Norte. Los sulfuros bornita (Bn) y stromeyerita (Str) se observan asociados con materia orgánica de forma diseminada, y masivos en contacto con el borde de esta. Además, se presentan cristales diseminados de bornita (Bn) aledaños a la materia orgánica.

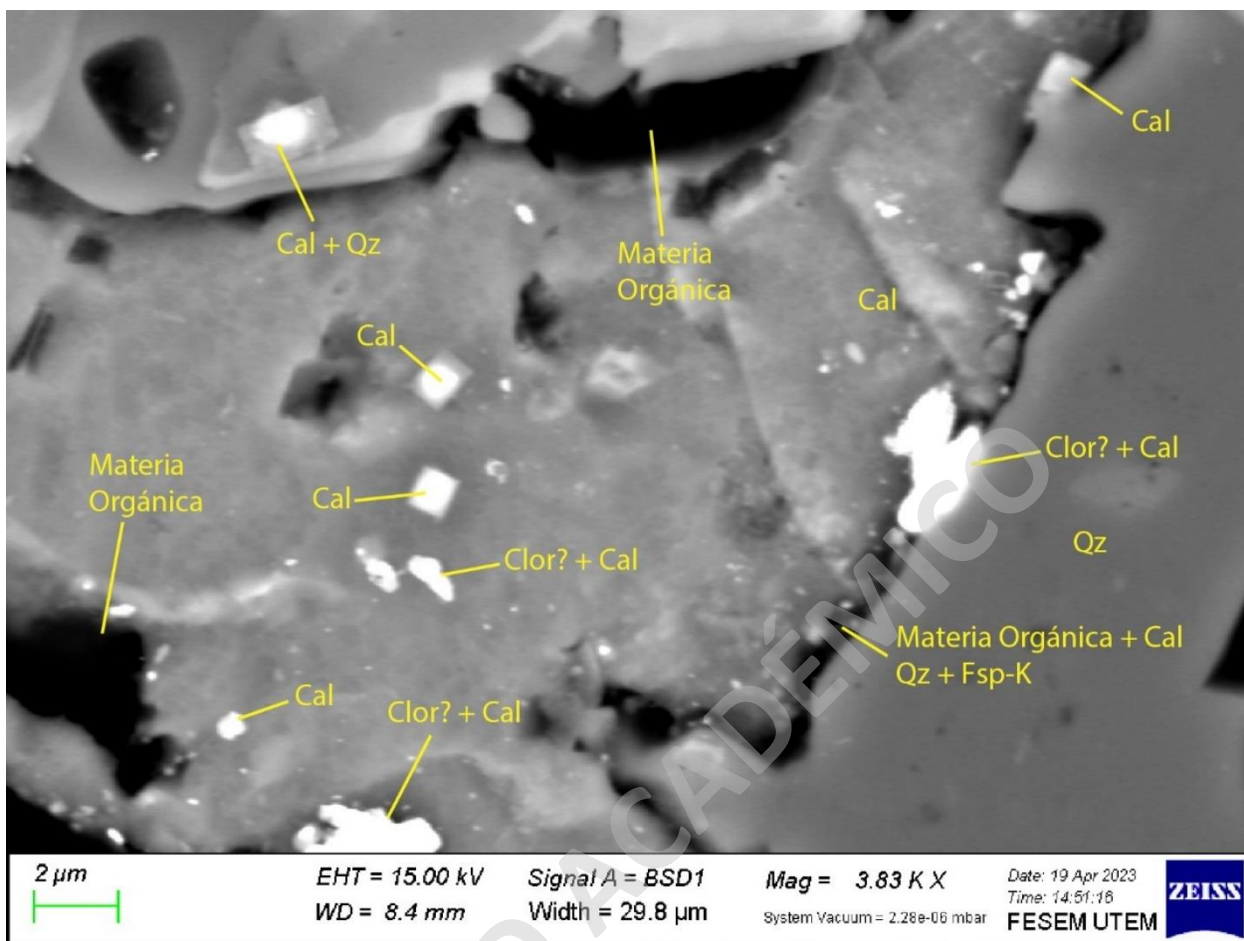


Figura 30: Microfotografía de SEM del sector Renata Norte. Se observa posible clorargirita (Clor) diseminada y probablemente mezclada con micro- o nanocristales de calcita, además de calcita euédral diseminada. La materia orgánica se presenta diseminada y también en contacto con bordes de clastos de cuarzo. Abreviaciones: Cal: calcita; Qz: cuarzo; Fsp-K: feldespato potásico; Clor: clorargirita.

3.5.2. Sector Blanco Este

Las imágenes BSED obtenidas mediante SEM de la brecha hidrotermal (PO-11), compuesta por clastos de chert y matriz carbonatada, revelan una presencia limitada de materia orgánica. La ocurrencia de bornita y calcopirita está directamente asociada a la materia orgánica (**Figura 31-Figura 33**). Desde una perspectiva textural, la materia orgánica se observa diseminada, con bordes angulosos y, en ocasiones con bordes más suavizados. Asimismo, se dispone de manera concordante de los bordes de clastos de cuarzo y, por último, como finas vetillas (**Figura 31-Figura 33**).

Por otro parte, la mineralización de bornita y calcopirita también está relacionada la presencia de carbonatos (**Figura 31** y **Figura 32**), los cuales se presentan como cristales de hábito masivo y en forma diseminada. Se puede observar bornita y calcopirita en contacto con la materia orgánica

y los carbonatos (**Figura 31** y **Figura 32**) y ocasionalmente se distinguen concordantes con finas vetillas de materia orgánica (**Figura 31**). Adicionalmente, se observan cristales de hábito cúbico con inclusiones de materia orgánica que han sido reemplazados por bornita (**Figura 32**).

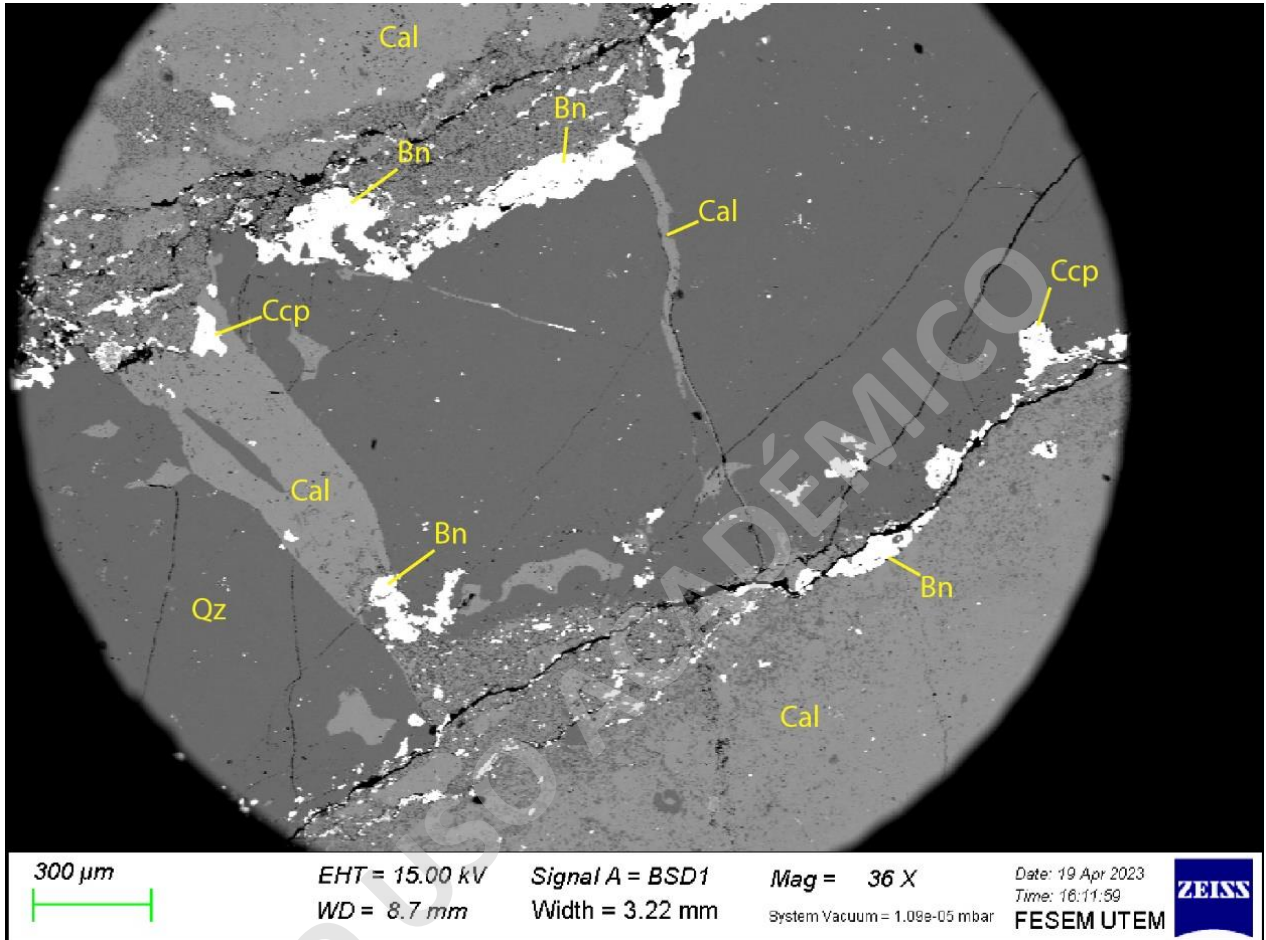


Figura 31: Microfotografía de SEM de brecha hidrotermal mineralizada del sector Blanco Este. Cristales de calcopirita (Ccp) y bornita (Bn) diseminadas asociadas espacialmente a materia orgánica (venillas negras) y calcita (Cal).

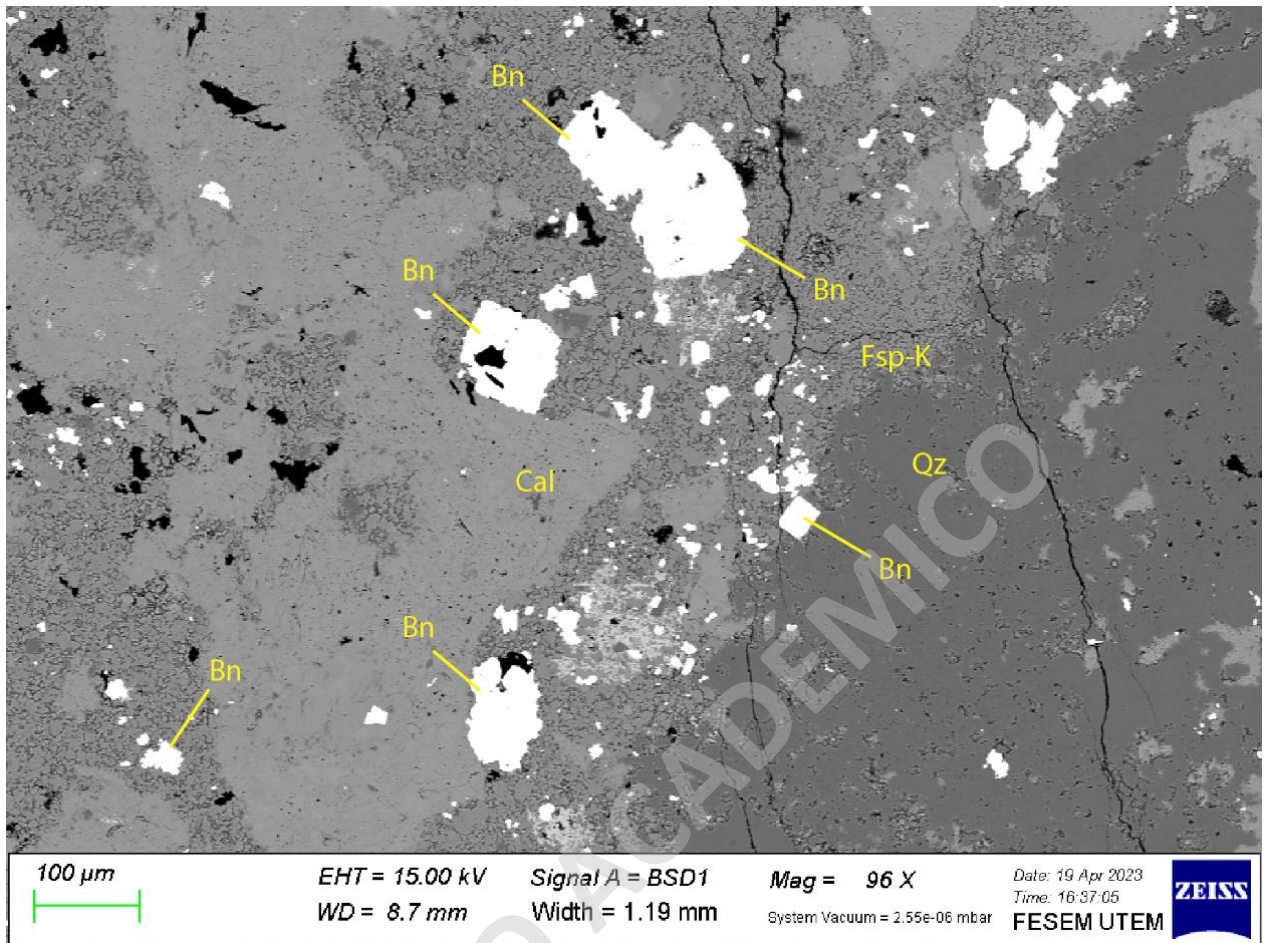


Figura 32: Microfotografía de SEM de brecha hidrotermal mineralizada del sector Blanco Este. Se observa mineralización de bornita (Bn) diseminada y rellenando espacios. Adicionalmente, se distinguen cristales de bornita reemplazando pirita (Py) euédral a subédral con hábito cúbico e inclusiones de materia orgánica. Abreviaciones: Bn: bornita; Cal: calcita; Qz: cuarzo; Fsp-K: feldespato potásico.

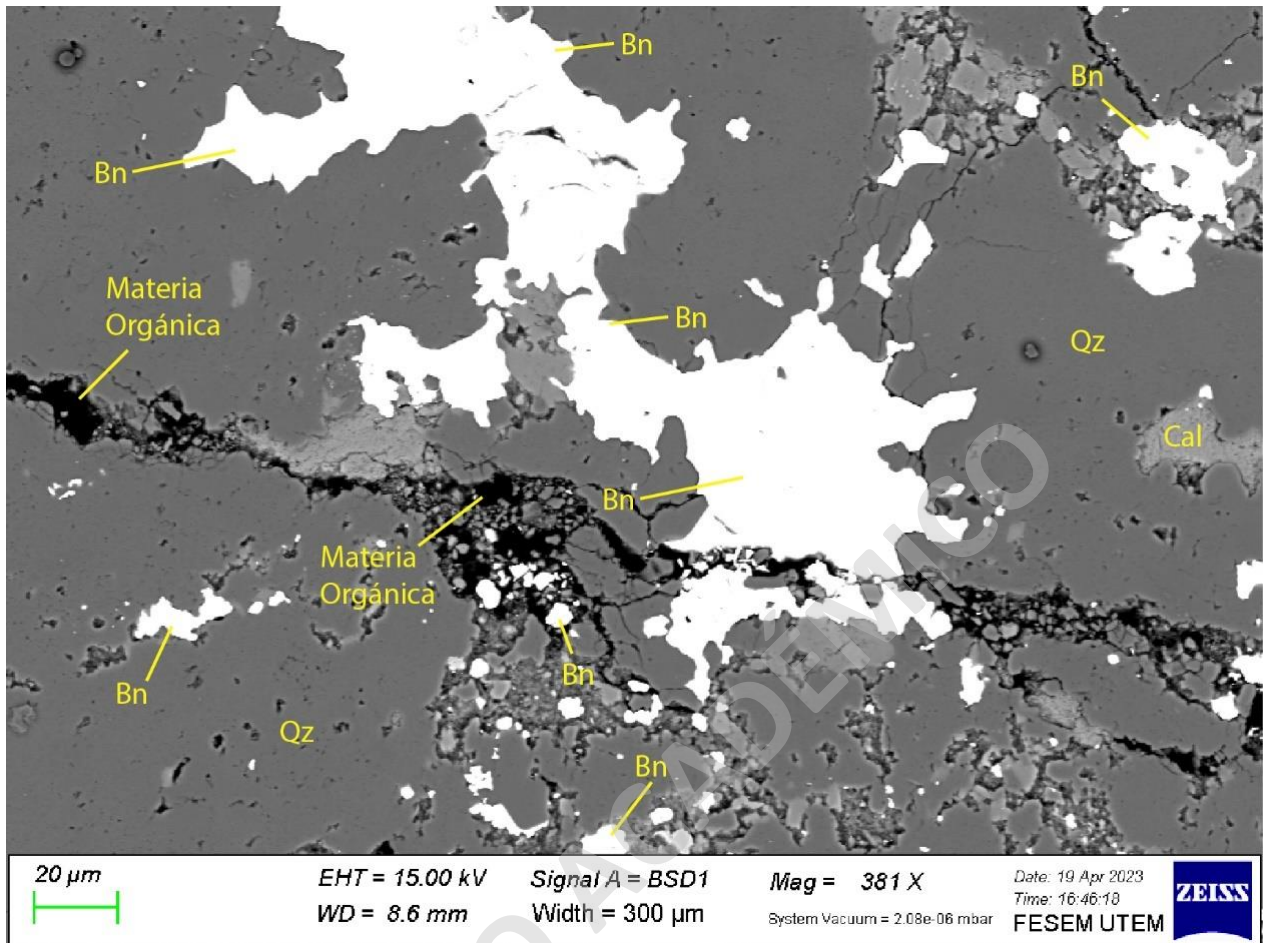


Figura 33: Microfotografía de SEM de brecha hidrotermal mineralizada del sector Blanco Este. Se observa una vetilla irregular de materia orgánica con bornita diseminada en sectores, cortando un cristal de bornita. Además, se aprecian carbonatos (Cal) rellenando espacios.

El análisis de química mineral semi-cuantitativa muestra que los principales sulfuros corresponden a bornita y calcopirita. Las concentraciones de Ag en bornita varían entre 0.5 y 1.5 %peso Ag (**Anexo B**). Por otra parte, en el sector Blanco Este, la materia orgánica muestra únicamente contenidos variables de Cl (**Anexo B**).

4. Discusiones

4.1. Geología del Depósito

A partir de la descripción de secciones transparentes-pulidas de rocas del interior de la mina, análisis a través de microscopía electrónica de barrido (SEM) y la recopilación de estudios previos, se presenta una actualización de la geología del yacimiento estratoligado Cu-Ag Portales.

Esto abarca aspectos relacionados con su litología, alteración hidrotermal y mineralización, además de los factores geológicos que controlan su formación.

