



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**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**

**LESLY MARION VILCHES LÓPEZ**

**PROFESOR GUÍA:**

**MARTIN REICH MORALES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**FERNANDO BARRA PANTOJA**

**DIEGO MORATA CÉSPEDES**

Este trabajo ha sido financiado por Núcleo Milenio  
"Trazadores de Metales en Zonas de Subducción" NC130065.

**SANTIAGO DE CHILE**

**2018**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Geóloga

**POR:** Lesly Marion Vilches López

**FECHA:** Julio 2018

**PROFESOR GUÍA:** Martin Reich Morales

## **MINERALOGÍA Y QUÍMICA DEL BITUMEN EN DEPÓSITOS ESTRATOLIGADOS DE COBRE EN LA FRANJA CRETÁCICA INFERIOR ENTRE LOS 27° Y LOS 33° LATITUD SUR**

Estudios en yacimientos estratoligados de cobre en el centro-norte de Chile reconocen la ocurrencia de materia orgánica, descrita como bitumen o pirobitumen. Éste se encuentra asociado a sulfuros de mena y ganga y suele estar diseminado o en fracturas. Las relaciones texturales en la mayoría de los depósitos indican que los sulfuros son posteriores al bitumen, pero no aclaran si este es un componente esencial y activo en la formación de la mineralización de cobre, considerando su rol como secundario.

Este trabajo propone caracterizar el bitumen presente en yacimientos estratoligados de cobre para constreñir como éste se relaciona con los procesos de mineralización de cobre (y plata subordinada) minerales en este tipo de depósitos, y aportar nuevos antecedentes acerca de su génesis. Para ello se realizó un estudio comparativo en tres depósitos estratoligados de Cu (Ag), alojados en la franja cretácica, del centro-norte de Chile: El Soldado, localizado en la V Región de Valparaíso, y los depósitos de La Culebra y Mantos Cobrizos, situados en la III Región de Atacama. Para cada uno de ellos, se realizaron estudios petrográficos de detalle y análisis composicionales semicuantitativos de bitumen mediante microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS).

En términos generales, los depósitos estudiados presentan dos etapas de mineralización. La primera, de carácter hipógeno, está relacionada espacialmente al bitumen y a la formación de sulfuros de cobre. La segunda etapa se caracteriza por mineralización supérgena desarrollada de manera limitada, y representada por covelina, escasa digenita, hematita y óxidos de cobre.

En todos los depósitos estudiados se distingue más de un evento de introducción del bitumen. En general, éstos son previos a la mineralización de cobre, pero existen casos donde se asocia a una primera generación de mineralización de cobre, representada por bornita. La mineralogía de ganga (clorita, calcita, cuarzo, zeolita, prehnita, epidota), revela que el bitumen se emplaza en un contexto de temperaturas crecientes, con diversos episodios de alteración hidrotermal, algunos de ellos difíciles de distinguir del metamorfismo de bajo grado que caracteriza las rocas de caja. Se observan dos variedades texturales de bitumen, caracterizados en este estudio como bitumen liso y bitumen poroso. El primero suele estar enriquecido en Ca, Cl y S, comparado con el segundo. Además, se observa que independientemente de su variedad textural, el bitumen asociado a la mineralización de sulfuros de cobre está enriquecido en Fe, Cu, Cl y S. Además, presenta texturas de intercrecimiento con minerales de ganga, indicando que el bitumen interactuó con fluidos acuosos y en algún punto, previo a su solidificación, incorporó elementos desde éstos.

Los resultados de este estudio indican que el rol principal del bitumen en los yacimientos estratoligados de cobre del centro-norte de Chile es actuar como agente reductor, fomentando la precipitación de sulfuros de cobre y contribuyendo así a la formación de los depósitos. Sin embargo, y de acuerdo con la composición inferida del bitumen, la cual incluye complejos hetero-aromáticos y cantidades apreciables de metales y ligantes, no se descarta el rol de éste como agente de transporte, sugiriéndose así un rol activo, aunque secundario, en la formación de estos depósitos.

*“¿Qué sería la vida si no tuviéramos el valor de intentar cosas nuevas?”*  
**Vincent Van Gogh**

*“Nunca olvides lo que eres, porque, desde luego, el resto del mundo no lo va a olvidar. Conviértelo en tu mejor arma, así nunca será tu punto débil. Úsalo como armadura y nadie podrá utilizarlo para herirte”*  
**Tyrion Lannister**

*“Me acreditan ser uno de los trabajadores más duros, y quizás lo soy, si el pensamiento es equivalente a la labor, ya que he dedicado a ello casi todas mis horas despierto. Pero si el trabajo es interpretado como la ejecución definida en un tiempo específico, según reglas rígidas, entonces podría ser que soy el peor de los holgazanes.”*  
**Nikola Tesla**

*“Si tuviera la suerte de alcanzar alguno de mis ideales, sería en nombre de toda la humanidad.”*  
**Nikola Tesla**

*“Después de escalar una montaña muy alta, descubrimos que hay muchas otras montañas por escalar.”*  
**Nelson Mandela**

## Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi profesor guía Dr. Martin Reich por su paciencia, buena disposición y orientación a lo largo de este proceso. Además, mis más sinceros agradecimientos a los miembros de la comisión del presente trabajo de tesis, Dr. Fernando Barra y Dr. Diego Morata

Gracias al Núcleo Milenio Trazadores de Metales por la oportunidad de realizar esta memoria, en especial a Andrea Herazo por permitirme el acceso a las muestras de su proyecto de investigación. Agradezco al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) por permitirme utilizar el microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido (SEM).

Siempre he sido de pocas palabras, así que esto será breve.

Agradezco a mi familia que a pesar de todas las adversidades son incondicionales. A mi mamá y a mi papá por sacrificarse toda la vida por tratar de darnos un mejor futuro. A mis hermanitos que hace mi vida más entretenida. Gracias por todo.

A los bachiviejos que desde tiempos legendarios han estado presentes. Gracias por todos los buenos momentos.

Gracias especiales para las tóxicas... a ti Sergio, que estuviste desde el principio y has estado siempre. A ti Caro que me encanta esa simpleza con que vez las cosas.

A las geoniñas, esos momentos de papitas y mojitos no serán olvidados.

Agradezco a la gente de la oficina milenio, por la buena onda.

Agradezco también a todo aquel que he conocido en el camino y a quienes han sido parte de mi vida en algún momento.

Muchas gracias a mi querida abuelita que siempre me incentivo a que debía estudiar algo.

Finalmente, agradezco a los funcionarios del Departamento de Geología: Blanca Baccola, Christian Nievas, Rosita y Don Carlos.