4.1.1. Litologías

Las principales litologías descritas en este estudio corresponden a lutitas, fangolitas, areniscas, brechas hidrotermales y diques andesíticos. La figura **Figura 34** muestra la columna estratigráfica esquemática que describe la secuencia de rocas sedimentarias clásticas que alojan al yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales. La mineralización de cobre y plata se encuentra hospedada principalmente dentro de los estratos de lutitas y fangolitas, las cuales contienen variados contenidos de materia orgánica y restos fósiles de plantas (**Figura 34**). Cabe destacar que las litologías que fueron descritas de manera macroscópica por los geólogos de la mina Portales, como “jaspe” y “margas”, son clasificadas de manera diferente según su observación microscópica.

La arenisca calcárea hematizada (**Figura 16, Figura 17 y Figura 34**), previamente descrita como “jaspe”, se caracteriza por su tonalidad rojiza producto de una intensa hematización. A pesar de que puede presentar una fuerte silicificación (**Figura 18 y Figura 19**), su descripción bajo el microscopio óptico revela claramente una textura clástica, es decir, compuesta por fragmentos de mayor tamaño, matriz y cemento.

La brecha hidrotermal mineralizada del sector Blanco Este (**Figura 14 y Figura 15**), caracterizada por su tonalidad oscura y su composición carbonatada, fue previamente clasificada por los geólogos de la compañía minera como una “marga”. Según su definición, una marga consta de un contenido de carbonato de calcio que oscila entre un 30-70%, junto con clastos tamaño arcilla normalmente, que también oscilan entre un 30-70%. Sin embargo, tanto a nivel macroscópica como microscópica, se ha identificado una textura brechizada (**Figura 14 y Figura 15**). Además, bajo el microscopio se pueden reconocer los componentes característicos de una brecha, como los clastos de *chert* rotados y una matriz de carbonatos y polvo de roca (**Figura 15**), la cual presenta mineralización de calcopirita y bornita.

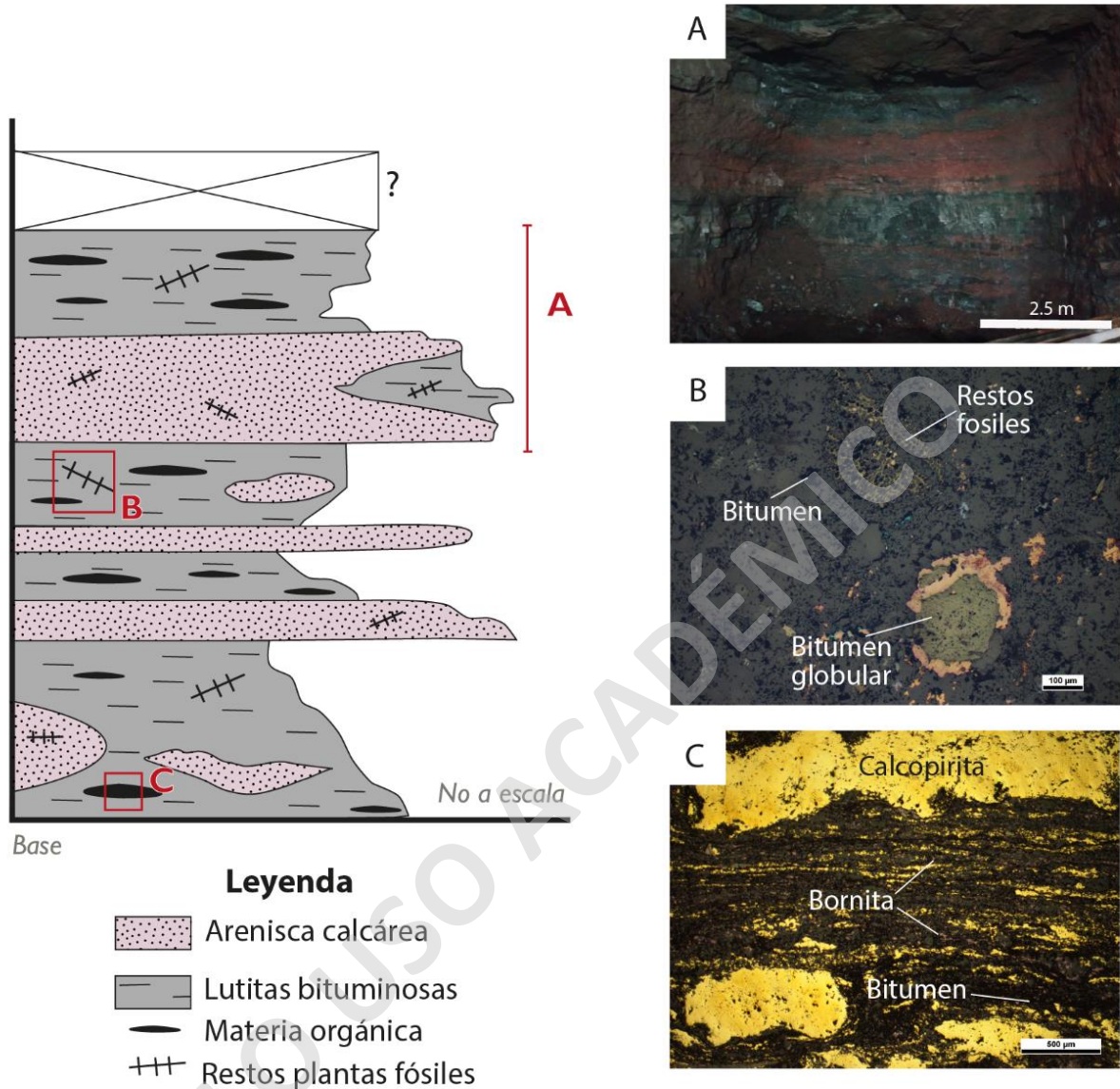


Figura 34: Columna estratigráfica esquemática del yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales. A: Frente de explotación de la mina Portales, se observa una intercalación de areniscas calcáreas (rojizas) con lutitas (negruzcas). B: Bitumen globular asociado a bornita (Bn), bitumen angular diseminado y restos fósiles de plantas que alojan cristales diseminados de bornita (Bn). C: Mineralización de calcopirita (ccp) en forma de “mantos” concordantes a las láminas de bitumen.

4.1.2. Secuencia Paragenética de Alteración y Mineralización

La alteración hidrotermal y mineralización en el depósito Portales muestra similitudes con lo descrita en otros depósitos estratoligados Cu-(Ag) en Chile pertenecientes al Cretácico (Maksaev y Zentilli, 2002; Vilches, 2018; González, 2018; Herazo et al., 2020; Maureira et al., 2022). Se

identifican al menos cuatro etapas de alteración/mineralización, incluyendo un evento de pre-mineralización, dos eventos de mineralización hipógena y un evento supérgeno (**Figura 36**).

El primer evento (pre-mineralización) se caracteriza por la presencia de materia orgánica asociada con carbonatos (**Figura 36**). Durante este evento, tiene lugar la cementación de lutitas, fangolitas y areniscas con cemento calcáreo. Con base en estudios realizados en la mina El Soldado, se plantea que el bitumen se forma en las etapas de diagénesis y metamorfismo regional (Boric et al., 2002).

De acuerdo con las observaciones petro-calcográficas y el análisis mediante microscopía SEM, se identifican diversos subeventos de introducción de materia orgánica y/o bitumen. La ocurrencia de variadas texturas (tales como inclusiones dentro de cristales cúbicos de pirita reemplazados por bornita, diseminados de bordes angulosos, láminas, vetillas y globular) y las relaciones de corte observadas sugieren la existencia de múltiples generaciones de materia orgánica durante la etapa de pre-mineralización. Además, se plantea que una parte considerable de los carbonatos asociados con esta etapa se originaron debido a la disolución de minerales de carbonato, como la calcita, que se encuentra presente en las areniscas calcáreas.

En contraste, en las muestras de roca descritas en este estudio no se identificó la presencia de pirita con textura framboidal. Sin embargo, recientemente se reportó la ocurrencia de piritas framboidales en muestras de mano en el sector Ramon (**Figura 35**). La formación de pirita framboidal de origen diagenético durante la etapa de pre-mineralización, ha sido previamente documentada en otros estratoligados Cu-(Ag) del Cretácico (Boric et al., 2022; Arribasplata, 2016; Maureira, 2018; Vilches, 2018; Maureira et al., 2022).

Durante el evento principal de mineralización (Evento I), tiene lugar la mayor parte de la precipitación de sulfuros en el yacimiento Portales, incluyendo calcosina, digenita, bornita, calcopirita, pirita, galena, stromeyerita y posiblemente clorargirita (**Figura 36**). En general, la primera etapa comienza con la mineralización de calcosina, menor bornita y ocasional stromeyerita y clorargirita (?); estas se observan diseminadas, en vetillas y asociadas a materia orgánica y/o carbonatos. Además, tanto la bornita como la calcopirita pueden ocurrir como reemplazos de diseminados de pirita euhedral y/o framboidal. Posteriormente, la calcosina es reemplazada por bornita y ocurre la mineralización de calcopirita asociada a materia orgánica, y en menor medida, con carbonatos. Por último, ocurre la mineralización de galena diseminada y en vetillas, además del reemplazo de bornita por digenita a partir de los bordes de granos. Durante este evento se habría introducido la mayor parte de la plata al sistema, estando estrechamente

relacionada con la mineralización de sulfuros de cobre. En el caso de los depósitos Altamira y Las Luces, los análisis de microsonda electrónica reportan altos contenidos de plata en solución sólida en bornita y calcosina (Maureira et al., 2022).



Figura 35: Pirita framboidal (PyF) en areniscas grises de grano fino, mina Portales, sector Ramón (al norte del sector Renata Norte).

Adicionalmente, en la mina Portales se observan inclusiones de materia orgánica dentro de cristales cúbicos de pirita reemplazados por bornita (**Figura 32**). También se aprecia materia orgánica diseminada con bordes angulosos, láminas, vetillas y globulares, lo que sugiere la posibilidad de que exista más de un proceso de pre-mineralización relacionado con la materia orgánica, incluso dentro del Evento I, que es el evento de mayor mineralización. Las asociaciones de alteración hidrotermal del Evento I, son principalmente carbonato-epidota, clorita-epidota, clorita, albita, cuarzo, epidota-cuarzo y carbonatos, y suelen observarse asociados a vetillas (**Figura 36**). El mineral de alteración más abundante en este evento es el carbonato, presentándose en forma de vetillas, parches, matriz de brecha y diseminados. Estas asociaciones mineralógicas son consistentes con otros yacimientos estratoligados Cu-(Ag), que suelen

desarrollar halos de alteración propilítica alrededor de las vetas mineralizadas (Boric et al., 2002; Makshev y Zentilli, 2002; Maureira, 2018; González, 2018; Maureira et al., 2022).

Durante el segundo evento de mineralización (Evento II), ocurren los reemplazos de bornita y galena por calcopirita, y en menor medida de calcopirita por pirita. De manera similar, el reemplazo de galena por calcopirita ha sido documentado en el proyecto Mantos, perteneciente al Distrito Cerro Negro (Arribasplata, 2016). Además, los análisis de microsonda electrónica en el depósito Mantos indican que la galena no aporte plata al sistema (Arribasplata, 2016). Durante este evento también se registra el reemplazo de bornita por digenita, aunque en menor grado que en el Evento I.

A nivel local, se desarrolla un evento supérgeno representado por covelina, que reemplaza a la bornita y se asocia con digenita. La covelina también se observa ocasionalmente junto con digenita. Adicionalmente, este evento está acompañado por una presencia abundante de hematita, la cual se altera las areniscas calcáreas. Este evento no posee importancia económica debido a la escasa cantidad de pirita en la zona de estudio, lo que impide la generación de ácido sulfúrico y, por ende, la lixiviación de sulfuros de cobre primarios. De manera similar, a pesar de que el desarrollo de perfiles de enriquecimiento supérgeno ha sido ampliamente reconocido en depósitos estratoligados Cu-(Ag) chilenos, como en Altamira, Las Luces, Lorena, 21 de Mayo y Manto Cobrizo, este proceso suele ser muy limitado (Vilches, 2018; González, 2018; Herazo et al., 2020; Maureira et al., 2022).

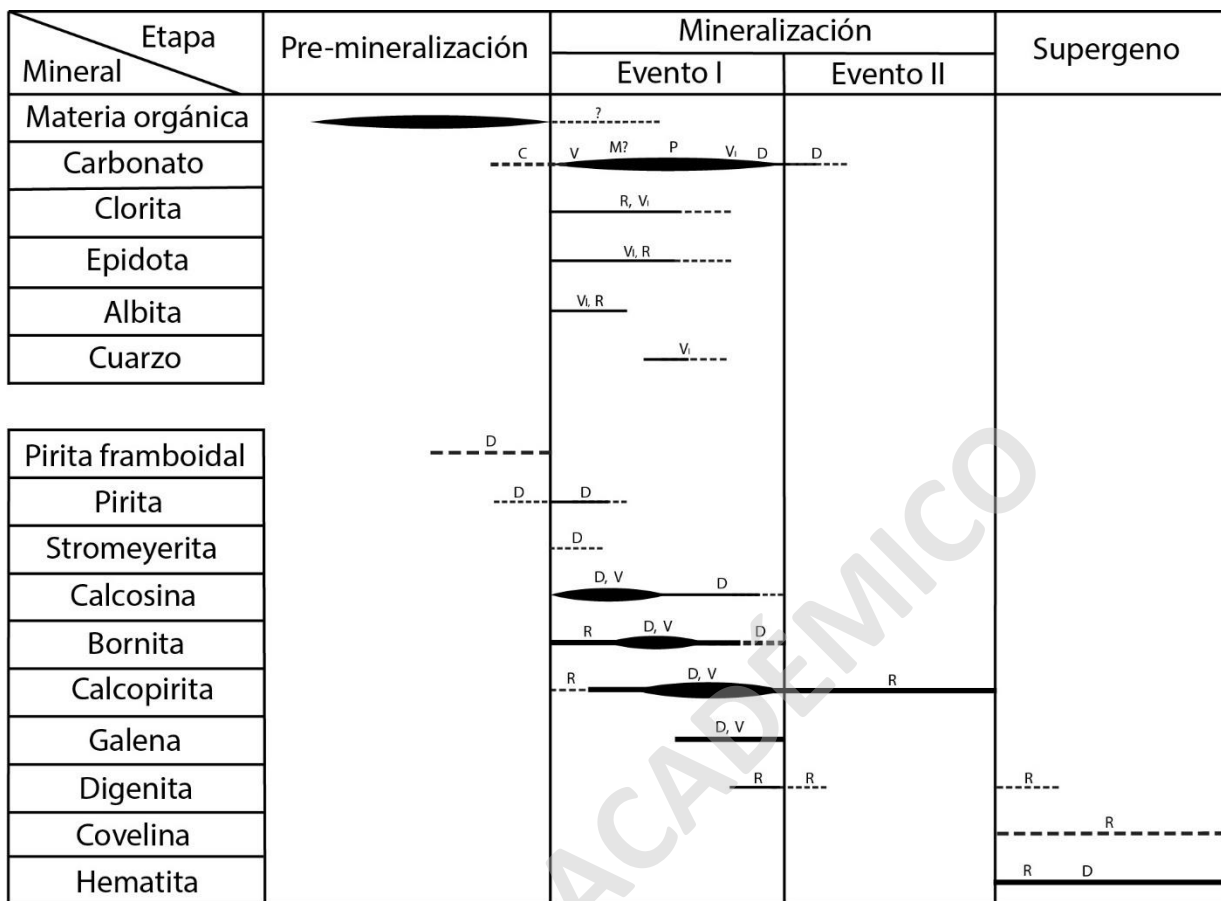


Figura 36: Secuencia paragenética de alteración hidrotermal y mineralización del yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales. Se identifican cuatro eventos principales: pre-mineralización, mineralización (Evento I y II) y supérgeno. La proporción de los minerales va de acuerdo con el grosor de las barras. Las letras sobre las barras indican los principales estilos de mineralización. Abreviaciones: C: cemento; V: vetilla; M: matriz de brecha; P: parches; Vi: vetillas compuestas por más de un mineral; D: diseminados; R: reemplazo.

4.1.3. Control de la Mineralización

Mediante las observaciones de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido se identificó que la mineralización de cobre en el yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales está principalmente controlada por el contenido de materia orgánica y carbonatos.

En varios depósitos estratoligados Cu-(Ag) de la Cordillera de la Costa se ha reportado la presencia de bitumen y/o pirobitumen en asociación con fases minerales de cobre (Maksaev y Zentilli, 2002; Cisternas y Hermosilla, 2006; Herazo et al., 2020; Maureira et al., 2022). Consistentemente, en la Mina Portales la ocurrencia de materia orgánica (bitumen y restos de plantas fósiles) es ubicua. El bitumen se encuentra espacialmente asociado con la mineralización de sulfuros de cobre, estando estos últimos en contacto directo, diseminados con o sin una

orientación preferencial con las láminas de materia orgánica, o bien, como finas vetillas que contienen o no bitumen, las cuales cortan generaciones más tempranas de bitumen.

Con base en observaciones (FE)-SEM, análisis mediante microsonda electrónica (EMPA) y micro-fluorescencia de rayos-X (μ FRX) en bitumen, Herazo et al. (2020) presentan un modelo genético para la generación de hidrocarburos en el depósito estratoligado Cu-(Ag) Lorena (**Figura 37**). En este modelo, la materia orgánica actúa como una trampa redox para los fluidos hidrotermales ricos en cobre, favoreciendo la precipitación de sulfuros de cobre y cobre-plata, al reducir iones metálicos en contacto con esta. Las observaciones texturales y morfológicas de la materia orgánica en la mina Portales concuerdan con los procesos claves que se han sugerido para la formación de este tipo de depósitos. Además, la porosidad asociada con los restos de plantas fósiles podría haber generado espacios propicios para la precipitación de sulfuros de cobre.

Conforme al estudio de Herazo et al. (2020), en la primera etapa del modelo, es decir, durante la pre-mineralización, se generó petróleo en las formaciones sedimentarias, que posteriormente fue movilizado por fluidos en forma de gotas inmiscibles (**Figura 37A, B**). Además, se originan nano- a microcristales de pirita, los cuales pueden ser transportados junto con la fase orgánica. Posteriormente, los hidrocarburos migran hacia las rocas volcánicas que albergan la mineralización, rellenando vesículas y fracturas en forma de pirobitumen globular (**Figura 37C, D**). Al mismo tiempo, se generan cristales de pirita en presencia de hidrocarburos, lo que puede resultar en la formación de inclusiones de nano- a micropirobitumen en los cristales de pirita (**Figura 37D**). Durante la etapa de mineralización, un fluido hidrotermal rico en cobre es introducido en el sistema, interactuando con la materia orgánica (pirobitumen). Dicha interacción entre el fluido hidrotermal y el pirobitumen gatilla la precipitación de sulfuros de cobre debido a procesos de reducción (**Figura 37E, F**).

En el depósito Lorena, la materia orgánica contiene una serie de elementos traza (tales como V, Ni, Zn, Au, Cu y U) y ligantes (por ejemplo, S, Cl e I), proponiéndose que al menos parte de S, y posiblemente algunos metales como Cu y Au podrían haber sido aportados por el pirobitumen (Herazo et al., 2020). Previamente, Vilches (2018) determinó que la composición del bitumen en los yacimientos El Soldado, Mantos Cobrizos y La Culebra del Cretácico incluye complejos hetero-aromáticos y una cantidad significativa de metales y ligantes (Fe, Cu, S y Cl). Por consiguiente, se descarta el rol del bitumen solamente como agente reductor, ya que también podría desempeñar un papel como un agente de transporte de elementos (Vilches, 2018).

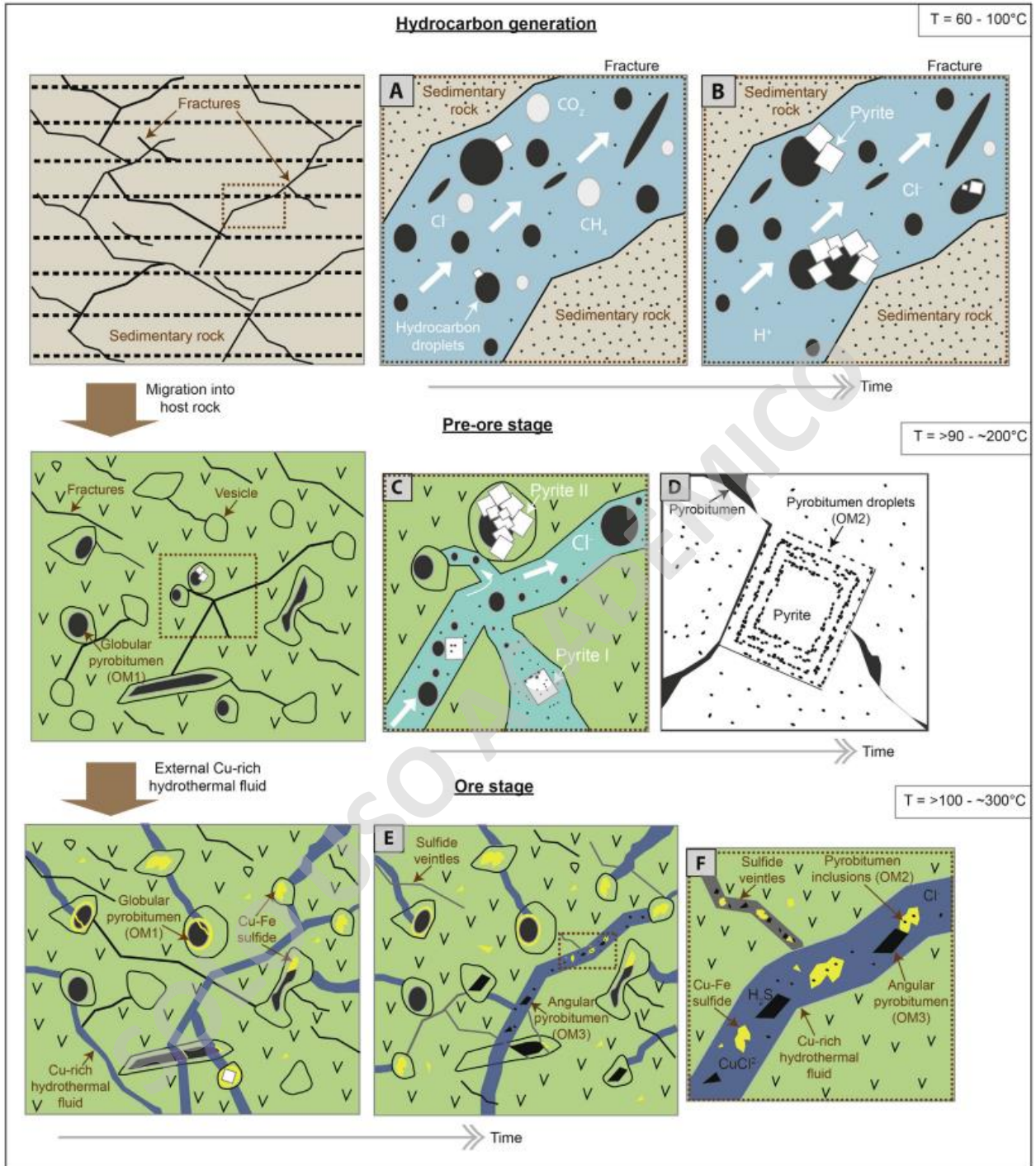


Figura 37: Modelo de generación de hidrocarburos para el depósito estratoligado Cu-(Ag) Lorena. Extraído de Herazo et al. (2020).

Por otra parte, se encuentra ampliamente aceptado que los carbonatos desempeñan un rol fundamental en la neutralización efectiva de los fluidos hidrotermales (Barker y Dipple, 2019). En el caso del yacimiento Portales, se propone que la disolución y posterior reprecipitación de

carbonatos provenientes de las areniscas calcáreas podría haber tenido un papel significativo en su formación. El efecto en el pH de los fluidos y la disolución de la calcita (como cemento diagenético) podría haber generado porosidad secundaria y “cavidades” en la roca (paleopermeabilidad), creando así espacios vacíos donde los sulfuros de cobre pudieron precipitar y acumularse. Consistentemente, los procesos de disolución y reprecipitación de carbonatos han sido documentados en la génesis de varios depósitos estratoligados hospedados en rocas sedimentarias de Irán (por ejemplo, el depósito Ghareh Tapeh; Dare, 2015; Maghfouri et al., 2020).

En el sector Blanco Este, se pueden identificar brechas hidrotermales compuestas por clastos de *chert* y una matriz de polvo de roca, con una presencia abundante de carbonatos y una menor cantidad de materia orgánica. Estas brechas también exhiben mineralización de sulfuros de cobre, como bornita, calcopirita y calcosina. En consecuencia, dado a su abundancia, se propone que el factor principal que controla la mineralización en este sector de la mina es la presencia de carbonatos, aunque no se descarta la posibilidad de un control mixto en la mineralización (carbonatos + materia orgánica). Por otra parte, en el sector Renata Norte, se observan parches, vetillas y diseminados de carbonatos que están asociados espacialmente a la mineralización de sulfuros de cobre. Sin embargo, el contenido de sulfuros de cobre (calcosina-digenita, bornita, calcopirita, galena) asociado a los carbonatos es menor que el asociado a la materia orgánica. Esto sugiere que el principal factor que controla la mineralización en el sector Renata Norte es el contenido de materia orgánica, aunque tampoco se puede descartar un control mixto que involucre tanto carbonatos como materia orgánica.

Finalmente, se concluye que la mineralización del yacimiento Portales está fuertemente influenciada por factores litológicos, como el tipo de roca sedimentaria, su contenido de materia orgánica y/o de carbonatos, así como su permeabilidad litológica (por ejemplo, lutita, fangolitas y areniscas; **Figura 34**). No obstante, también se reconoce una influencia significativa de factores estructurales, donde los fluidos mineralizadores podrían ascender a través de fallas para luego depositar su carga metálica en forma de vetillas y brechas hidrotermales. En el yacimiento Portales se ha identificado un sistema estructural preferencial con orientaciones NE y NW, siendo el sistema NE asociado principalmente con la intrusión de la mayoría de los diques, mientras que las estructuras NW podrían representar los conductos principales de transporte de los fluidos hidrotermales y los canales alimentadores del sistema (Informe interno y confidencial mina Portales, 2018). Previamente se ha sugerido que los conductos alimentadores de los cuerpos mantiformes en el norte de Chile corresponden a vetas-fallas, y que los cuerpos vetiformes

podrían formar “bolsones” o “mantos” de mayor tamaño en zonas litológicamente propicias (Boric et al., 2002; Kojima et al., 2009; Herazo et al., 2020; Maureira et al., 2022), lo cual concuerda con las evidencias geológicas en la mina Portales.

4.1.4. Ocurrencia de la Plata

Los datos microtexturales y composicionales obtenidos a través de SEM en este estudio, muestran que la plata en el yacimiento Portales se incorpora dentro de la bornita y calcosina. Además, se observa la existencia de microcristales de stromeyerita (AgCuS), la cual ocurre diseminada dentro de la materia orgánica.

Los análisis de química semi-cuantitativa revelan concentraciones de plata en la bornita que oscilan entre 0,4 a 1,1 %peso Ag, y en la calcosina-digenita entre 0,6 a 0,8 %peso Ag. Estos datos sugieren que la plata se incorpora a través de una solución sólida en sulfuros de cobre, de manera similar a lo documentado en los yacimientos Altamira y Las Luces. En estos yacimientos, se determinaron concentraciones de plata en la calcosina del orden de 0,08-0,15 %peso Ag para ambos depósitos, y en la bornita de Las Luces del orden de 0,02-0,27 %peso Ag (Maureira et al., 2022). Además, en el sector Renata Norte se identifican minerales de plata como la stromeyerita, con concentraciones de plata que van entre el 43 a 46 %peso Ag, y posiblemente clorargirita (?) con concentraciones de plata muy variables, oscilando entre el 6 y el 39,2 %peso Ag). Esta variabilidad en las concentraciones de plata podría deberse a que, durante el análisis químico semi-cuatitativo, se pudo haber medido tanto las microinclusiones de minerales de plata como la matriz que los contiene.

En resumen, los resultados obtenidos mediante la química semi-cuantitativa sugieren que la plata se incorpora preferentemente como solución sólida en la bornita y la calcosina-digenita, y en menor medida como sulfuros de cobre-plata como la stromeyerita. Sin embargo, no se puede descartar la presencia de nanoinclusiones “invisibles” de plata en los sulfuros de cobre, tal como ha documentado en el yacimiento Mantos Blancos (Reich et al., 2013).

4.2. Modelo Genético

A partir de los nuevos hallazgos mineralógicos obtenidos en este estudio, se puede concluir que la mina Portales corresponde a un yacimiento estratoligado Cu-(Ag) que se encuentra alojado en una secuencia sedimentaria caracterizada por intercalaciones de lutitas y areniscas calcáreas (**Figura 34**). Específicamente, la mineralización de cobre en el yacimiento Portales está dominada

por calcopirita, bornita y calcosina-digenita, y presenta contenidos elevados de plata en bornita y calcosina-digenita. Los cuerpos de mena son principalmente “mantos” mineralizados y brechas hidrotermales.

Se propone que el yacimiento Portales se habría formado a partir de fluidos ricos en cobre y en menor medida plata, elementos metálicos probablemente derivados del magmatismo y la lixiviación de la roca de caja. Este proceso es similar al descrito por Maureira et al. (2022) para el depósito estratoligado Cu-(Ag) Altamira de edad Cretácica. Sin embargo, una diferencia clave radica en que el yacimiento Altamira está hospedado en andesitas de la Formación Aeropuerto (Maureira et al., 2022). Respecto a la fuente del azufre, se reportaron valores de $\delta^{34}\text{S}$ altamente negativos en la calcopirita y bornita del Distrito Cerro Negro (-15.6 a -21.2‰), ubicado a 13 km de la mina Portales (**Figura 1** y **Figura 3**), así como en el Distrito Portales (-20.4‰ en calcopirita). Por otro lado, la baritina en ambos depósitos presenta valores positivos de $\delta^{34}\text{S}$ (9.6 a 11.1‰). Esto sugiere que los sulfuros de cobre se originaron a través de la reducción bacteriana de sulfatos marinos, mientras que los valores de los sulfatos indican un aporte magmático (Munizaga et al., 1994). Además, al igual que en el yacimiento Portales, se ha documentado la presencia de pirita framboidal en otros depósitos Cretácicos con valores altamente negativos de $\delta^{34}\text{S}$, que se forma alrededor de petróleo líquido debido a la degradación bacteriana (Wilson y Zentilli, 1999; Wilson et al., 2003b; Carrillo-Rosúa et al., 2014; Herazo et al., 2020).

Teniendo en cuenta lo anterior y el modelo genético mixto propuesto por Maureira et al. (2022) para los estratoligados Cu-(Ag) chilenos, se sugiere que la formación del yacimiento Portales fue el resultado de cuatro eventos principales (**Figura 38**), similar a lo propuesto para el yacimiento Altamira (Maureira et al., 2022). Durante el primer evento, ocurrió la sedimentación y depositación de los estratos (**Figura 38A**). Posteriormente, tuvo lugar el evento de pre-mineralización (**Figura 38A**), en el cual se generó bitumen, pirita framboidal y posiblemente una menor cantidad de sulfuros (pirita euédral + calcopirita). También se considera la posible circulación de fluidos metamórficos y salmueras de cuenca. El siguiente evento se caracteriza por la lixiviación de las rocas circundantes y de la roca encajante por parte de salmueras de cuenca e intrusiones de diques gabroicos-dioríticos (**Figura 38B**). Estos diques aportan fluidos magmáticos y calor al sistema, lo que resulta en la convección de fluidos ricos en cobre y plata. Por último, durante este evento ocurrió la depositación de conglomerados y tobas correspondientes a la Formación Lo Valle, que sobreyace discordantemente a la Formación Las Chilcas. Luego, tuvo lugar la depositación de los sulfuros de cobre-plata, dando lugar al yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales (**Figura 38C**). Esta depositación, ocurrió en estructuras y/o horizontes permeables,

posiblemente debido al enfriamiento del fluido, la mezcla/disolución por aguas meteóricas, y/o reacciones redox con materia orgánica o pirita framboidal (Evento 1 y 2; **Figura 36**). Además, durante este mismo evento ocurre la formación de brechas hidrotermales mineralizadas. Finalmente, la exposición por erosión produce la oxidación y lixiviación de los sulfuros hipógenos mediante la interacción con aguas meteóricas, generando sulfuros supérgenos (**Figura 38D**).

Estratoligado Cu-(Ag) Portales (Cretácico)

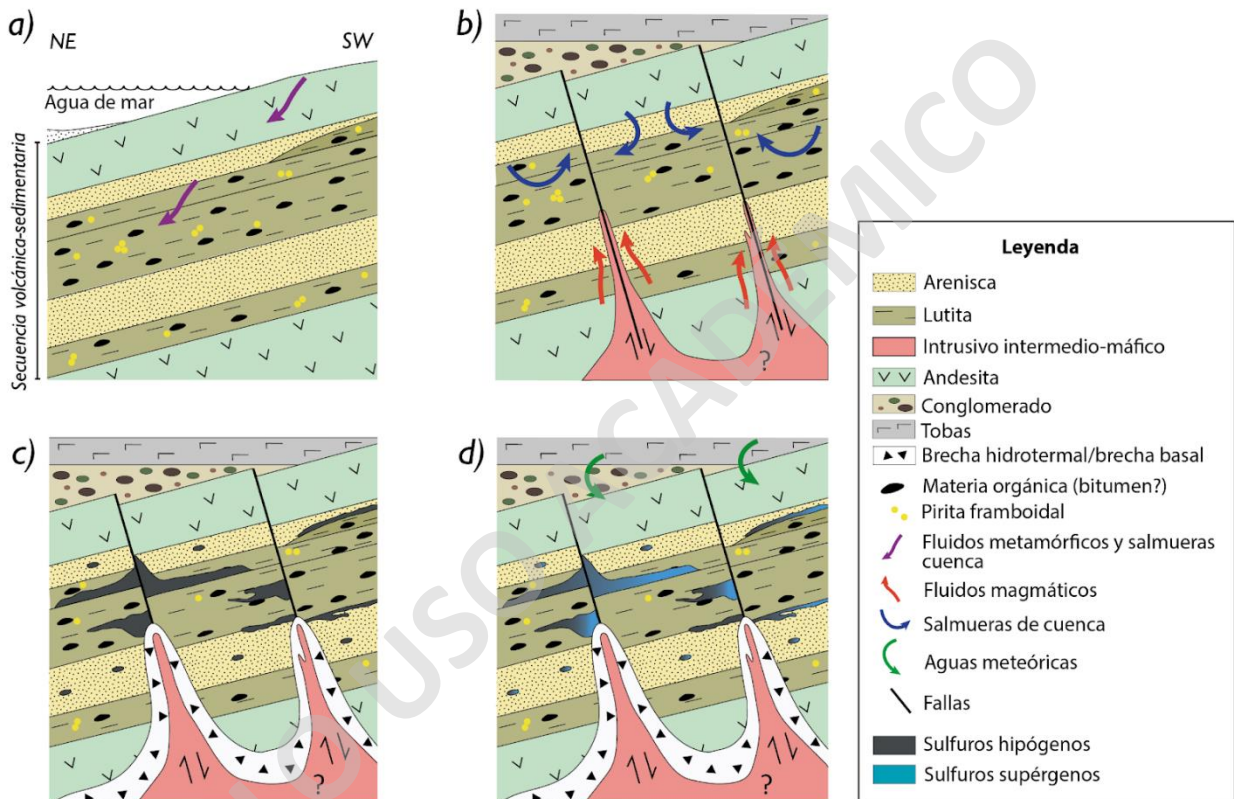


Figura 38: Modelo genético esquemático del depósito estratoligado Cu-(Ag) Portales. La figura muestra los eventos propuestos en orden temporal para la formación del depósito Portales. Modificado de Maureira et al. (2022). Ver texto principal para mayor detalle.

4.3. Implicancias Metalogénicas para la Franja Cretácica

Hasta la fecha, existen pocos reportes acerca de la presencia de depósitos estratoligados Cu-(Ag) en secuencias completamente sedimentarias en la Franja Cretácica. En la **Figura 39** se muestra la distribución de los depósitos estratoligados Cu-(Ag) de edad Jurásica y Cretácica en Chile. A pesar de que se ha reportado la presencia de materia orgánica en forma de bitumen/pirobitumen en diversos depósitos Cretácicos (Cerro Negro, 21 de Mayo, El Soldado, La

Culebra y Manto Cobrizo; **Figura 39**), este estudio corresponde a uno de los primeros registros en Chile de un depósito de este tipo alojado en una secuencia sedimentaria conformada por lutitas, fangolitas y areniscas.