# Tabla de Contenido

RESUMEN.....	i
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Formulación del Proyecto.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos .....	2
1.3 Hipótesis de trabajo .....	3
1.4 Metodología.....	3
1.5 Trabajos Anteriores.....	4
1.6 Ubicación y Vías de Acceso .....	5
2 Marco Geológico.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Marco Tectónico .....	9
2.3 Geología Regional .....	10
2.3.1 Área Copiapó.....	10
2.3.2 Área Quillota .....	18
3 ANTECEDENTES GENERALES DE LOS DEPÓSITOS ESTRATOLIGADOS DE COBRE DE CHILE.....	23
3.1 Generalidades.....	23
3.2 Modelos genéticos de los depósitos estratoligados.....	23
3.3 Bitumen en depósitos estratoligados.....	24
3.3.1 Bitumen .....	24
3.3.2 Ocurrencia de bitumen en depósitos estratoligados .....	25
4 MUESTRAS Y MÉTODOS ANALÍTICOS .....	29
4.1 Muestras.....	29
4.2 Microscopía Óptica.....	30
4.3 Microscopia electrónica de barrido.....	30
5 RESULTADOS.....	31
5.1 Análisis Petrográfico.....	31
5.1.1 El Soldado .....	31

5.1.2	La Culebra .....	43
5.1.3	Manto Cobrizo.....	50
5.2	Micro-análisis SEM .....	58
5.2.1	Composición del Bitumen .....	58
5.2.2	Mapas de elementos mediante espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS) 62	
6	DISCUSIONES .....	67
6.1	Generalización y Comparación entre las áreas de estudio.....	67
6.1.1	Bitumen .....	67
6.1.2	Etapas de formación .....	68
6.2	Caracterización de las etapas .....	69
6.3	Metales en bitumen.....	72
6.4	Rol del bitumen.....	74
7	CONCLUSIONES .....	75
8	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	ANEXOS .....	82

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Mapa de ubicación de los depósitos estratoligados de cobre La Culebra y Manto Cobrizo en la III Región de Atacama. La estrella amarilla indica la ubicación de los depósitos. ....	5
<b>Figura 2:</b> Mapa de ubicación del yacimiento estratoligado de cobre de El Soldado. La estrella amarilla señala la ubicación del depósito. ....	6
<b>Figura 3:</b> Franja del Cretácico Inferior mostrando los principales depósitos presentes en ella. Modificado de Maksaev y Zentilli (2002).....	8
<b>Figura 4:</b> Configuración Tectónica durante el Cretácico Temprano entre los 27° y 34° S. Extraído de Cisternas y Hermosilla (2006).....	9
<b>Figura 5:</b> Mapa Geológico del sector de Quebrada Los Cóndores escala 1:100000. El rectángulo amarillo indica el área aproximada de ubicación de La Culebra y el de color negro el de Manto Cobrizo. Modificado de Arévalo et al por Oetiker, 2016. Extraído de Oetiker 2016. ....	16
<b>Figura 6:</b> Mapa esquemático de la configuración geológica regional del yacimiento El Soldado, Región de Valparaíso. Extraído de Boric, et al. (2002).....	21
<b>Figura 7:</b> Distribución de los depósitos estratoligados Cu-Ag de edad Jurásica y Cretácica. Destacados en fondo de color amarillo se encuentran depósitos con materia orgánica. Modificado de Maksaev y Zentilli, (2002) y Kojima et al. (2009). ....	28
<b>Figura 8:</b> (a) Microscopio Óptico modelo Olympus CX31P. (b) Microscopio electrónico de barrido marca FEI, modelos Quanta 250.....	30
<b>Figura 9:</b> Cortes transparentes pulidos de las rocas observadas en EL Soldado (a) Andesitas verdes. (b) Riolitas.....	31
<b>Figura 10:</b> Fotomicrografía del bitumen del depósito El Soldado. (a) Muestra MZ-4-91. Bitumen anguloso y liso en amígdala cortado por calcita. (b) bitumen liso con piritas framboidales rellenas (formas esferoidales) (c) Muestra MZ-4-91. Bitumen con poros irregulares en vetilla junto a esfalerita y calcita. d) Bitumen anguloso y con poros redondeados, algunos rellenos de calcopirita. (e) Piritas subhedrales cortadas por bitumen liso y calcita. (f) Bitumen liso asociado con bornita. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Ccp= calcopirita, Cc=calcosina, Dj=Djurleita, Py=pirita, Sp= esfalerita.....	34
<b>Figura 11:</b> Fotomicrografías de asociaciones minerales, obtenidas mediante SEM. (a) y (b) Imágenes BSE de bitumen poroso asociado con bornita y calcosina, con calcosina con Ag en sus poros. (c) y(d)Pirita framboidal, la cual se observa que está compuesta de una aglomeración de piritas euhedrales. Imagen BSE. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cc=Calcosina, Py=pirita.....	35
<b>Figura 12:</b> Minerales de ganga y de alteración en El Soldado. (a) Amígdala rellena por calcita. Calcita I en los bordes y calcita II al centro. (b) Clorita de color azul de interferencia relleno amígdalas. (c) Calcita y cuarzo en mosaico y esferoidal en vetilla. (d) Roca alterada a sericita cortando epidota que altera minerales primarios. (e) Vetilla de bitumen siendo reemplazado por cuarzo. (f) Muestra Clorita y calcita cortando bornita en vetillas. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Chl=clorita, Ep=epidota, Qz=cuarzo. ....	37
<b>Figura 13:</b> Fotomicrografías que muestran las asociaciones de mineralización en el depósito El Soldado. (a) Framboides de pirita reemplazados por calcopirita, dentro de bornita. (b) Secuencia de reemplazo, pirita por calcopirita, luego está por bornita, y finalmente esta última siendo	

reemplazada por digenita-covelina. (c) Djurleita entre fracturas de bitumen, reemplazando pirita. (d) Clorita y calcita intercrecida reemplazando brechizando bornita. (e) Bornita y calcosina entre fracturas de bitumen. (f) Bornita con calcosina y hematita en su interior. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Ccp= calcopirita, Cc=calcosina, Cov=covelina, Dg=Digenita, Hm= hematita, Py=pirita, Sp= esfalerita ..... 39

**Figura 14:** Fotomicrografías de minerales de ganga en el depósito La Culebra. (a) Amígdala con relleno de pirita, clorita y bitumen, estos dos presenta una secuencia intercalada de relleno, bitumen-clorita-bitumen. (b) Amígdala con ceolita y pirita subhedral intercrecidas (c) Bitumen liso con pirita euhedral en su interior. (d) Bitumen con fracturas rellenas por cuarzo en mosaicos irregulares y calcita. (e) y (f) Bitumen liso y poroso en amígdala junto a prehnita (e) imagen a luz reflejada y (f) imagen a luz transmitida y nicoles paralelos. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Chl=clorita, Prh=Prehnita, Py=pirita, Qz=cuarzo, Zeo=ceolita. .... 45

**Figura 15:** Fotomicrografía de minerales de mena en el depósito La Culebra. (a) Esfalerita con cuarzo cortando amígdala de bitumen y clorita (b) Secuencia de reemplazo: pirita-calcopirita-covelina. (c) Similar secuencia a (b) con asociada con bitumen y covelina coliforme (d) Bornita diseminada con calcopirita asociada por bordes rectilíneos. (e) Bornita anhedral disemina con reemplazo tipo corona de covelina-digenita. (f) Crisocola relleno espacios abiertos en roca altamente alterada, se tiene calcosina en amígdalas. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Chl=clorita, Ccp= calcopirita, Crc= crisocola, Cc=calcosina, Cov=covelina, Dg=Digenita, Py=pirita, Sp= esfalerita, Qz=cuarzo..... 46

**Figura 16:** Bitumen en el depósito de Manto Cobrizo. (a) Bitumen diseminado en espacio entre fracturas asociado con pirita con reemplazos de calcopirita, clorita-esmectita y calcita. Imagen en luz reflejada. (b) Bitumen poroso diseminado en vetillas de cuarzo. (c) Bitumen liso diseminado en vetilla de cuarzo y cortado por vetilla de calcita, bornita, calcosina. (d) Bitumen liso cortando bornita con calcosina con texturas mimerquíticas. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Chl-Sm=clorita-esmectita, Ccp= calcopirita, Cc=calcosina, Plg=plagioclasa, Py=pirita, Qz=cuarzo..... 51