Dentro de la Franja Cretácica, se han descrito diversos tipos de rocas que albergan la mineralización de cobre y plata, incluyendo intrusivas, secuencias volcánicas, volcanoclásticas, sedimentarias continentales y sedimentarias marinas (**Figura 39**). Por ejemplo, los yacimientos Portales, Cerro Negro y Mantos de Catemu se hospedan en la Formación Las Chilcas, una secuencia volcanoclástica, con un aporte principal de sedimentos de origen continental. Específicamente, la Brecha Diablo (**Figura 8**) en el yacimiento Cerro Negro tiene un origen volcánico (Miembro Pitipeumo), mientras que los yacimientos Portales y Mantos de Catemu se hospedan en el Miembro Ñilhue de origen lacustre (Munizaga et al., 1994; Informe interno y confidencial mina Portales, 2018; Boyce et al., 2020). Por otro lado, la Mina 21 de Mayo del Distrito Talcuna, se hospeda en grauvacas y andesitas amigdaloidales de la Formación Quebrada Marquesa, que es una secuencia volcanoclástica con un predominio de sedimentos continentales (González, 2018). Finalmente, el yacimiento Manto Cobrizo se aloja en rocas y brechas andesíticas, mientras que el yacimiento La Culebra se hospeda en lavas andesíticas porfídicas y/o amigdaloidales, así como en brechas andesíticas. Ambos yacimientos se alojan en la Formación Pabellón, que también es una secuencia volcanoclástica, pero con abundantes intercalaciones de rocas carbonatadas como areniscas calcáreas y calcilitas. Específicamente, estos yacimientos se emplazan en el techo de la Formación Pabellón, donde se localiza el metalotecto “Ocoita Pabellón”, compuesto por lavas porfídicas y lentes de tobas (Cisternas y Hermosilla, 2006; Vilches, 2018).

En diversos lugares del mundo, incluyendo Irán, Europa central y del este, África central, Polonia, China, entre otros, se han documentado numerosos depósitos estratoligados de Cu que se encuentran alojados en rocas sedimentarias. Estos depósitos presentan características similares con las descritas para el yacimiento Portales (conocidos como tipo-SSC por su acrónimo en inglés que significa *sediment-hosted stratabound copper*; Hayes et al., 2015). Todos estos depósitos se formaron en secuencias sedimentarias clásticas, en diversos ambientes tectónico-sedimentarios. Los dos ambientes más comunes son en *rifts* proto-oceánicos y ambientes post-colisionales. No obstante, también se encuentran en cuencas transtensionales, fajas plegadas y corridas, entre otros (Wilson, 1966; Hoffman et al., 1974; Hayes et al., 2015).

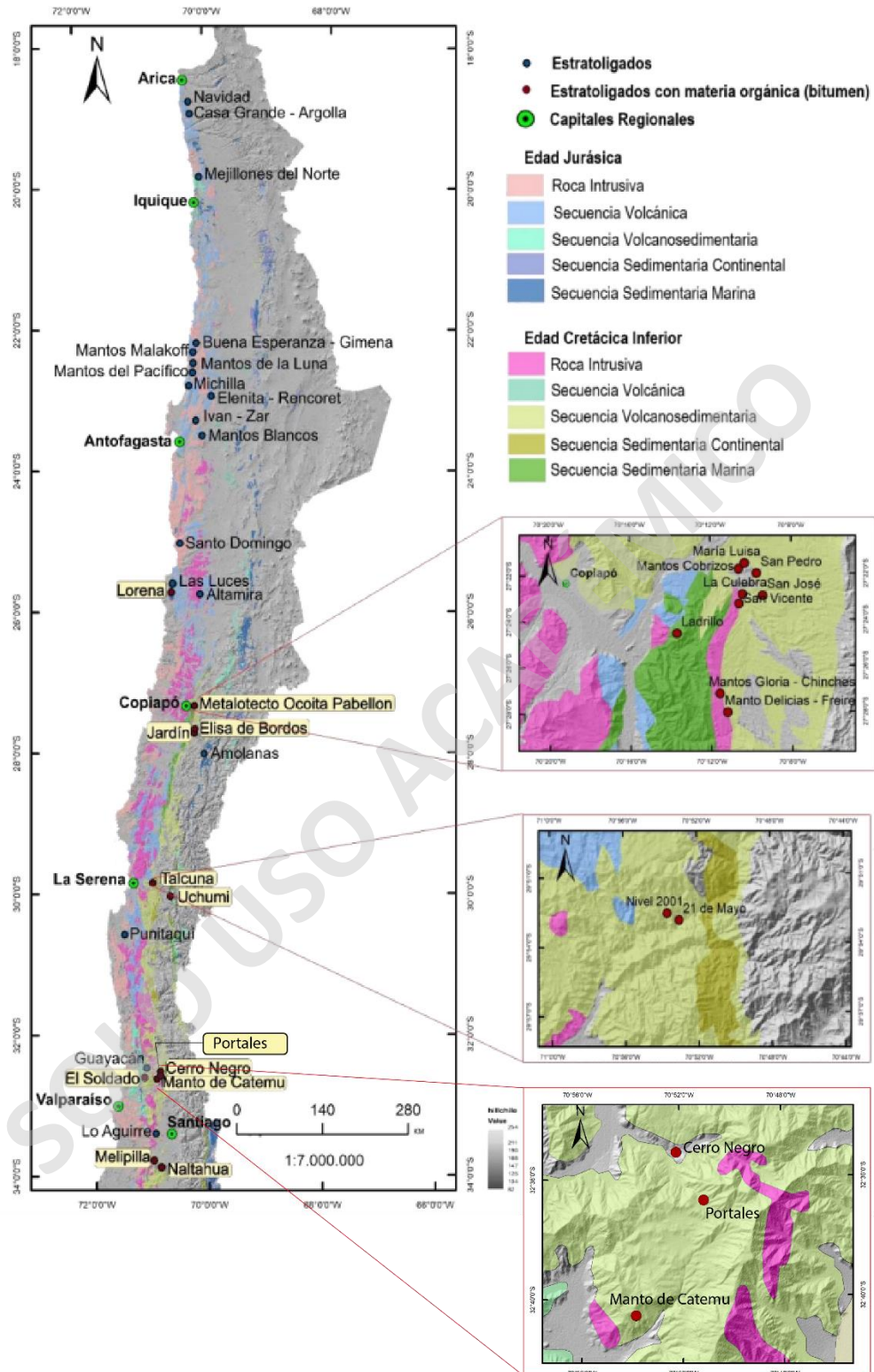


Figura 39: Distribución de los depósitos estratoligados Cu-(Ag) de edad Jurásica y Cretácica en Chile. Los depósitos destacados con fondo amarillo tienen presencia de materia orgánica. Modificado de Vilches, (2018), Makshev y Zentilli, (2002) y Kojima et al. (2009).

De acuerdo con Cox et al. (2003), las litologías que alojan la mineralización tipo-SSC, junto con sus respectivos agentes reductores, se clasifican en tres subclases: (a) tipo *reduced-facies* o tipo kupferschiefer (Kirkham et al., 1994), compuesto por lutitas, areniscas y dolomías, donde el principal agente reductor es la materia orgánica sólida formada durante la etapa pre-mineralización, además de la presencia de piritita diagenética; (b) tipo *red-bed*, compuestas por areniscas fluviales o conglomerados, con restos carbonizados de plantas terrestres como principal agente reductor; y (c) tipo *sandstone*, donde los principales agentes reductores están amplia y heterogéneamente distribuidos (Hayes et al., 2015). Los principales minerales de mena son calcosina, calcopirita, bornita, piritita, galena, esfalerita de origen hipógeno, así como de covelina y crisocola de origen supérgeno (Hayes et al., 2015). La mineralización de cobre está principalmente controlada por el contenido de materia orgánica y paleo-permeabilidad de los poros asociados a capas evaporíticas y fracturas frágiles. Además, la paleo-permeabilidad puede ser desencadenada localmente por la disolución de calcita del cemento diagenético (Hayes et al., 2015; Maghfouri et al., 2020).

De manera similar a los depósitos tipo-SSC, el yacimiento Portales se desarrolló en el contexto de una secuencia de rocas sedimentarias, compuestas por lutitas que contienen abundante materia orgánica, así como una proporción menor contenido de restos fósiles de plantas. Todos estos depósitos comparten la característica de poseer una capacidad reductora que actúa como una trampa de metales, junto con la influencia de fluidos hidrotermales y/o salmueras de cuenca con capacidad para lixiviar y transportar metales (Munizaga et al., 1994; Hitzman et al., 2010; Hayes et al., 2015; Herazo et al., 2020).

En resumen, la presencia de materia orgánica y la disolución de carbonatos en areniscas calcáreas y otros tipos de rocas sedimentarias portadoras de carbonatos pueden tener implicancias significativas en la formación de yacimientos minerales del tipo estratoligado Cu-(Ag). De esta manera, la Franja Cretácica de la Cordillera de la Costa puede tener un alto interés económico debido a la diversidad de depósitos estratoligados Cu-(Ag), incluyendo depósitos alojados en secuencias volcánicas, volcanoclásticas y puramente sedimentarias (**Figura 39**). Este estudio plantea la posibilidad de que las áreas circundantes a los yacimientos Portales, Cerro Negro y Mantos de Catemu (**Figura 39**) sea considerados como posibles blancos de exploración, dado a la presencia de secuencias sedimentarias con abundante materia orgánica y litologías calcáreas. En última instancia, se concluye que la Formación Las Chilcas, así como la Formación Pelambres y la Formación Cristo Redentor, todas ellas con un componente sedimentario

importante, podrían ser interesantes desde un punto de vista económico-minero, ya que presentan características geológicas similares a las descritas en este estudio.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentan nuevos hallazgos sobre la ocurrencia de depósitos estratoligados Cu-(Ag) alojados en secuencias sedimentarias dentro de la Franja Metalogénica del Cretácico en la Cordillera de la Costa, en el centro de Chile. La mina Portales se caracteriza por su mineralización de Cu-(Ag), la cual está controlada por factores litológicas, como la presencia de materia orgánica y carbonatos en estratos específicos, así como por elementos estructurales. Este yacimiento representa un caso particular, ya que se encuentra emplazado en una secuencia sedimentaria compuesta por lutitas, fangolitas y areniscas pertenecientes a la Formación Las Chilcas.

A través de estudios petrográficos, calcográficos y de microscopía electrónica de barrido (SEM), se determinó que las litologías que hospedan la mineralización de cobre y plata son principalmente lutitas, fangolitas y brechas hidrotermales, las cuales son cortadas por diques andesíticos cloritizados. El cuerpo mantiforme se caracteriza por una alteración hidrotermal débil, con pocos minerales de alteración presentes (clorita, epidota, albita, cuarzo), excepto por la presencia ubicua de carbonatos en todo el depósito.

Basándose en los resultados obtenidos, se definieron al menos cuatro eventos de alteración/mineralización en el yacimiento Portales: 1. Un evento de pre-mineralización marcado por la formación de bitumen, pirita framboidal y pirita euhedral a subhedral, reemplazada posteriormente por calcopirita o bornita; 2. El evento principal de mineralización (Evento I), durante el cual se precipitaron la mayoría de los sulfuros de cobre y cobre-plata en el sistema, como bornita, calcopirita, calcosina-digenita, galena, stromeyerita, clorargirita (?), y se observaron reemplazos de calcosina por bornita y, en menor medida, bornita por digenita. 3. El tercer evento (Evento II) consiste en un extenso y generalizado reemplazo de bornita y galena por calcopirita; 4. El último evento de mineralización es de carácter supérgeno, caracterizado por la formación de hematita y el reemplazo local de bornita por digenita y covelina.

La mineralización en el yacimiento estratoligado Cu-(Ag) Portales está fuertemente controlada por la naturaleza de litologías sedimentarias, en particular, por su contenido de materia orgánica (bitumen y restos fósiles de plantas) y carbonatos. Ambos desempeñan un papel fundamental en la precipitación de los minerales de mena; la materia orgánica (lutitas y fangolitas) actúa como

una trampa redox y posiblemente como un agente de transporte junto con los fluidos hidrotermales ricos en cobre. Por su parte, los carbonatos neutralizan los fluidos hidrotermales y probablemente generan paleo-porosidad a través de procesos de disolución y reprecipitación, especialmente en las areniscas calcáreas. Además, el control estructural de la mineralización se evidencia a través de la formación de brechas hidrotermales y vetillas.

Las leyes de plata reportadas en la mina Portales están asociadas a la presencia de bornita y calcosina-digenita, lo que sugiere que la plata se incorpora principalmente mediante solución sólida o como nanoinclusiones “invisibles” en estos sulfuros de cobre. Adicionalmente, la presencia de micropartículas de plata como stromeyerita y posiblemente clorargirita también puede contribuir a este fenómeno.

SOLO USO ACADÉMICO

6. Referencias

- Arribasplata Rojas, D.A (2016). Modelo genético del Proyecto Los Mantos, provincia de Aconcagua-región de Valparaíso-Chile.
- Barker S.L, & Dipple GM (2019). Exploring for carbonate-hosted ore deposits using carbon and oxygen isotopes. *Ore deposits: origin, exploration, and exploitation*, 185-207.
- Boric R, Holmgren C, Wilson NSF, Zentilli M (2002). The geology of the El Soldado manto type Cu (Ag) deposit, Central Chile. In: *Porter TM (ed), Hydrothermal iron oxide copper-gold y related deposits. A global perspective 2:163–184.*
- Boyce D (2015). Modelo de evolución tectónica y paleogeográfica del margen andino en Chile central durante el cretácico medio – tardío: El registro estructural y sedimentario en la Formación Las Chilcas. *Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile*, 215 pp.
- Boyce D, Charrier R, and Farías M (2020). The First Andean Compressive Tectonic Phase: Sedimentologic and Structural Analysis of Mid-Cretaceous Deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32 50' S). *Tectonics*, 39(2), e2019TC005825.
- Brown M, Diaz F, Grocott J (1993) Displacement history of the Atacama fault system 25° 00' S- 27° 00' S, northern Chile. *Geol Soc Am Bull* 105:1165-1174.
- Camus F, Boric P, Skewes, MA (1986). El distrito de oro El Bronce y su relación con la caldera Morro Hediondo, Región de Valparaíso, Chile. *Revista Geológica de Chile, No. 28-29*, p. 95-101.
- Camus F (1990). The geology of hydrothermal gold deposits in Chile. *J Geochem Explor*, 36(1-3): 197-232.
- Carrillo-Rosúa J, Boyce A, Morales-Ruano S, Morata D, Roberts S, Munizaga F, Moreno-Rodríguez V (2014). Extremely negative and inhomogeneous sulfur isotope signatures in Cretaceous Chilean Manto-type Cu–(Ag) deposits, Coastal Range of central Chile. *Ore Geology Reviews* 56:13-24.
- Charrier R, Pinto L and Rodríguez MP (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile.
- Cisternas ME and Hermosilla J (2006). The role of bitumen in strata-bound copper deposit formation in the Copiapo area, Northern Chile. *Miner Depos* 41(4):339-355.
- Cornejo P, Latorre JJ, Matthews S, Marquardt C, Toloza R, Basso M, Rodríguez J and Ulloa, C (2006). U/Pb and ⁴⁰Ar/ ³⁹Ar geochronology of volcanic and intrusive events at the Mantos Blancos copper deposit, II Region, Chile, Vol. 2. *Actas XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta*, 223 – 226.
- Cox DP, Lindsey DA, Singer DA, Moring BC and Diggles MF (2003). Sediment-hosted copper deposits of the world—Deposit models and database: *U.S. Geological Survey Open-File Report* 03–107, 53 p.
- Dare F (2015). The Study of Geology, Mineralogy and Geochemistry of Ghareh- Tappeh Copper Index (Maku- West Azerbaijan): *Unpublished M.Sc. Thesis, University of Tabriz, Iran* 122pp. (in Persian with English abstract).

- Elgueta S, Hodgkin A, Rodriguez E and Schneider A (1990). The Cerro Negro mine, Chile: Manto-type copper mineralization in a volcanoclastic environment. In: *Stratabound ore deposits in the Andes*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 463-471.
- González J (2018). Mineralogía y geoquímica de las vetas de Cu-(Ag) de la Mina 21 de Mayo, Distrito Talcuna, Región de Coquimbo. *Memoria para optar al título de Geólogo*. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 80 pp.
- Hayes TS, Landis GP, Whelan JF, Rye RO and Moscati RJ (2012). The Spar Lake strata-bound Cu-Ag deposit formed across a mixing zone between trapped natural gas and metals-bearing brine: *Economic Geology*, v. 107, p. 1223–1249 p.
- Hayes TS, Cox DP, Bliss JD, Piatak NM and Seal II RR (2015). Sediment-hosted stratabound copper deposit model: *US Geological Survey* (No. 2010-5070-M, p. 147).
- Herazo A, Reich M, Barra F, Morata D, del Real I and Pagès A (2020). Assessing the role of bitumen in the formation of stratabound Cu-(Ag) deposits: Insights from the Lorena deposit, Las Luces district, northern Chile. *Ore Geology Reviews*, 124, 103639.
- Herazo A, Reich M, Barra F, Morata D and Real ID (2021). Trace element geochemistry of pyrite from bitumen-bearing stratabound Cu-(Ag) deposits, Northern Chile. *ACS Earth and Space Chemistry*, 5(3), 566-579.
- Herve M (1987) Movimiento normal de la Falla Paposo, zona de Falla Atacama, en el Mioceno, Chile. *Andean Geology* (31):31-36 p.
- Hitzman MW, Selley D and Bull S (2010). Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through earth history: *Economic Geology*, v. 105, p. 627–639.
- Hoffman P, Dewey JF and Burke K (1974). Aulacogens and their genetic relation to geosynclines with a Proterozoic example from Great Slave Lake, Canada, in Dott, R.H., Jr., and Shaver, R.H., eds., *Modern and ancient geosynclinal sedimentation: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 19*, p. 38–55.
- Jaillard E, Soler P, Carlier G, and Mourier T (1990). Geodynamic evolution of the northern and central Andes during early to middle Mesozoic times: a Tethyan model. *Journal of the Geological Society*, 147(6), 1009-1022.
- Kirkham RV, Carrière JJ, Laramée RM, and Garson DF (1994). Global distribution of sediment-hosted stratiform copper deposits and occurrences: *Geological Survey of Canada Open-File Report 2915b*, 156 p.
- Kojima S, Astudillo J, Rojo J, Tristá D, Hayashi K (2003). Ore mineralogy, fluid inclusion, and stable isotopic characteristics of stratiform copper deposits in the Coastal Cordillera of Northern Chile. *Miner Depos* 38:208-216.
- Kojima S, Tristá-Aguilera D, Hayashi K (2009) Genetic aspects of the manto-type copper deposits based on geochemical studies of North Chilean deposits. *Resour Geol* 59(1):87-98.
- Larson RL, and PITMAN III WC (1972). World-wide correlation of Mesozoic magnetic anomalies, and its implications. *Geological Society of America Bulletin*, 83(12), 3645-3662.
- Levi B (1969). Burial metamorphism of a Cretaceous volcanic sequence west from Santiago, Chile. *Contrib. Mineral Petrol* 24: 30-49.
- Losert J (1973) Genesis of copper mineralization and associated alterations in the Jurassic volcanics rocks of Buena Esperanza mining area. *Publicación N°40, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago*, 104 p.

- Maghfouri S, Rastad E, Borg G, Hosseinzadeh MR, Movahednia M, Mahdavi A, and Mousivand F (2020). Metallogeny and temporal–spatial distribution of sediment-hosted stratabound copper (SSC-type) deposits in Iran; implications for future exploration. *Ore Geology Reviews*, 127, 103834.
- Maksaev V, Zentilli M (2002). Chilean strata-bound Cu-(Ag) deposits: An Overview. In: Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold y Related Deposits. A Global Perspective*. PGC Publishing, Adelaide 2:185-205
- Maureira I (2018). A comparative study between Altamira and Las Luces deposits, Coastal Range, Antofagasta region: Implications for the origin of the stratabound Cu-(Ag) deposits. *Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile*, 107 pp.
- Maureira I, Barra F, Reich M, Palma G (2022). Geology of the Altamira and Las Luces deposits, Coastal Cordillera, northern Chile: Implications for the origin of stratabound Cu-(Ag) deposits. *Mineralum Deposita*, 58(2), 379-402.
- Morales S, Belmar M, Morata D, Carrillo J, Hasler K, Aguirre L, Fenoll P (2005). Relationships between very low-grade metamorphism and Cu-stratabound ore deposits in the Coastal Range of Central Chile. *6th International Symposium on Andean Geodynamics*, p. 527-530.
- Munizaga F, Reyes JC, y Nystrom JO (1994). Razones isotópicas de S de los sulfuros del distrito minero de Cerro Negro: un posible indicador de los depósitos estratoligados de Cu hospedados en rocas sedimentarias lacustres. *Andean Geology*, 21(2), 189-195.
- Naranjo J, Puig A (1984). Hojas Taltal y Chañaral, Regiones de Antofagasta y Atacama, escala 1: 250.000, *Carta Geológica de Chile* N° 62-63.
- Oliveros V, Féraud G, Aguirre L, Fornari M (2005). The beginning of the Andean subduction system: ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of magmatic activity and subsequent very low-grade metamorphism/hydrothermal alteration in a Jurassic volcanic arc, Coastal Range, northern Chile (18°30'-23°30'S, 70°-70°30'W). *6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts*: 555-558.
- Oliveros V, Féraud G, Aguirre L, Fornari M, and Morata D (2006). The Early Andean Magmatic Province (EAMP): ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating on Mesozoic volcanic and plutonic rocks from the Coastal Cordillera, northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157(4), 311-330.
- Oliveros V, Féraud G, Aguirre L, Ramírez L, Fornari M, Palacios C, Parada M (2008). Detailed ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. *Miner Depos* 43(3):281-293.
- Parada MA, Féraud G, Fuentes F, Aguirre L, Morata D, and Larrondo P (2005). Ages and cooling history of the Early Cretaceous Caleu pluton: testimony of a switch from a rifted to a compressional continental margin in central Chile. *Journal of the Geological Society*, 162(2), 273-287.
- Ramírez LE, Palacios C, Townley B, Parada MA, Sial AN, Fernandez-Turiel JL, Gimeno D, García-Valles M, Lehmann B (2006). The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile. *Miner Depos* 41(3):246.

- Reich M, Palacios C, Barra F, Chryssoulis S (2013). "Invisible" silver in chalcopyrite and bornite from the Mantos Blancos Cu deposit, northern Chile. *European Journal of Mineralogy*, 25(3): 453-460.
- Rivano S, Septilveda P, Herve M, y Puig A (1985). Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32°S., Chile. *Revista Geológica de Chile* 24, 63-74.
- Rivano S, Sepúlveda P (1991). Hoja Illapel, Región de Coquimbo. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 69*, 1 mapa 1:250.000.
- Rivano S, Sepúlveda P, Boric R, Espiñeira D (1993). Hojas Quillota y Portillo, V Región. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 73* (escala 1:250.000). Santiago.
- Rivano S (1996). Geología de las Hojas Quillota y Portillo. *Servicio Nacional de Geología y Minería (Informe Inédito)*, 202 p.
- Sato T (1984) Manto type Copper deposits in Chile- a Review. *Bull Geol Surv Jpn* 35: 565-582.
- Scheuber E, Bogdanic T, Jensen A, Reutter KJ (1994). Tectonic Development of the North Chilean Andes in Relation to Plate Convergence and Magmatism since the Jurassic. *Tectonics of the Southern Central Andes*, 121-139.
- Scheuber E, González G (1999). Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°-26°S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* 18 (5), 895-910.
- Sillitoe RH (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Miner Depos* 38(7): 787-812.
- St Amand P, Allen CR (1960). Strike-slip faulting in northern Chile. *Geol Soc Am Bull* 71(12):1965.
- Thomas H (1958). Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta de Barriga, *Instituto de Investigaciones Geológicas*.
- Tidy E (1970). Geología del distrito minero La Campana. *Tesis de grado para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile*, 286 pp.
- Vilches L (2018). Mineralogía y química del bitumen en depósitos estratoligados de cobre en la Franja Cretácica Inferior entre los 27° y los 33° latitud sur, Chile. *Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile*, 146 pp.
- Wilson JT (1966). Did the Atlantic close and then re-open?: *Nature*, v. 211, p. 676–681.
- Wilson NS, Zentilli M (1999). The role of organic matter in the genesis of the El Soldado volcanic-hosted manto-type Cu deposit, Chile. *Econ Geol* 94(7):1115-1135.
- Wilson NSF, Zentilli M, Reynolds PH, Boric R (2003a). Age of mineralization by basinal fluids at the El Soldado manto-type copper deposit, Chile: 40Ar/39Ar geochronology of K-feldspar. *Chem Geol* 197: 161–176.
- Wilson NSF, Zentilli M, Spiro B (2003b). A sulfur, carbon, oxygen, and strontium isotope study of the volcanic-hosted El Soldado manto-type copper deposit, Chile: the essential role of bacteria and petroleum. *Econ Geol* 98: 163–174
- Zentilli M, Munizaga F, Graves MC, Boric R, Wilson NS, Mukhopadhyay PK, Snowdon LR (1997). Hydrocarbon involvement in the genesis of ore deposits: an example in Cretaceous stratabound (Manto-Type) copper deposits of central Chile. *Int Geol Rev* 39(1): 1-21.

Anexos

A. Resumen de descripciones petrográficas

En el siguiente anexo se presentan las descripciones petrográficas y calcográficas de las 40 muestras estudiadas y de las 20 secciones transparentes pulidas. Se indica el nombre de muestra, la mineralogía presente, litología y su ubicación en la mina Portales.

Tabla 1. Resumen de descripciones de muestras de mano pertenecientes a la mina Portales. Abreviaciones: Ccp: calcopirita; Bn: bornita; Gn: galena; Py: pirita.

Muestra	Sector	Ubicación	Unidad	Mineralización/Materia orgánica	Textura	Litología
P1M1	Renata Norte	Calle 6 intersección con XC 1	Manto	materia orgánica - Bn - Ccp	clástica	Lutita
P1M2	Renata Norte	Calle 6 intersección con XC 1	Manto	materia orgánica - Ccp - Bn	clástica	Lutita
P1M3-A	Renata Norte	Calle 6 intersección con XC 1	Manto	Ccp - py	clástica	Lutita y arenisca calcárea hematizada
P1M3-B	Renata Norte	Calle 6 intersección con XC 1	Manto	Ccp	clástica	Lutita y arenisca silicificada hematizada
P2M4	Renata Norte	Calle 8 intersección con XC 2	Brecha basal	-	Brechosa	Brecha con clastos alterados a arcilla y otros a clorita
P2M5	Renata Norte	Calle 8 intersección con XC 2	Manto	materia orgánica - Ccp	clástica	Lutita
P2M6	Renata Norte	Calle 8 intersección con XC 2	Arenisca calcárea hematizada	Ccp	clástica	Arenisca calcárea hematizada
P3M7	Renata Norte	Calle 11 intersección con XC 1N	Dique	-	Afanítica	Dique andesítico

P4M8	Renata Norte	Calle 9 intersección con XC 2N	Manto	Ccp - Bn	clástica	Lutita
P4M9	Renata Norte	Calle 9 intersección con XC 2N	Brecha basal	-	Brechosa	Brecha con clastos alterados a arcilla y otros a clorita
P5M10	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	-	clástica	Lutita
P6M11	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	-	clástica	fangolita
P6M15	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	Ccp	clástica	fangolita
P6M16	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	Ccp	clástica	fangolita
P6M17	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	Ccp	clástica	fangolita
P6M18	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	materia orgánica - Ccp	clástica	Lutita
P6M19	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	Ccp	clástica	Limolita
P6M20	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	materia orgánica - Bn	clástica	Lutita
P6M21	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	materia orgánica - Ccp - Bn	clástica	Lutita

P6M22	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	materia orgánica - Ccp - Bn	clástica	Lutita
P6M23	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	materia orgánica - Ccp	clástica	Lutita
P6M24	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Manto	Ccp	clástica	Lutita
P6M26	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Arenisca calcárea hematitizada	materia orgánica - Ccp	clástica	Arenisca calcárea hematitizada
P7M12	Renata Norte	Calle 11 intersección con XC 3	Alteración	Gn - Ccp	clástica	Lutita
P7M13	Renata Norte	Calle 11 intersección con XC 3	Arenisca calcárea hematitizada	-	clástica	Arenisca calcárea hematitizada
P8M14	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3	Manto	-	clástica	Arenisca
P9M27	Renata Norte	Calle 13 intersección con XC 3, pilar norte	Manto	materia orgánica - Gn - Ccp	clástica	Lutita
P9M28	Renata Norte	Calle 13 intersección con XC 3, pilar norte	Manto	materia orgánica - Gn	clástica	Lutita
P9M29	Renata Norte	Calle 13 intersección con XC 3, pilar norte	Arenisca calcárea hematitizada	Ccp	clástica	Arenisca calcárea hematitizada
P9M30	Renata Norte	Calle 13 intersección con XC 3, pilar norte	Brecha basal	-	Brechosa	Brecha con clastos alterados a arcilla y otros a clorita

P10M31-A	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Manto	Ccp - Bn	Brechosa	Brecha hidrotermal mineralizada
P10M31-B	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Manto	Ccp - Bn	Brechosa	Brecha hidrotermal mineralizada
P10M31-C	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Manto	Ccp - Bn	Brechosa	Brecha hidrotermal mineralizada
P10M31-D	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Manto	Ccp - Bn	Brechosa	Brecha hidrotermal mineralizada
P10M32	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Manto/Arenisca calcárea hematitizada	Ccp	Brechosa	Brecha hidrotermal mineralizada/ arenisca hematitizada
P10M33	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Brecha basal	-	Brechosa	Brecha con clastos alterados a arcilla y otros a clorita
P10M34	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Manto	Bn - Ccp	Brechosa	Brecha hidrotermal mineralizada
P10M35	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Dique	-	Afanítica	Dique andesítico cloritizado
P11M36	Blanco Este	Calle 1 intersección con XC 3W	Manto	py - Ccp	clástica	Lutita

Tabla 2. Resumen de descripciones petrográficas y calcográficas de las secciones transparentes-pulidas. Abreviaciones: Bn: bornita; Cct: calcosina; Ccp: calcopirita; Dg: digenita; Cv: covelina; Gn: galena; Py: pirita; Hem: hematita; Chl: clorita; Cb: carbonatos; Ep: epidota; Bit: materia orgánica; Ab: albita; Qz: cuarzo.

Sección	Sector	Ubicación	Minerales de alteración	Mineralogía sulfurada/Materia orgánica	Litología
PO-1	Renata Norte	Calle 6 intersección con XC 1	Cb - Qz	Py - Ccp	Arenisca silicificada y hematitizada/ Lutita silicificada

PO-2	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Cb - Ep - Ab	Bit - Bn - Cct - Ccp - Cv	Lutita bituminosa
PO-3	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Cb - Qz - Ab?	Ccp - Bn - Cct - Gn - Cv	Lutita silicificada?
PO-4	Renata Norte	Calle 6 intersección con XC 1	Cb - Qz - Ab	Bit - Ccp - Bn - Cv	Lutita bituminosa
PO-5	Renata Norte	Calle 13 intersección con XC 3, pilar norte	Cb - Qz	Bit - Gn - Bn - Cct - Ccp - Dg	Fangolita con laminas de fangolita arenosa
PO-6	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Chl - Cb	Py	Dique andesítico cloritizado
PO-7	Renata Norte	Calle 9 intersección con XC 2N	Cb - Qz	Bit - Bn - Cct - Ccp	Lutita bituminosa obliterada en sectores
PO-8	Blanco Este	Calle 1 intersección con XC 3W	Qz - Cb - Ab - Chl	Py	Lutita con escaso bitumen
PO-9	Renata Norte	Calle 11 intersección con XC 3	Cb	Py	Obliterada
PO-10	Blanco Este	Calle 6 intersección con XC 1	Cb - Ab - Qz	Bit - Bn - Ccp - Cct - Cv	Lutita bituminosa
PO-11	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Cb - Qz	Bit - Bn - Ccp - Cct	Brecha hidrotermal mineralizada
PO-12	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Cb - Qz	Bn - Cct - Ccp - Dg - Cv	Brecha hidrotermal mineralizada
PO-13	Renata Norte	Calle 8 intersección con XC 2	Chl - Cb - Qz	Py - Gn	Brecha hidrotermal basal

PO-14	Blanco Este	Calle 5 intersección con XC 9	Cb - Chl - Qz - Ab?	Bit - Bn - Ccp - Cct	Fangolita bituminosa/ sector silicificado
PO-15	Renata Norte	Calle 13 intersección con XC 3, pilar norte	Cb - Qz - Hem - Ep - Chl	Bit - Gn - Ccp - Py	Obliterada/ Posible fangolita
PO-16	Renata Norte	Calle 6 intersección con XC 1	Hem - Qz - Cb	Bit - Ccp - Cct?	Arenisca silicificada y hematizada
PO-17	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Hem - Cb	Bit - Ccp - Bn	Arenisca calcárea hematizada con gruesa lámica de materia orgánica
PO-18	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Hem - Qz - Cb - Chl - Ab?	Bit - Bn - Ccp - Py - Dg	Lutita bituminosa/arenisca hematizada
PO-19	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Cb - Qz	Bit - Bn - Cct	Lutita bituminosa obliterada en sectores
PO-20	Renata Norte	Calle 12 intersección con XC 3, pilar sur	Cb - Qz	Bit - Bn - Cct - Ccp	Lutita bituminosa

B. Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS)

En el siguiente anexo se presentan las micrografías BSED, los espectros representativos de cada mineral de interés de este estudio junto con su resultado de química semi-cuantitativa.

B.1. Sector Renata Norte, Sección Transparente-Pulida PO-19

Figura 1: Bornita representativa

Imagen de electrones 27

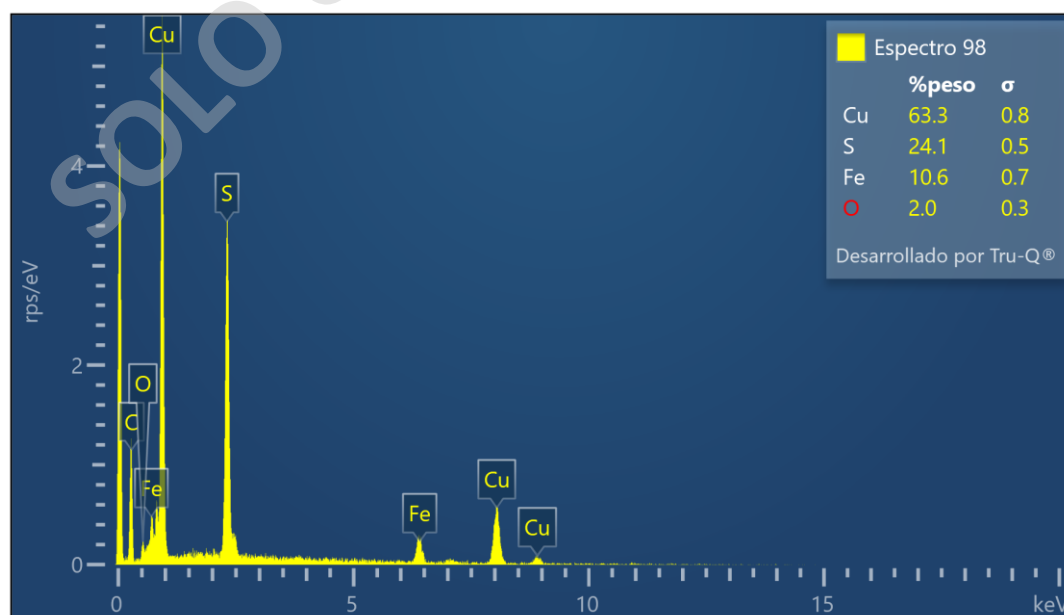
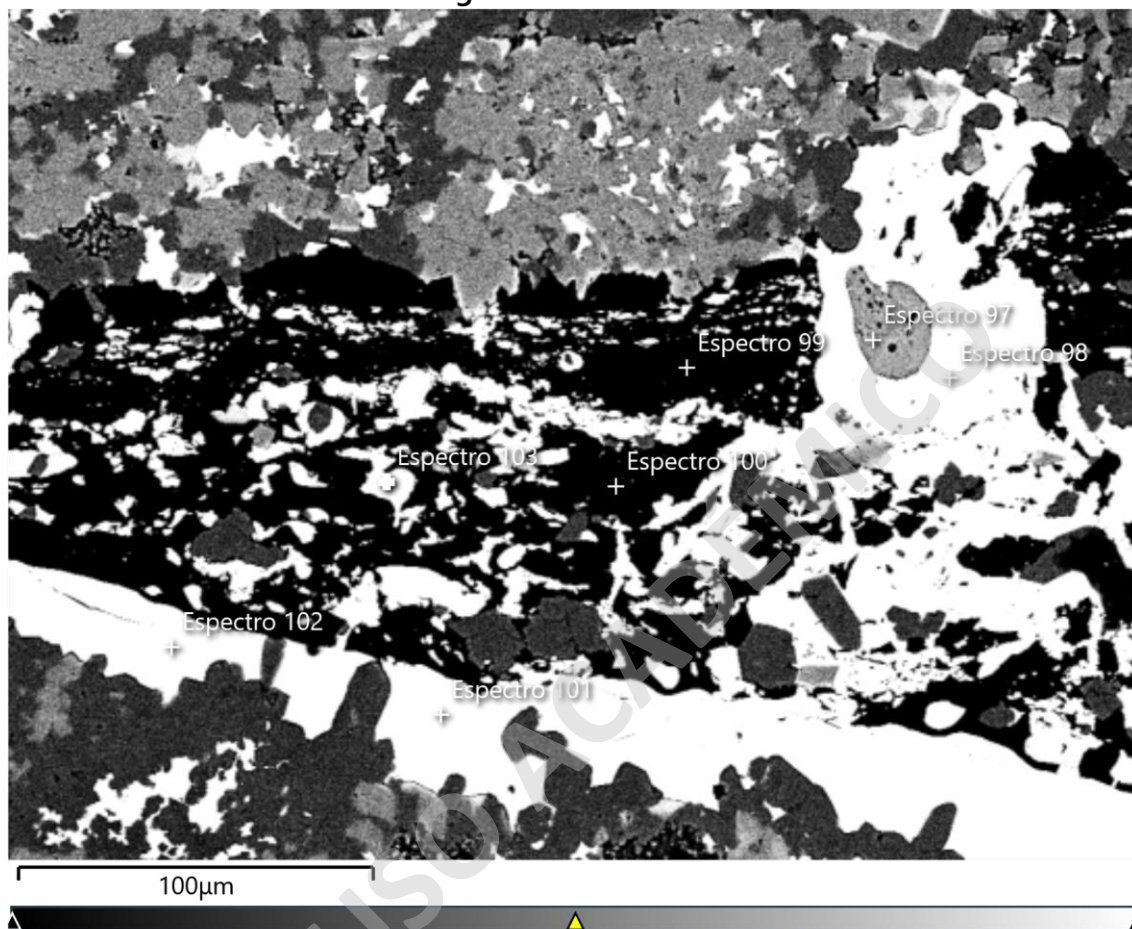


Figura 2: Bornita con solución sólida de Ag.