**Figura 17:** Fotomicrografía que muestra minerales de ganga en Manto Cobrizo. (a) Amígdala con relleno central de bitumen, rodeado de zeolita y estas a su vez por clorita. Masa fundamental se encuentra alterada a ceolita. Imagen a luz transmitida. (b) Bitumen con pirita euhedral en su interior, en fracturas de la roca huésped. Imagen a luz reflejada. (c) y (d) Clorita-esmectita y pirita euhedral formando pseudomorfo de cristales primarios, imagen (c) a luz transmitida e imagen (d) a luz reflejada. (e) Pirita, bitumen, cuarzo y calcita asociado en fracturas. (f) Calcita en amígdalas siendo ‘cementada’ por pirita, la cual rellena fracturas de la roca huésped y corta plagioclasas. Abreviaciones minerales: Bit= bitumen, Cal=calctia, Chl-Sm=clorita-esmectita, MF=masa fundamental, Plg=plagioclasa, Py=pirita, Qz=cuarzo, Zeo=ceolita. .... 53

**Figura 18:** Fotomicrografía de la mineralización de cobre en el depósito Manto Cobrizo. (a) Calcopirita con sobrecrecimientos y relictos de pirita y bordes con reemplazo incipiente de enargita. (b) Secuencia de reemplazo: pirita-calcopirita-enargita-covelina. (c). Islas de pirita en pseudomorfo, junto con clorita-esmectita y bornita-calcosina. (d) Bornita con relictos de pirita, producto de reemplazo, con reemplazo de calcosina desde fracturas entrecrecidas con bitumen. (e) Bornita con reemplazo de calcopirita y covelina-digenita con bordes cóncavos hacia el bitumen. (f) Secuencia de reemplazo: pirita- bornita- calcopirita- enargita. Abreviaciones minerales:

Bit=bitumen, Bn= bornita, Chl-Sm=clorita-esmectita, Ccp= calcopirita, Cc=calcosina, Cov=covelina, Dg=digenita, En=enargita, MF=masa fundamental, Py=pirita. .... 54

**Figura 19:** Diagramas de dispersión de elementos detectados en bitumen mediante SEM-EDS, graficados en función del contenido de carbono. Rombos amarillos corresponde al depósito El Soldado, triángulos morados al depósito La Culebra y cuadrados verdes al depósito Manto Cobrizo.

..... 59

**Figura 20:** Diagramas de dispersión de elementos detectados en bitumen mediante SEM-EDS para El Soldado. En la columna izquierda se despliegan las gráficas separadas por variedad textural, donde rombos amarillos corresponden a bitumen liso y rombos azules a bitumen poroso, mientras que a la derecha las gráficas se separan por variedad textural y asociación mineral. Rombos amarillos corresponden a bitumen liso no asociado a sulfuros de cobre, rombos verdes a bitumen liso asociado a sulfuros de cobre, rombos azules a bitumen poroso no asociado a sulfuros de cobre y rombos rosados a bitumen poroso asociado a sulfuros de Cu. .... 61

**Figura 21:** Mapa SEM-EDS que muestra la distribución de C, O, Al, Cl, Fe, S en bitumen. Muestra MTCUL2C, La Culebra..... 63

**Figura 22:** Mapa de distribución de elementos para S en bitumen, obtenido mediante SEM-EDS (paneles inferiores). Se muestra en los paneles superiores una imagen SEM del grano analizado. (a) Bitumen asociado con bornita y calcita, presenta distribución homogénea en bitumen. Muestra NW46-1, El Soldado. (b) Bitumen asociado con calcopirita, presenta distribución homogénea en bitumen. Muestra MTCUL1A-G, La Culebra. .... 64

**Figura 23:** Mapas de distribución de elementos C, O, y S en bitumen liso y bitumen poroso, obtenidos mediante SEM-EDS. Muestra NW39, El Soldado. .... 65

Algunos autores sostienen que elementos distribuidos de manera homogénea en mapas elementales indican que estos están presentes en la estructura del bitumen, bien o como nanopartículas (Fuchs et al., 2016; Wilson & Zentilli, 1999). Los mapas realizados muestran que el C, O, Si, Al, Na, Mg, Ca y el Cl, presentan dicha distribución (**Figura 21;Figura 24; Anexo C**). Sin embargo, la intensidad observada en los mapas realizados en muchos casos suele ser débil, por lo cual no se puede asegurar con certeza que esto sea pausable para todos los elementos ni discernir si es una tendencia general o son casos puntuales de que estos elementos fueron incorporados a bitumen.72 Un caso particular es el S, el que fue detectado en todos los mapas elementales realizados (**Figura 21;Figura 22**). El S en dichos mapas siempre se distribuye de forma homogénea en el bitumen, lo que apuntaría a la presencia de complejos de composición hetero-aromática (tiol y tiofenos) que son comunes en la fracción insoluble de hidrocarburos derivados de sedimentos marinos bajo condiciones reductoras (Fuchs, 2014). Adicionalmente, análisis de geoquímica orgánica realizados en depósitos del Metalotecto Ocoita Pabellón, al cual pertenecen La Culebra y Manto Cobrizo, detectan un alto porcentaje de componentes tio-aromáticos (Rieger et al. 2008). También se han realizado análisis de isotopos de  $\delta^{13}\text{C}$  en dichos depósitos, los cuales presentan rangos entre -26 a -23,50 ‰ (Cisternas et al.,1999), mientras que en El Soldado los valores oscilan entre -30 a -27 ‰ (Wilson en Haggan et al, 2003). Estos valores son consistentes con un origen marino de los hidrocarburos (-31 a 25‰, Hunt, 1996). .... 72

Una particularidad detectada en el gráfico de correlación de O vs C es que a mayores cantidades de C se asocian a menor O (**Figura 19**). Una probable explicación a esto es que la materia orgánica pierde hidrocarburos livianos cuando aumenta la temperatura, y esto se traduce en primera instancia

en una pérdida de hidrógeno, y de oxígeno en etapas avanzadas, aumentando la concentración de hidrocarburos pesados y con ello la concentración de carbono (Wilson, 2000). Esto también se puede ver reflejado en el aumento de S, donde en La Culebra se observa claramente que a mayor cantidad de C hay también más S, ya que este también es característico de hidrocarburos pesados.

.....	73
Al considerar la variación textural del bitumen, se tiene que el bitumen liso es más rico en Ca, Cl y S que bitumen poroso. Además, en los mapas de elementos se observa que el bitumen liso concentra mayor cantidad de C y S que el bitumen poroso ( <b>Figura 23</b> ). Si se toma en consideración la mineralogía asociada al bitumen, se distingue una población enriquecida en S, en la cual el bitumen se encuentra asociada con sulfuros de cobre, siendo la variedad textural lisa la que presenta los valores más altos ( <b>Figura 20</b> ). La variedad porosa, también registra un enriquecimiento, aunque menos significativo. Además, se observa que el Cl y Cu tienden a ser detectados cuando ambas variedades de bitumen están asociadas con sulfuros de Cu. Algo similar se observa para el Fe, pero son pocos los datos que se tienen para definir una tendencia.....	73

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Descripción de los roles de la materia orgánica en depósitos minerales. Extraído de Leventhal & Giordano 2000.....	1
<b>Tabla 2:</b> Categorías de materia orgánica basada en características de solubilidad. Extraído de Leventhal y Giordano 2000.....	24
<b>Tabla 3:</b> Código de muestras, depósito al que pertenece y tipo de análisis realizados, petrografía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). ESL=El Soldado. MTCUL= La Culebra. MTC= Mantos Cobrizos.....	29
<b>Tabla 4:</b> Secuencia Paragenética del depósito El Soldado. El grosor de las líneas indica abundancia relativa de cada mineral, línea punteada probablemente fue un evento continuo. A=Amígdalas, V=vetillas, Inc=inclusiones, R=Reemplazo.....	42
<b>Tabla 5:</b> Secuencia Paragenética de La Culebra. Grosor de las líneas indica abundancia relativa y las líneas punteadas indican probablemente un evento continuo en el tiempo. ....	49
<b>Tabla 6:</b> Secuencia Paragenética Manto Cobrizo. Grosor de las líneas indica abundancia relativa, línea punteada probablemente fue un evento continuo. A=Amígdalas, V=vetillas, Incl=inclusiones, R=Reemplazo, F=fracturas, MF=masa fundamental.....	57

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Formulación del Proyecto

La materia orgánica ha sido documentada en diversos tipos de depósitos minerales alrededor del mundo, en una variedad de ambientes y tiempos geológicos. Se puede encontrar asociada con minerales de mena, ganga y roca huésped, cuyas relaciones pueden proporcionar información y restricciones importantes respecto a la formación de los depósitos, permitiendo construir modelos genéticos (Wilson, 1998; Leventhal y Giordano, 2000).

**Tabla 1:** Descripción de los roles de la materia orgánica en depósitos minerales. Extraído de Leventhal & Giordano 2000

<b>Proceso</b>	<b>Función</b>
<b>Movilización</b>	Transferencia de constituyentes desde la roca madre al fluido.
<b>Transporte</b>	Transporte de constituyentes desde la fuente al sitio de depósito manteniendo concentraciones altas de éstos en solución.
<b>Concentración</b>	Transferencia de constituyentes desde el fluido mineralizador al sitio de depósito.
<b>Reducción</b>	Modificación de un constituyente, por adición de electrones para producir una nueva especie más reducida.
<b>Oxidación</b>	Modificación de un constituyente, por pérdida de electrones para producir una nueva especie más oxidada.
<b>Preservación</b>	Efecto de protección de los minerales de mena ante procesos de solubilización y oxidación

En Chile se ha reportado materia orgánica sólida en forma de bitumen y pirobitumen en yacimientos estratoligados de cobre y plata (Cu-Ag), principalmente de edad cretácica. El primer reporte de bitumen fue realizado en 1970 por Ulriksen en la mina de cobre Uchumi, en la IV región. (Zentilli et al., 1994). En 1985 fue identificada su presencia en El Soldado, (Holmgren, 1987). Posteriormente se reconoce en diversos depósitos en el norte de Chile, destacando el distrito de Talcuna en la IV Región y en las cercanías de la ciudad de Copiapó, en la III Región. (Cisternas y Frutos, 1996; Zentilli et al., 1994; Wilson y Zentilli, 2006).

Estudios previos en estos depósitos han reconocido la ocurrencia del bitumen asociado a sulfuros de mena y ganga, encontrándose éstos diseminados o en fracturas. Las relaciones paragenéticas, en la mayoría de los casos, indican que los sulfuros son posteriores al bitumen, pero no aclaran si éste es un componente esencial o más bien secundario en la génesis de los depósitos,

considerando un rol solo como agente reductor (Cisternas y Hermosilla, 2006; Haggan et al., 2003; Rieger et al., 2008; Wilson, 1998; Wilson y Zentilli, 1999).

El presente trabajo propone investigar la ocurrencia mineral, composición química y distribución de elementos en la materia orgánica sólida remanente (bitumen) y sus fases minerales asociadas en tres depósitos estratoligados de Cu- (Ag), pertenecientes a la franja del Cretácico Inferior. Los depósitos estudiados corresponden a Mantos Cobrizo y La Culebra, situados en la III Región de Atacama y El Soldado localizado en la V Región de Valparaíso. Este estudio, de carácter comparativo, pretende aportar nuevos antecedentes acerca del rol de la materia orgánica en la metalogénesis de los yacimientos estratoligados de cobre en Chile.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Caracterizar la materia orgánica sólida (bitumen y pirobitumen) en depósitos estratoligados de Cu-(Ag) de la Región de Atacama y la Región de Valparaíso, determinando las fases minerales asociadas y elementos químicos presentes, con el propósito de evaluar, establecer y restringir el papel que desempeña está durante los procesos de mineralización de cobre.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Definir y caracterizar detalladamente la mineralogía asociada a bitumen.
2. Establecer asociaciones minerales y definir secuencias paragenéticas.
3. Identificar áreas de interés y realizar análisis composicional semi-cuantitativo en bitumen
4. Obtener mapas de distribución de elementos en bitumen caracterizando fases presentes a escala micrométrica.
5. Discutir los resultados para cada depósito, establecer afinidades, tendencias y diferencias con otros depósitos y distritos y llevarlo a un contexto metalogénico general.

### **1.3 Hipótesis de trabajo**

La ocurrencia de materia orgánica en depósitos estratoligados de Cu-(Ag) favorece la precipitación de sulfuros de cobre al actuar como agente reductor. Dado lo anterior, se plantea que el bitumen reacciona con los otros fluidos hidrotermales que ingresan al sistema, modificando su composición química. Se propone que el bitumen, además de ejercer un rol pasivo como agente reductor durante la mineralización podría aportar metales y ligantes al sistema, al menos parcialmente, adquiriendo un rol activo como agente de transporte.

### **1.4 Metodología**

El presente estudio incluyó una recopilación bibliográfica de los depósitos estratoligados chilenos, además de diversos estudios sobre la presencia de bitumen y su rol en la mineralización. Luego se establecieron dos zonas de interés, geográficamente distantes, una cercana a Copiapó, en la III Región de Atacama, que involucra a los depósitos Mantos Cobrizos y La Culebra y la otra más cercana a Santiago, representada por El Soldado en la V Región de Valparaíso.

El desarrollo de esta Memoria contempló las siguientes etapas:

- Análisis petrográfico de cortes pulidos transparentes de cada depósito utilizando microscopía óptica de polarización mediante luz transmitida y reflejada.
- Microanálisis y análisis de detalle de cortes pulidos elegidos en la etapa previa, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de espectrometría de absorción de energía de rayos X (EDS).
- La última etapa consistió en desarrollar una discusión de los resultados obtenidos en las etapas previas.

## 1.5 Trabajos Anteriores

Los depósitos estratoligados de Cu-(Ag) en Chile han sido objeto de estudio durante varias décadas, por lo cual existe amplia bibliografía al respecto. A continuación, se presentan los trabajos más relevantes que involucran la descripción de materia orgánica en estos depósitos.

Leventhal y Giordano, (2000): Realizan un examen de los roles que tiene la materia orgánica, proponen criterios para evaluar cómo se involucra en la formación de depósitos de distintas partes del mundo.

Zentilli et al. (1997): Realizan una recopilación de la presencia de materia orgánica en depósitos estratoligados en Chile, tomando como ejemplo la mina El Soldado.

Cisternas et al., (1999); Cisternas y Hermosilla, (2006); Haggan et al., 2003): Realizan estudios de la mineralización de cobre en los depósitos Manto Cobrizo y La Culebra y su asociación con materia orgánica. Los estudios se realizan como conjunto dentro del denominado Metalotecto Ocoita Pabellón y se establece la existencia de cuatro asociaciones minerales principales, las cuales caracterizan dos eventos hidrotermales.