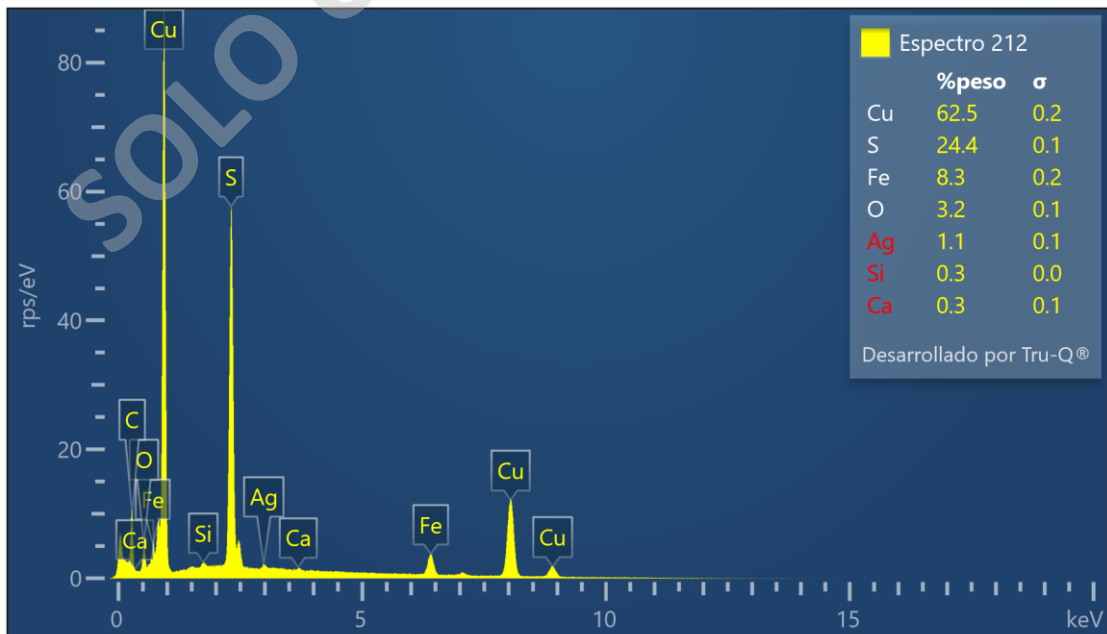
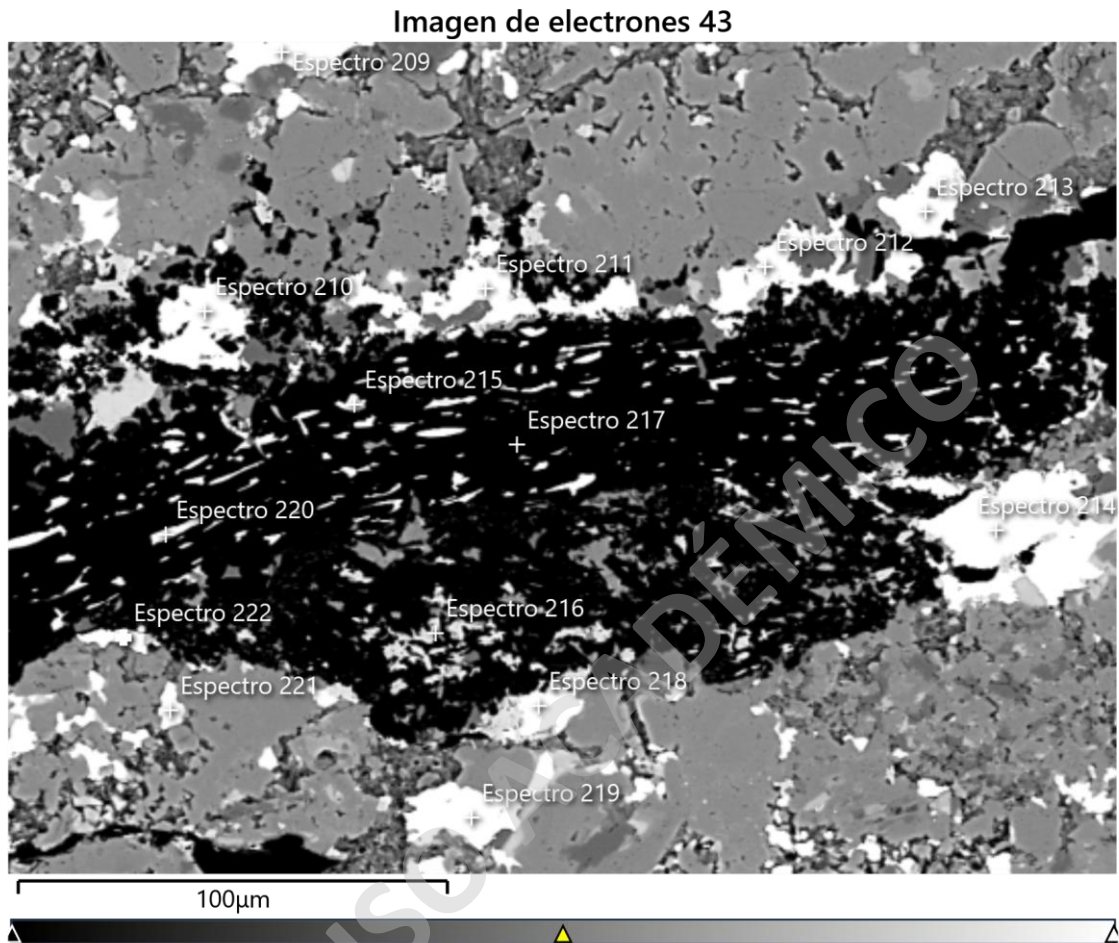


Figura 3: Calcosina-Digenita representativa con solución sólida de Ag.

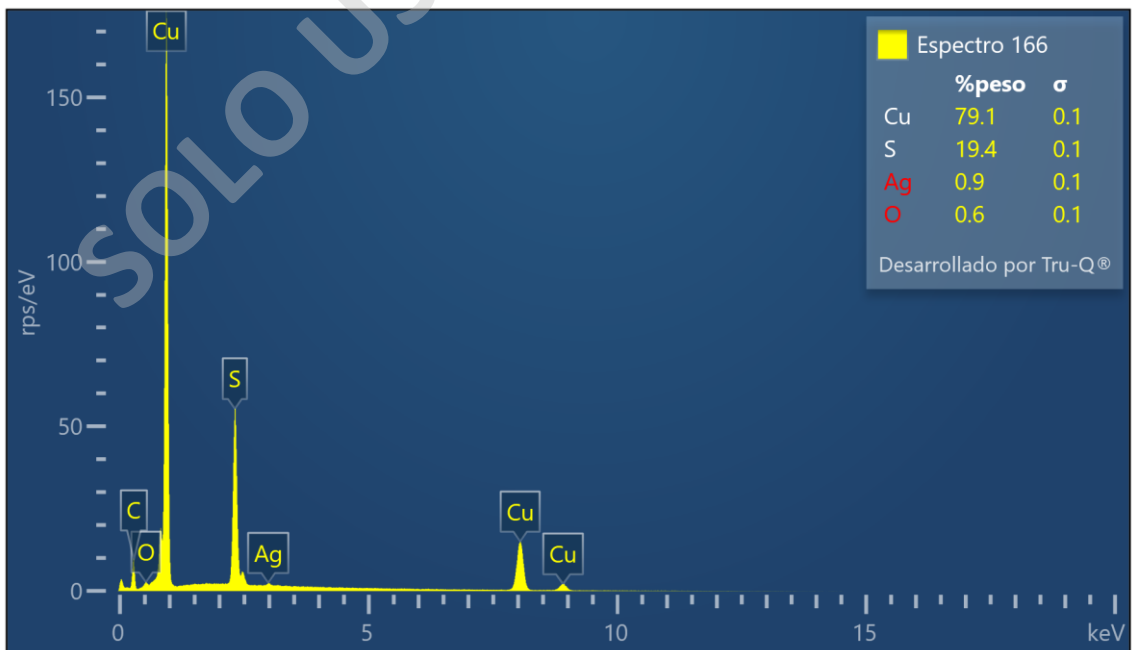
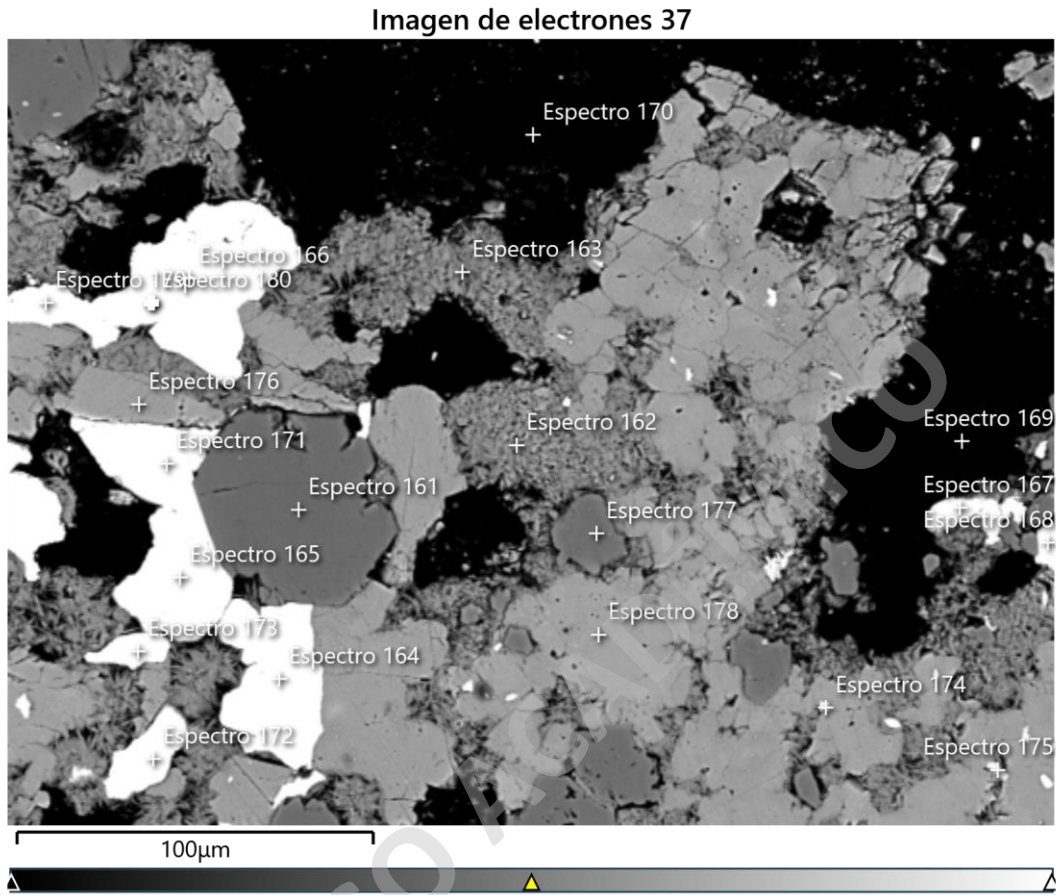


Figura 4: Stromeyerita representativa.

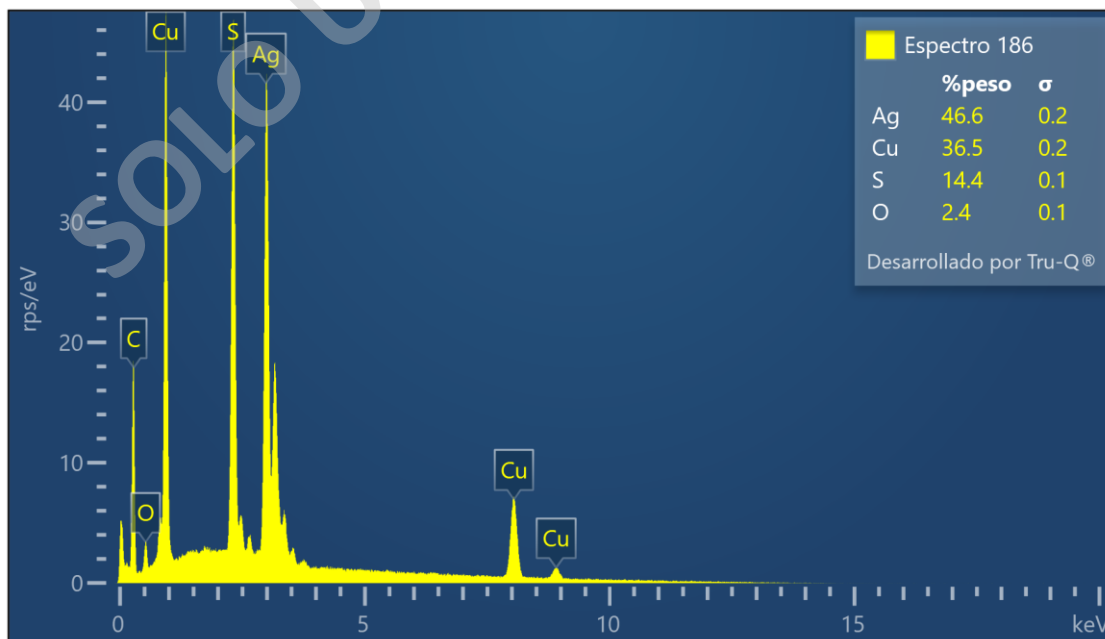
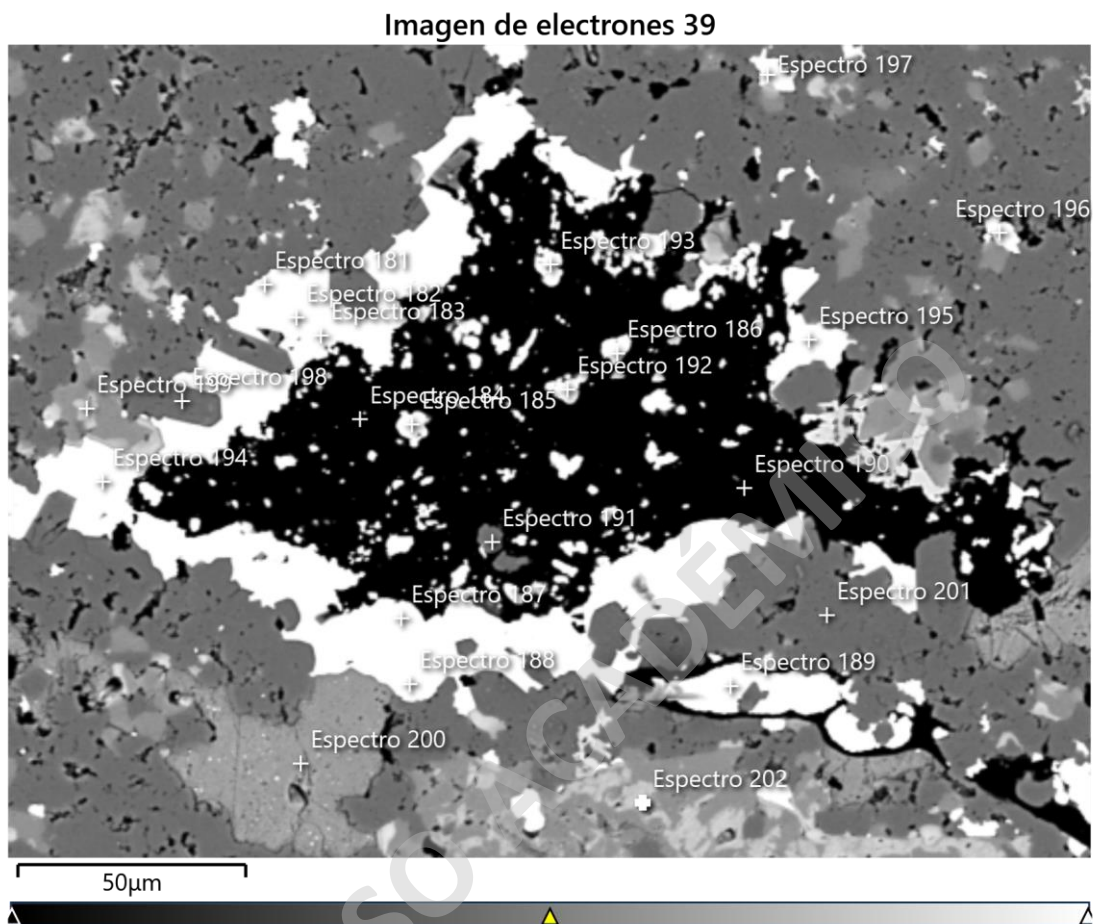


Figura 5: Clorargirita (?) representativa.