Rieger et al., (2008): Estudian la materia orgánica de los depósitos del Metalotecto Ocoita Pabellón por medio de geoquímica orgánica y proponen un modelo para la génesis, migración y evolución del bitumen de esa zona.

Wilson (1998); Wilson y Zentilli (1999; 2003): De esta serie de publicaciones se documenta la materia orgánica en el depósito El Soldado. De estos estudios se desprende que el bitumen es el remanente de un reservorio previo de petróleo degradado, el cual controló física y químicamente la formación de los sulfuros de mena, cuando soluciones hidrotermales, asociadas con el emplazamiento de cuerpos intrusivos durante el Cretácico, circularon a través de él.

Wilson et al., (2000): Se llevan a cabo estudios en el pirobitumen en El Soldado, por medio de petrología orgánica, composición química y análisis de reflectancia, para establecer la evolución del depósito.

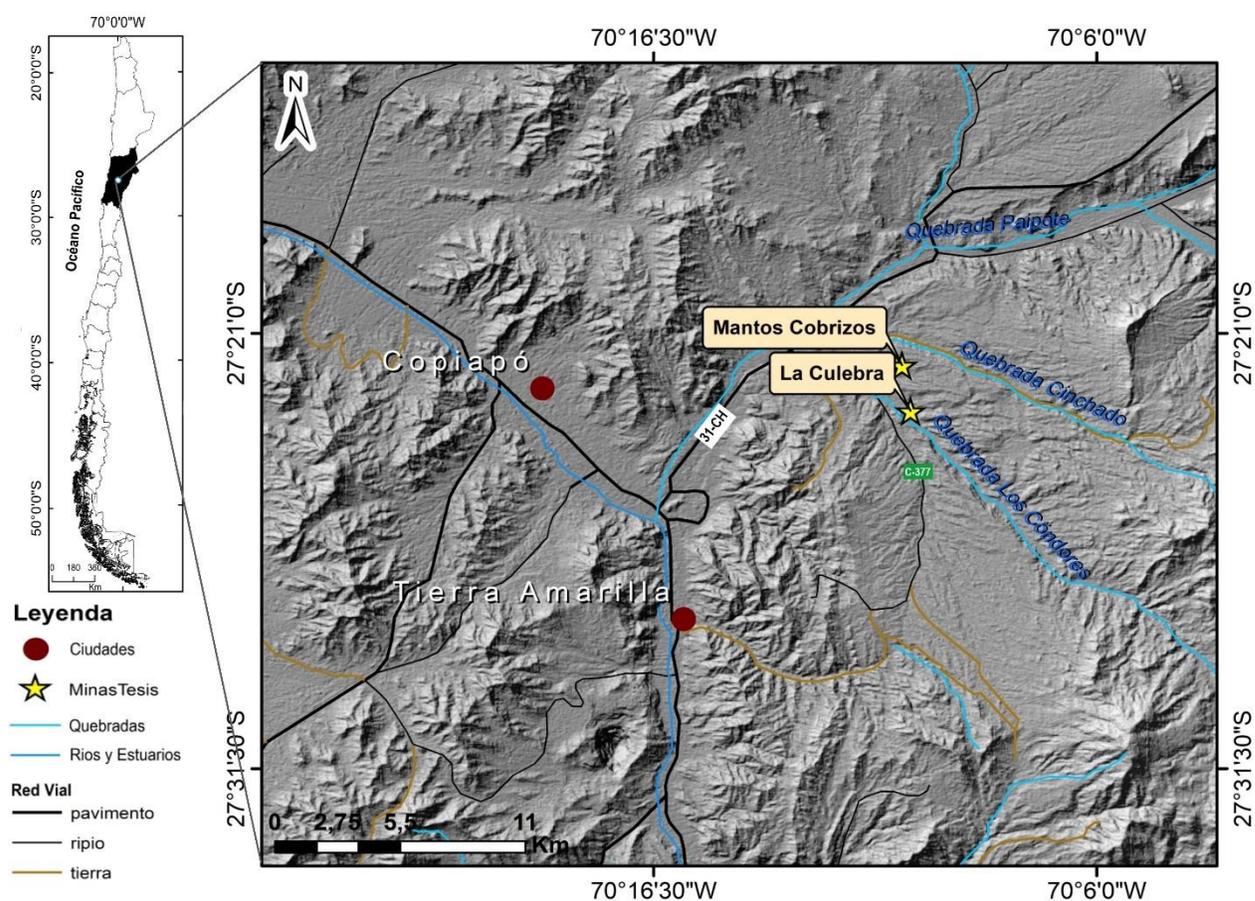
Boric et al., (2002) Realizan una actualización de los antecedentes geológicos del depósito el Soldado.

Kojima et al. (2009) Realizan una recopilación de los estratoligados de la franja jurásica y la franja cretácica, haciendo énfasis en datos isotópicos de Sr, Pb, S y Os, además de realizar estudios de inclusiones fluidas, con los cuales propone un origen epigenético para estos depósitos con fluidos que lixivian metales de la roca caja.

## 1.6 Ubicación y Vías de Acceso

Los depósitos de Manto Cobrizo y La Culebra se encuentran en la Sierra Cinchado, en la III Región de Atacama, a unos 16 km al E de la ciudad de Copiapó, específicamente en la Quebrada Los Cóndores (**Figura 1**). Sus coordenadas son 27°22'13.3" latitud S y 70°6'15.2" longitud W y 27°22'19.71" latitud S y 70°10'21.03" longitud W, respectivamente (Rieger, et al., 2008).

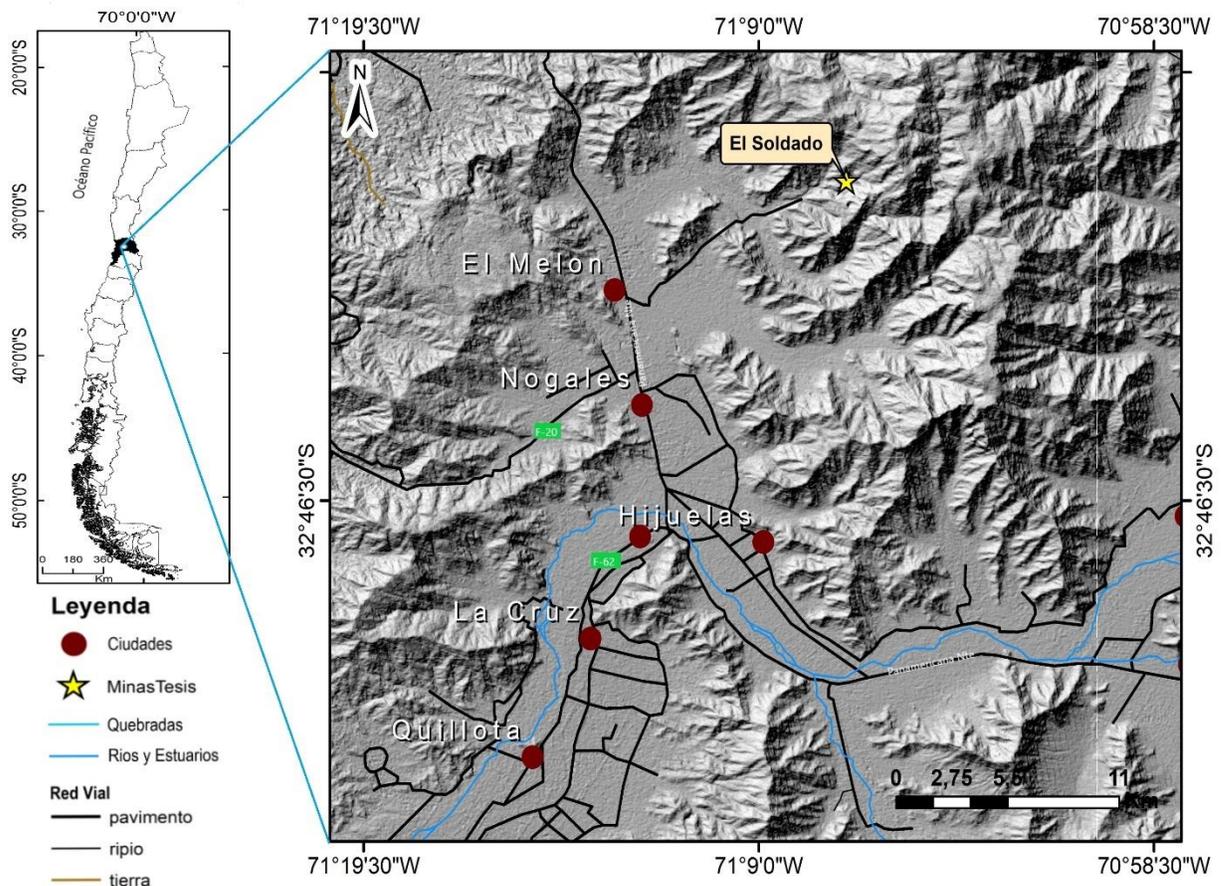
Desde Copiapó se puede acceder por camino Copayapu hacia el sureste, luego se accede hacia Carretera del Inca, que pasa por localidad de Paipote. Se continúa por la ruta 31-CH hacia el este y se gira a la derecha tomando la ruta C-377, finalmente para acceder a las minas se deben tomar caminos ripiados.



**Figura 1:** Mapa de ubicación de los depósitos estratoligados de cobre La Culebra y Manto Cobrizo en la III Región de Atacama. La estrella amarilla indica la ubicación de los depósitos.

El Soldado se encuentra en la comuna de Nogales, Provincia de Quillota, V Región de Valparaíso, con coordenadas 32°38' latitud S y 71°4' longitud W (Figura 2). Se sitúa a 120 km al noroeste de Santiago en la Cordillera de la Costa de Chile Central. (Boric, et al., 2002)

Desde Santiago, se accede por la carretera Panamericana Norte, luego a la altura del sector El Melón se dobla hacia el este y se sigue por un camino rural asfaltado de 10 km que llega hasta la planta concentradora El Cobre, desde donde se sigue un camino ripiado de 4 km de longitud que llega hasta la mina.



**Figura 2:** Mapa de ubicación del yacimiento estratoligado de cobre de El Soldado. La estrella amarilla señala la ubicación del depósito.

## 2 Marco Geológico

### 2.1 Introducción

Los depósitos investigados en el presente estudio, Manto Cobrizo, La Culebra y El Soldado se encuentran en la denominada franja metalogénica del Cretácico Inferior. Esta franja se aloja, principalmente, a lo largo de la Cordillera de la Costa y está compuesta de rocas volcánicas, volcano-sedimentarias y complejos plutónicos, presentando una variedad de yacimientos metálicos. Entre los 26° y los 31° se concentran depósitos de magnetita-apatito, como Cerro Imán y Algarrobo, los cuales se encuentran en segmento meridional del Sistema de Falla de Atacama. En estas latitudes destacan de igual forma yacimientos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG) como Candelaria y Manto Verde. Además, se encuentran pórfidos cupríferos, donde destaca Carmen de Andacollo. En la zona norte y centro norte aparecen los depósitos estratoligados, de Cu-(Ag), destacando El Soldado por ser el de mayor volumen. También en esta franja se encuentran vetas auríferas mesotermales y skarns de cobre. La distribución de estos yacimientos se puede observar en la **Figura 2** (Maksaev, 2001; Maksaev y Zentilli 2002).

El presente capítulo busca dar a conocer el contexto geológico en el cual se encuentra cada yacimiento estudiado en esta Memoria. Para ello se describe con el marco tectónico durante el Cretácico Inferior y se continúa con la geología regional y distrital, describiendo las unidades geológicas y estructuras asociadas a cada uno de ellos.

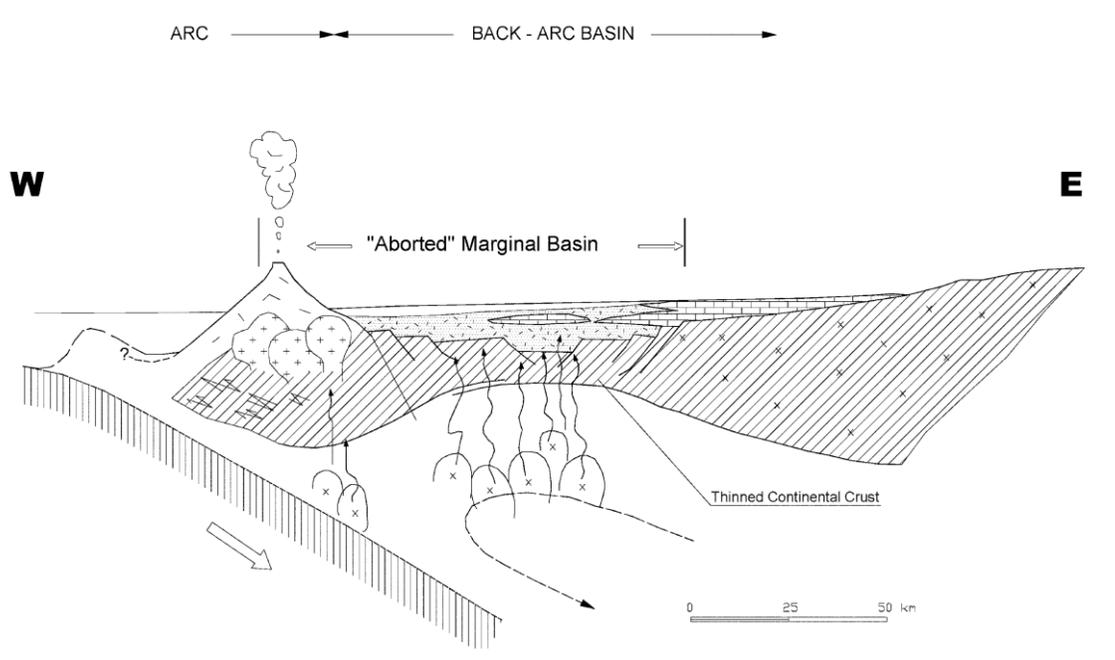


**Figura 3:** Franja del Cretácico Inferior mostrando los principales depósitos presentes en ella. Modificado de Maksaev y Zentilli (2002)

## 2.2 Marco Tectónico

Los depósitos estratoligados de Cu-(Ag) se distribuyen a lo largo de la Cordillera de la Costa entre los 22° y los 34° de latitud sur, y son hospedados por secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias de edad jurásica superior a cretácica inferior. Esto los sitúa temporalmente en la primera etapa del ciclo andino (Maksaev y Zentilli, 2002).

La configuración tectónica durante en ese periodo ha sido interpretada como un arco volcánico calco-alkalino con condiciones extensionales, formando una cuenca de intra-arco (Levi, 1969). Sin embargo, entre los 27° y los 34°S (entre Copiapó y sur de Santiago) el proceso de apertura por extensión en el sector trasarco fue abortado tempranamente, y no culminó con la formación de corteza oceánica, como ocurre en el desarrollo de una cuenca marginal en sentido estricto, expresándose solamente en emisiones de grandes volúmenes de rocas volcánicas (Mpodozis & Ramos 1990; Ramos 2010). Este escenario se puede apreciar en la **Figura 4**.