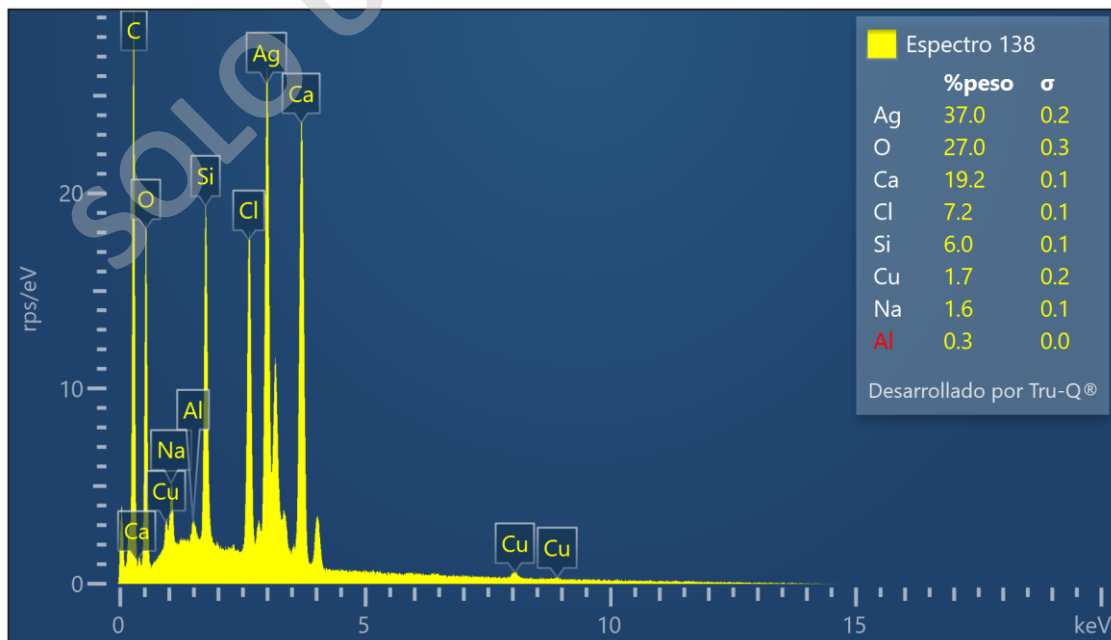
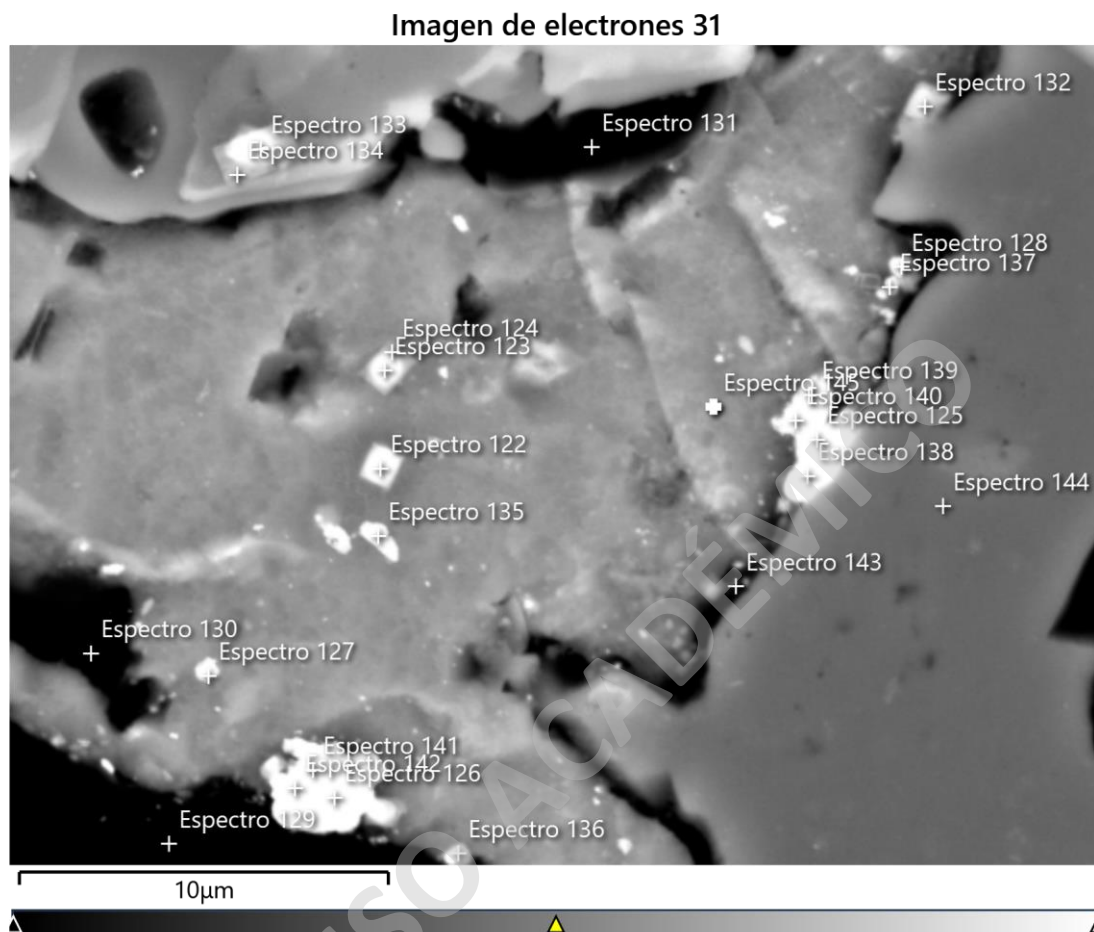
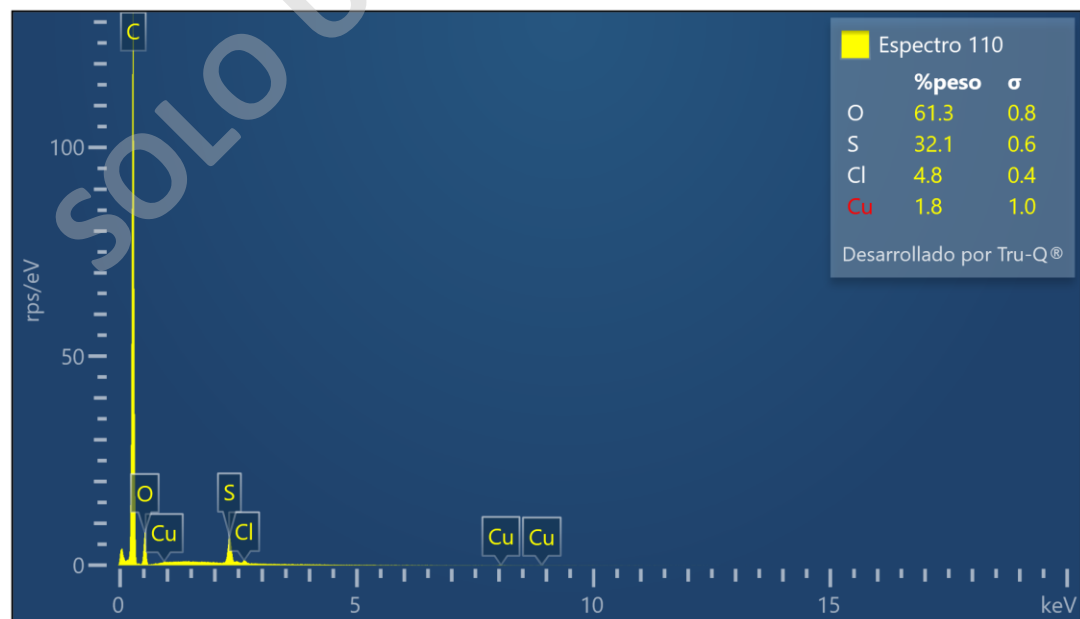
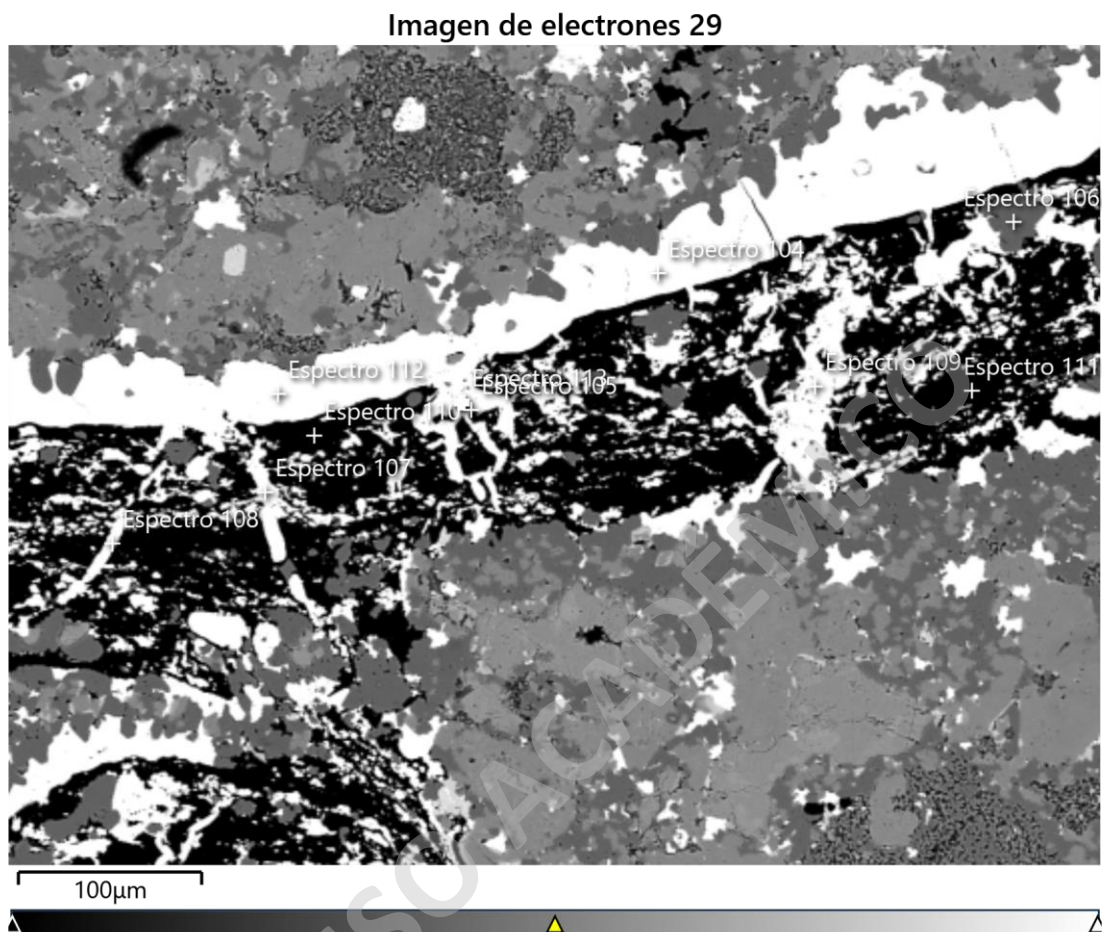
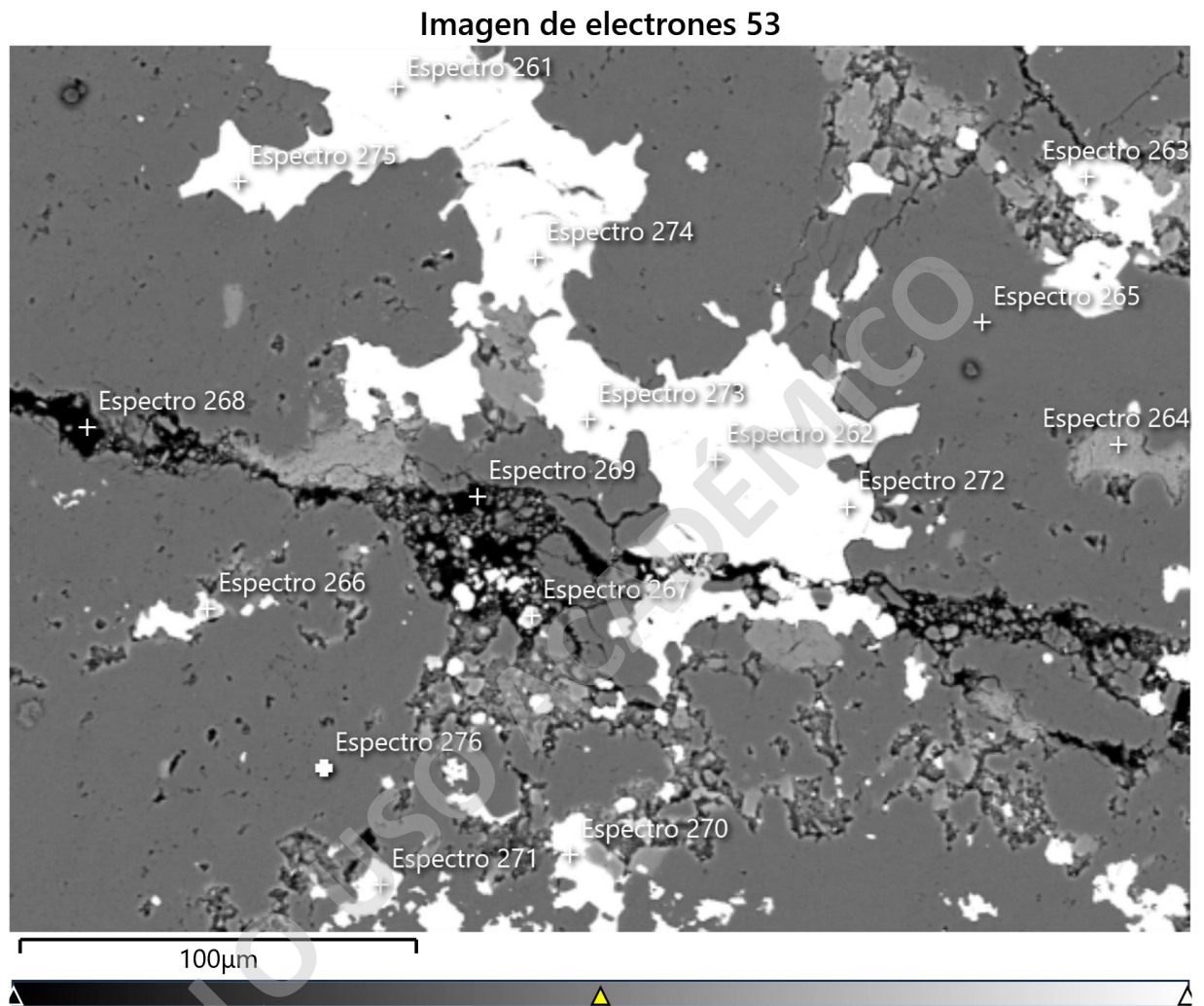


Figura 6: Materia orgánica con anomalías representativa.



B.2. Sector Blanco Este, Sección Transparente-Pulida PO-11

Figura 7. Bornita representativa y bornita con solución sólida de Ag.



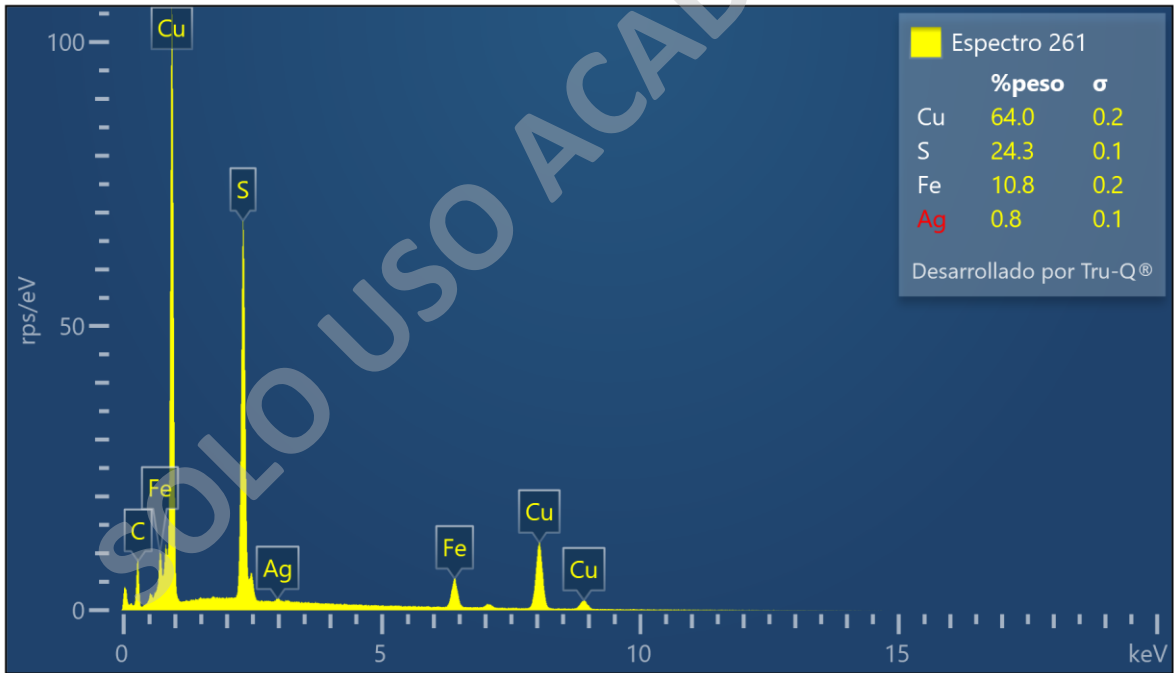
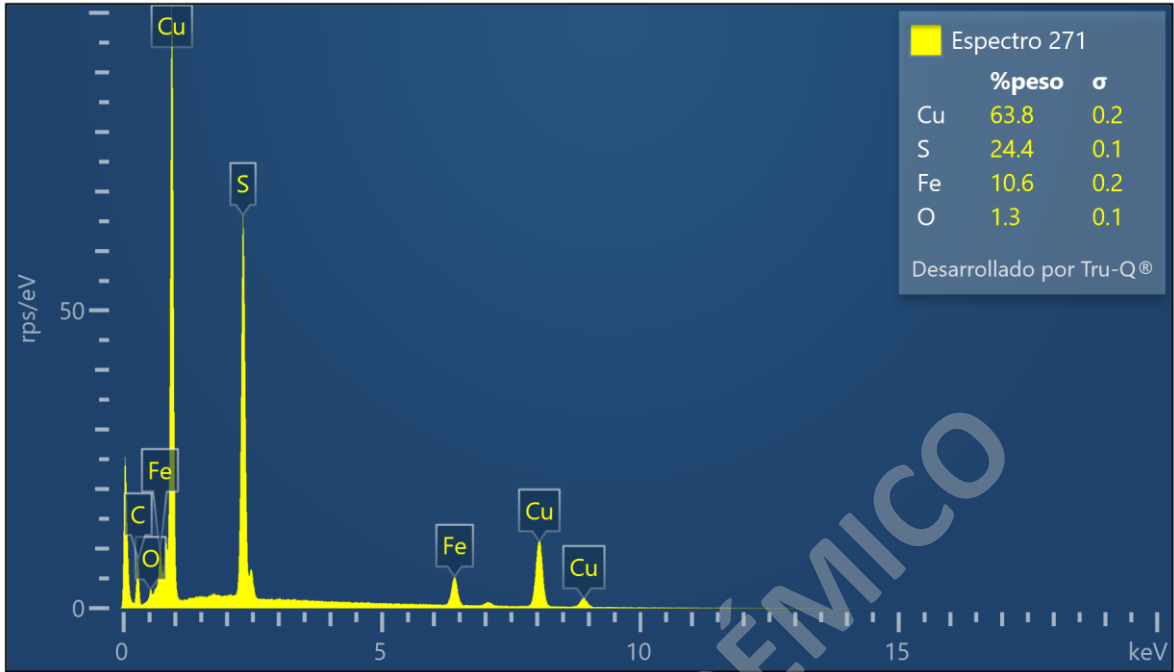


Figura 8: Calcopirita representativa.