**Figura 4:** Configuración Tectónica durante el Cretácico Temprano entre los 27° y 34° S. Extraído de Cisternas y Hermosilla (2006)

## 2.3 Geología Regional

Los depósitos de Manto Cobrizo y La Culebra se encuentran en la III Región de Atacama, mientras que El Soldado se localiza en la V Región de Valparaíso, por ello la geología regional se dividirá en dos áreas: Copiapó y Quillota

La información entregada en este apartado se basa en la Carta Copiapó, de la III Región de Atacama de Arévalo (2005) y la Hoja Quillota – Portillo, de la V Región de Valparaíso de Rivano (1996).

### 2.3.1 Área Copiapó

En la Región de Atacama, entre los 26° y 29° latitud sur, el sistema arco-trasarco es representado por el Grupo Chañarcillo y la Formación Bandurrias (Rieger et al., 2008). Las rocas intrusivas de la misma edad corresponden a hipabisales de composición intermedia a básica. Estas unidades han sido descritas en la carta geológica Copiapó por Arévalo en 2005 y se detallan a continuación. La distribución de estas se aprecia en la **Figura 5**.

#### 2.3.1.1 Rocas Estratificadas

*Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior- Valanginiano Inferior; Segerstrom y Ruiz, 1962)*

Secuencia volcánica y sedimentaria, de estratificación gruesa, que sobreyace concordantemente a la Formación La Negra y subyace de igual modo a la Formación Abundancia.

Esta unidad aflora en los bloques yacente y colgante de la falla paipote. En el bloque yacente la sección basal tiene un espesor de 150 a 200 m. de espesor, corresponde a lavas andesíticas que forman domos y lavas dacíticas, mientras que la sección superior contiene brechas macizas asociadas a pliegues sinsedimentarios, lutitas laminadas rojas y coladas de lavas lenticulares andesítica-basálticas con pillow. Su espesor va de 150 a 200 m. El bloque colgante presenta una secuencia de metandesitas, brechas y sedimentos clásticos metamorfozados (biotitizados, silicificados y epidotizados).

El material fosilífero, principalmente ammonites, recolectado al suroeste de Nantoco, y en un afluente de la quebrada Nantoco (Arévalo, 2005; Pérez, 1998; Mourgues, 2001) permiten asignar una edad valanginiana inferior media a valanginiana inferior tardía. Esto, sumado a la inexistencia de una edad precisa para la base de la secuencia, permiten otorgar a la Formación Punta del Cobre un rango de edad jurásica superior-valanginiana inferior.

La formación se interpreta como la acumulación de sedimentos en una plataforma clásica o línea de costa, contemporánea con actividad volcánica submarina de tipo lávica y explosiva.

### Grupo Chañarcillo

El Grupo Chañarcillo es caracterizado por desarrollar facies marinas poco profundas al este y sur de Copiapó. Desde abajo hacia arriba es dividido en las formaciones Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón.

#### *Formación Abundancia (Valanginiano Superior; Biese-Nickel In Hosffsteffer et al., 1957)*

Se presenta como una serie calcáreo-arenosa, de alrededor 200 m, aparece cubierta en concordancia por las calizas de la Formación Nantoco. Su contacto en la base con la Formación Punta del Cobre coincide con una falla intraestratal, denominada: Despegue Punta del Cobre.

La secuencia está formada por calcilitas y grauwakas verdes. En la parte basal y media de la secuencia, presenta intercalaciones de volcarenitas verdes oscuras de grano fino a muy grueso y conglomerados con gradación normal y bases erosivas (Árevalo, 2005; Rieger et al., 2008).

El material fosilífero, compuesto principalmente por ammonites identificados como *Olcostephanus curacoensis* (Weaver), *Olcostephanus copiapoensis* nov. Sp., entre otras, más las especies recolectadas por Mourgues en 2001, *Olcostephanus* (O.), aff. *atherstoni* (Sharpe), *Olcostephanus* (O.) aff. *Densicostatus* (Wegner), *Olcostephanus* (V.) *permolestus* (Leanza) permiten asignar una edad valanginiana superior a esta formación.

Las fangolitas y grauwakas representarían la acumulación de turbiditas volcanoclásticas de grano fino, acompañadas por precipitación carbonatada en ambiente submareal profundo. Las volcarenitas representarían turbiditas de abanico medio.

#### *Formación Nantoco (Hauteriviano; Biese-Nickel In Hosffsteffer et al., 1957)*

Secuencia monótona de calizas grises, cuyo espesor varía entre 600 y 1200 m. (Árevalo, 2005; Rieger et al., 2008). Sobreyace en concordancia a la Formación Abundancia y subyace, de igual modo, a la Formación Totalillo.

Esta formación se divide en dos miembros. El miembro inferior está formado por 600 a 1000 m. de calcilitas y calcilitas limosas, visibles al norte de quebrada Meléndez. Desde este lugar hacia el norte, aparecen facies de areniscas rojas y conglomerados estratificadas. El miembro superior está compuesto por calcilitas negras y calcilitas amarillas, alcanzando un espesor ca. 200 m. Las rocas de esta unidad se encuentran comúnmente plegadas y brechizadas, formando un nivel deformado, el cual es interpretado como un frente de deformación generado durante la propagación de una falla intraestratal de dimensión regional, conocido como Despegue Cerrillos.

La presencia de *Crioceratites* (P.) *andinus* Gerth y *Crioceratites* (C.) *schlagintweiti* (Giovine) y las relaciones con las formaciones sub y suprayacente permiten asignarle una edad hauteriviana.

El ambiente de formación de las calcilitas ha sido interpretado como submareal profundo. Las intercalaciones de arcillas verdes, de grano medio a fino, gradadas en forma normal, que aparecen en la parte media baja de la secuencia corresponderían a turbiditas.

*Formación Totoralillo (Barremiano; Biese-Nickel In Hosffsteffer et al., 1957)*

Secuencia de calcilitas con buena estratificación y colores grises claros a amarillentos. Sobreyace concordantemente a la Formación Nantoco y subyace de igual modo a la Formación Pabellón (Árevalo, 2005; Rieger et al., 2008).

Las calcilitas se organizan en ciclos grano y estrato crecientes, con laminación plana, gradando a calcilitas arenosas con intercalaciones de calcilitas bioclásticas en capas macizas (20-40 cm de espesor) hacia el techo.

Las diferentes especies de ammonites, estudiadas por Tavera (1956), Corvalán (1974), Mourgues (2001) y Arévalo (2005) asignan una edad barremiana a esta formación.

Los ciclos grano y estrato crecientes en que se organiza la formación representan secuencias de profundización desde condiciones intermareales a condiciones submareales.

*Formación Pabellón (Barremiano Superior-Aptiano; Biese-Nickel In Hosffsteffer et al., 1957)*

Secuencia calcárea arenosa con flujos de lava porfídica de 450 a 700 m de espesor, que yace en concordancia sobre la Formación Totoralillo. clastos de oolitas la intruyen. Esta formación representa la última regresión y cierre de la cuenca marina del Cretácico Temprano. (Árevalo, 2005; Rieger et al., 2008)

En la base, se tienen capas intercaladas de fangolitas montmorilloníticas negras ('chert'), luego se tienen calcilitas grises a amarillentas y bioturbadas bien estratificadas. Hacia arriba se intercalan calcarenitas y calciruditas bioclásticas hasta volverse dominantes en el techo. En la sierra Checo de Cobre, las calizas se intercalan con areniscas y conglomerados volcánicos con buena estratificación. Más al norte, las facies clásticas se hacen dominantes sobre las calizas, lo que define una relación de tipo engrane entre estas dos facies de manera que la formación culmina a la altura de la quebrada Paipote, como un solo paquete clástico de areniscas rojas.