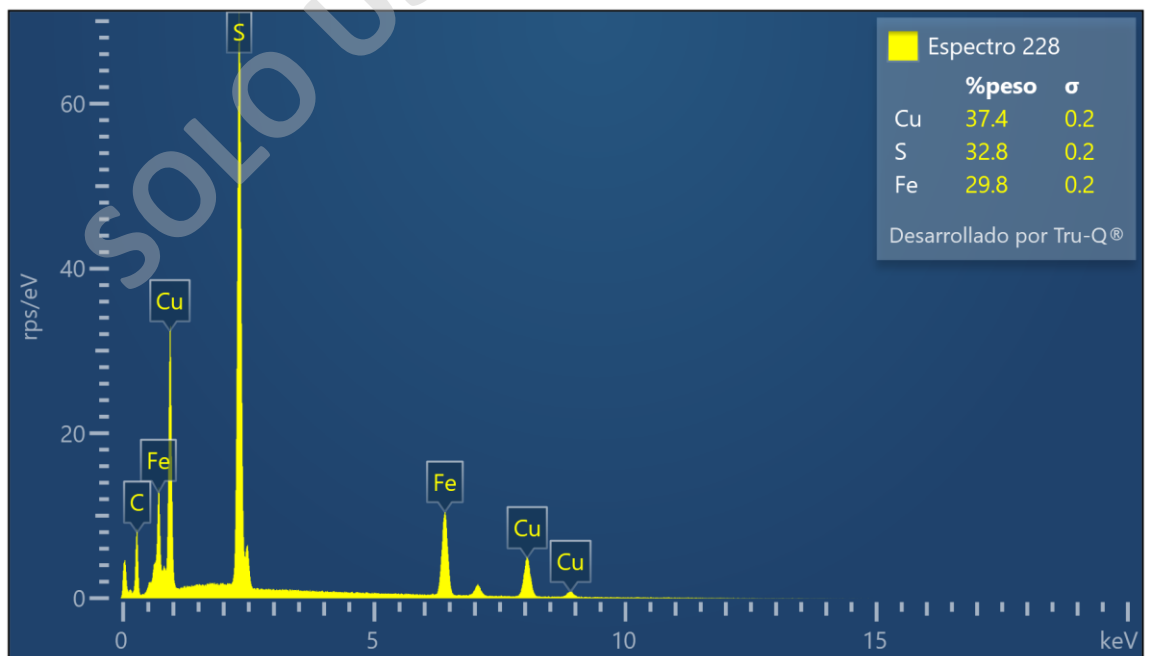
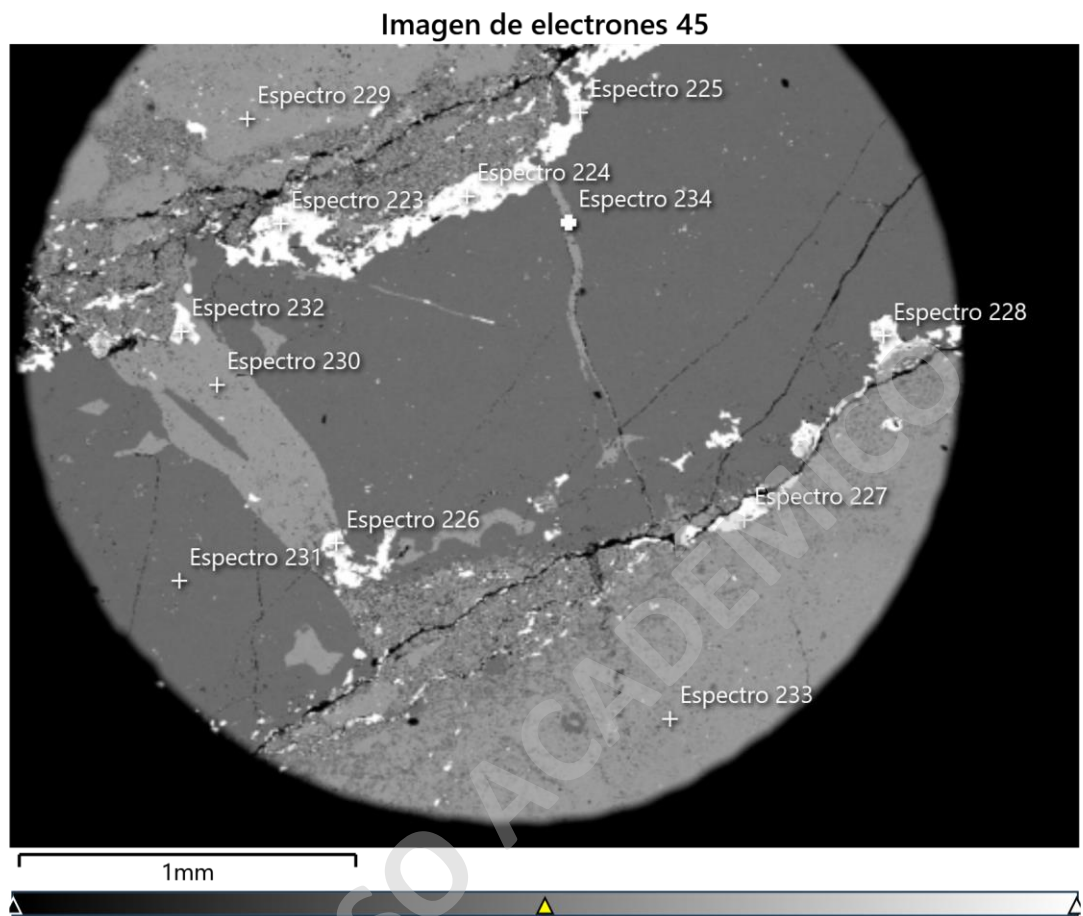
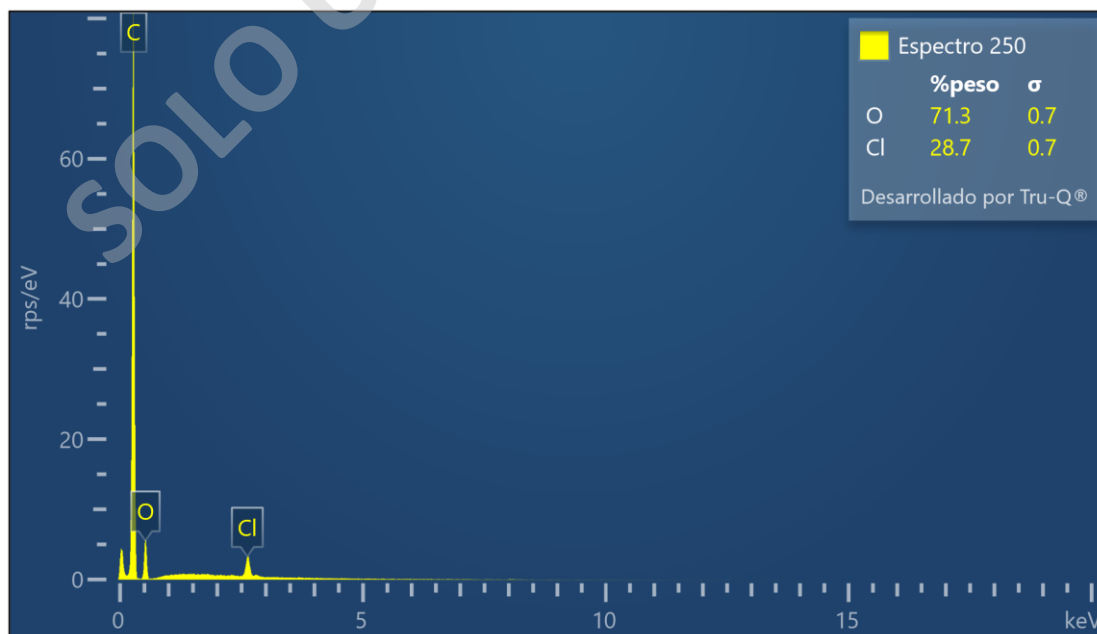
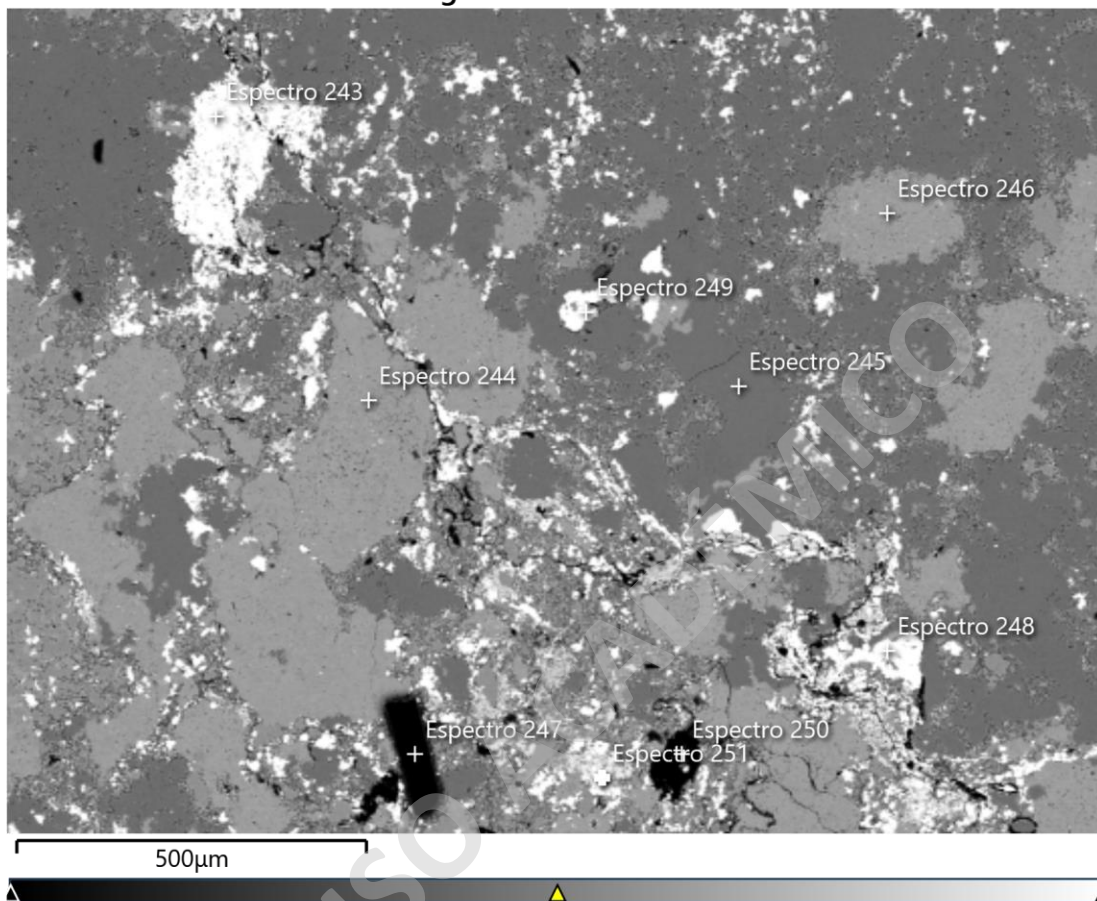


Figura 9: Materia orgánica con anomalía representativa.

Imagen de electrones 49



B.3. Química semi-cuantitativa de minerales de mena del Sector Renata Norte.

Tabla 3: Bornita

Espectro	Mena	Cu wt%	Ag wt%	S wt%	Fe wt%	O wt%
98	Bornita	63.3	-	24.1	10.6	2
101	Bornita	64	-	24.3	10.2	1.5
102	Bornita	63.4	-	23.3	10.6	2.7
103	Bornita	64.4	-	25	10.6	-
114	Bornita	64.4	-	23.5	10.2	1.3
115	Bornita	65	-	24.5	10.5	-
117	Bornita	64	-	23.9	10.8	1.3
118	Bornita	63.8	-	24	10.8	1.2
119	Bornita	63.9	-	24.2	10.8	1.1
120	Bornita	63.8	-	23.8	11.3	1.1
148	Bornita	63.6	-	23.6	10.6	2
149	Bornita	63.5	-	23.9	11.2	1.1
150	Bornita	64.2	-	23.8	11	1
154	Bornita	62.7	-	24.6	11.6	1.2
157	Bornita	61.9	0.4	24.1	11.5	1.7
164	Bornita	63	-	23.9	11.3	1.7
165	Bornita	62.9	-	24.4	11.4	1.3
167	Bornita	61.2	-	26.8	11.8	-
168	Bornita	61.8	-	25.3	11.5	1.3
171	Bornita	64	-	24.1	10.7	1.2
172	Bornita	63.2	-	24.4	11.2	1.2
173	Bornita	64	-	24.9	10.9	-
174	Bornita	59.7	-	22.2	9.2	3.3
175	Bornita	63.8	-	23.9	10.2	1.5
179	Bornita	64.3	0.5	23.6	10.4	1.1
181	Bornita	64	0.5	24.3	11	-
182	Bornita	63.5	-	24.1	11.2	1.2
183	Bornita	63.6	-	24	11	1.4
185	Bornita	51.9	-	21.5	10.5	7.7
187	Bornita	64.6	0.5	23.9	10.9	-
188	Bornita	64.9	-	24.2	10.9	-
192	Bornita	61.9	0.6	24.7	10.7	1.8
193	Bornita	63.2	-	24.4	10.7	1.3
194	Bornita	64.8	-	24.3	10.9	-
195	Bornita	64	0.7	22.1	9	3.2
196	Bornita	63.5	-	22.7	9.3	2.4
197	Bornita	65.1	-	23.7	9.9	1.3

203	Bornita	60.6	-	22.5	11	3.9
204	Bornita	64	-	23.7	10.8	1.2
207	Bornita	63.7	-	23.6	10.8	1.8
208	Bornita	56.4	0.5	20.8	9.5	8.4
209	Bornita	63.5	-	23.8	10.7	1.7
210	Bornita	61.6	0.6	23.5	10.3	3.4
211	Bornita	63.9	-	23.5	10.7	1.9
212	Bornita	62.5	1.1	24.4	8.3	3.2
213	Bornita	61.1	0.7	23.9	11.7	2.5
214	Bornita	63.9	-	24.7	11.2	-
215	Bornita	64.1	-	25	10.9	-
218	Bornita	63.6	-	25.1	11.1	-
219	Bornita	63.6	-	24	11	1.4
222	Bornita	64.4	-	24.9	10.6	-

Tabla 4: Calcosina-Digenita

Espectro	Mena	Cu wt%	Ag wt%	S wt%	Fe wt%	O wt%
104	Calcosina-Digenita	78.3	0.8	20.1	-	0.8
107	Calcosina-Digenita	78.4	0.6	20.2	-	0.8
108	Calcosina-Digenita	78.1	0.8	20.2	-	0.9
109	Calcosina-Digenita	78.2	0.6	20.2	-	1
112	Calcosina-Digenita	78.4	0.6	20.1	-	0.8
113	Calcosina-Digenita	78.5	0.6	20.2	-	0.7
121	Calcosina-Digenita	77.6	0.6	19.7	-	2
155	Calcosina-Digenita	75.2	0.7	22	0.5	1.3
166	Calcosina-Digenita	79.1	0.9	19.4	-	0.6
180	Calcosina-Digenita	79.1	0.6	19.5	-	0.6
220	Calcosina-Digenita	75.9	0.8	20.6	1.1	1.1

221	Calcosina-Digenita	78.3	0.8	19.2	-	1.2
-----	--------------------	------	-----	------	---	-----

Tabla 5: Stromeyerita.

Espectro	Mena	Cu wt%	Ag wt%	S wt%	Fe wt%	O wt%
105	Stromeyerita	31	43	16.7	-	5.1
186	Stromeyerita	36.5	46.6	14.4	-	2.4

Tabla 6: Clorargirita (?)

Espectro	Mena	Cu wt%	Ag wt%	O wt%	Ca wt%	Cl wt%	Yb wt%	Br wt%
125	Clorargirita	1.6	34.4	19.6	28.1	10.4	0.6	-
126	Clorargirita	0.4	39.2	12	26.1	15	-	4.9
138	Clorargirita	1.7	37	27	19.2	7.2	-	-
141	Clorargirita	0.5	31.8	24.4	32.4	7.1	0.8	-
142	Clorargirita	0.9	22.9	24.3	41.7	5.5	0.6	-

B.4. Química semi-cuantitativa de minerales de mena del Sector Blanco Este.

Tabla 7: Calcopirita.

Espectro	Mena	Cu wt%	Ag wt%	S wt%	Fe wt%
228	Calcopirita	37.4	-	32.8	29.8
232	Calcopirita	38.2	-	33.2	28.6

Tabla 8: Bornita.

Espectro	Mena	Cu wt%	Ag wt%	S wt%	Fe wt%	O wt%
223	Bornita	60.1	0.8	24	10.6	4.4
224	Bornita	61.4	-	21.9	7.9	5
225	Bornita	64.1	-	24.4	11.5	-
226	Bornita	63.8	-	24	11	1.2
227	Bornita	63	-	24.2	11.3	1.3
237	Bornita	64.3	-	24.5	11.2	-
238	Bornita	64	-	24.3	11.7	-
239	Bornita	64.4	-	24.4	11	-
241	Bornita	63.8	-	24.9	11.1	-
242	Bornita	62.4	-	23.9	10.8	1.8
243	Bornita	62.3	-	23.6	11.2	1.8
248	Bornita	62.8	0.5	24.1	11.1	1.5
249	Bornita	64.9	-	24.1	11	-
252	Bornita	64.3	-	23.8	10.7	1.2
253	Bornita	64.8	-	24.2	10.9	-
254	Bornita	62.7	-	23.5	11.7	2
255	Bornita	65.5	-	24.1	10.4	-
256	Bornita	63.9	-	24	10.4	1.5
257	Bornita	64.7	-	24.3	11.1	-
261	Bornita	64	0.8	24.3	10.8	-
262	Bornita	61.9	1.5	23.8	10.8	2
263	Bornita	63.7	0.7	24.6	10.8	-
266	Bornita	60.2	0.6	25.7	10.9	2.3
267	Bornita	62.9	-	24.7	10.1	1.9
270	Bornita	61.7	-	25.4	11	1.7
271	Bornita	63.8	-	24.4	10.6	1.3
272	Bornita	63.5	0.7	23.9	10.9	1
273	Bornita	62.4	0.8	24.4	11	1.4
274	Bornita	63.6	-	24.3	10.9	1.1
275	Bornita	63	0.8	24.3	10.6	1.1