Debido a la presencia de restos de *Agria Blumenbachi* Studer, del Barremiano Superior, en capas fosilíferas del techo, en la quebrada Carrizalillo y la posibilidad de que en la parte más baja de la unidad estuviera representado por el Barremiano Inferior, llevo a Corvalán en 1974 asignar una edad barremiana, misma edad asignada por Tavera en 1956, basado en la presencia de hexacorales del tipo *Astrocoenia hexámera Fritzsche*. Ejemplares de ammonites recolectados en la quebrada Meléndez han sido identificados por Corvalán (1974) como *Crioceras* sp., en los niveles inferiores y medios de la formación, y por Pérez et. Al., (2000) como *Crioceratites (Paracrioceras?) verrucosus* (Hupé). Mourgues (2001) encuentra otra especie *Imerites? Domeykanus* (Bayle y Coquand), de edad barremiana superior. Por otro lado, Pérez et al., (1990) detecta en la localidad de Molle Alto la presencia de *Parahoplites gr. Nutfieldiensis* (J. Sowerby),

de edad aptiana superior temprana. Todos los antecedentes anteriores permiten asignar a la Formación Pabellón una edad Barremiano Superior-Aptiano Superior Temprano.

Las facies representadas en la secuencia son de ambiente submareal. La progresión desde facies finas y bien estratificadas de calcilutitas, en la base, a facies de granulometría más gruesa, bioclástica y de mayor espesor, hacia el techo, indicaría una transición desde un ambiente distal a otro más somero o cercano a la línea de olas.

#### *Formación Bandurrias (Hauteriviano-Aptiano Inferior; Segerstrom, 1960)*

Se define como una secuencia volcánica sedimentaria, que contiene intercalaciones de calizas marinas y areniscas. Sobreyace concordantemente a las calizas de la Formación Abundancia y a brechas de la Formación Punta del Cobre y subyace, mediante discordancia de erosión a la Formación Cerrillos (Arévalo, 2005).

La secuencia en la base está compuesta por brechas y conglomerados matriz soportados en la que se intercalan subordinadamente coladas de lavas andesíticas, areniscas de colores gris a rojizos con estratificación gruesa y en, la parte media presenta un horizonte fosilífero lenticular de areniscas y fangolitas rojas. La sección media corresponde a lavas andesíticas rojas, alteradas a actinolita y epidota y metamorfizadas a hornfels silíceos y de biotita. La sección superior está compuesta de areniscas rojas con estratificación plana paralela, cruzada plana y en cuenca con intercalaciones de paraconglomerados bien estratificados y coladas de lava andesíticas subordinadas. Toda la secuencia incluye intercalaciones lenticulares de calizas ferruginosas y fangolitas rojizas.

Trigonias y ammonites en las capas de areniscas y fangolitas rojas, permitieron asignar un rango de edad Valanginiano-Hauteriviano. Morgues en 2004, reevalúa el material fosilífero e identifica *Paraciloceras gr domeykanus*, precisando el rango a Barremiano Superior-Aptiano Inferior. Esto último y la relación concordante de la Formación Bandurrias sobre la Formación Abundancia de edad valanginiana superior permiten asignar, un rango de edad entre Hauteriviano y Aptiano Inferior.

La variedad de asociaciones de facies representadas en esta formación sugiere una compleja paleogeografía dominada por un ambiente continental distal de ríos efímeros en el cual se habrían alternado estadios húmedos en que se habrían desarrollado canales y barras fluviales y periodos secos en que se habrían formado dunas eólicas. Las intercalaciones marinas indican que la paleogeografía fluvial habría sido invadida por episodios marinos muy someros.

### *Formación Cerrillos (Albiano-Turoniano; Segestrom y Parker, 1959)*

Serie clásica continental de alrededor de 4000 m de espesor sobreyace por discordancia de erosión a la Formación Pabellón y al filón manto andesítico (lavas andesíticas según Cisternas, 1999) y subyace en discordancia angular a la Formación Hornitos.

La base de esta unidad está compuesta por areniscas verdes rojizas, de granulometría media a muy gruesa, bien estratificada, con gradación normal e inversa con intercalaciones de paraconglomerados, luego se tienen fangolitas rojas y calizas amarillas con restos fósiles. La secuencia continúa con capas macizas de brecha y conglomerados con gradación inversa y normal con intercalaciones de coladas andesíticas-basálticas, en el sector de quebradas los Cóndores y Carrizalillo.

Debido a la ausencia de fósiles de valor cronoestratigráfico la edad de la unidad se estima por medio de las formaciones que la subyacen y sobreyacen y los intrusivos que la cortan, dando un rango de edad aptiana a turoniana.

Las areniscas basales se interpretan como flujos arenosos densos y flujos de detritos depositados en ambientes de llanuras de inundación. Las fangolitas y calizas amarillas serían un ambiente lacustre y las brechas y conglomerados representarían flujos de detritos formados en condiciones de alta energía. Los estratos de la Formación Cerrillos han sido atribuidos al relleno de una cuenca subsidente asociada a la fase extensional del Cretácico Inferior alto, descrita por Mpodozis y Allmendinger (1993) en la zona de Puquios-sierra de Fraga y extendida hacia el oeste por Arévalo (1995, 1999).

#### **2.3.1.2 Rocas Intrusivas**

##### *Intrusivos Hipabisales dioríticos porfídicos de clinopiroxeno y olivino (Cretácico Inferior alto)*

Intruyen a las formaciones superiores del Grupo Chañarcillo y a la parte alta de la Formación Bandurrias. Son de composición intermedia a básica, geometría tabular y se emplazan concordantemente y constituyen filones mantos individuales y enjambres de filones mantos. El lacolito emplazado en el contacto entre las Formaciones Punta del Cobre y Abundancia, en frente de Tierra Amarilla, también se considera parte de esta unidad.

Se caracterizan petrográficamente por pórfidos microdioríticos de clinopiroxeno y olivino y micrograbros de similar mineralogía. La plagioclasa varía entre andesina y labradorita.

También se incluye en esta unidad un filón manto emplazado en la Formación Pabellón que se extiende, como uno o varios cuerpos paralelos interestratificados en las capas, desde la quebrada Cinchado hasta la quebrada Cachiyuyo por unos 70 km. Microscópicamente es un pórfido con fenocristales tabulares de labradorita (2-15 mm de longitud) en una masa microgranular de microlitos de andesina, clinopiroxenos (augita) y relictos de olivino. Esta litología en la literatura de chilena es denominada ocoita, por rocas de similares características, presentes en el miembro

Ocoa de la Formación Veta Negra, que afloran en la localidad de Ocoa a 100 km al norte de Santiago.

La única datación radiométrica en roca total indica una edad K-Ar de  $77 \pm 3$  Ma (Arévalo, 1994) y se considera mínima. Considerando que la unidad se intercala en la Formación Pabellón, su edad máxima sería la asignada a esa formación, datada en el Barremiano- Aptiano, por lo que se le atribuye una edad Cretácico Inferior alto.

Cisternas et al. (1999) interpreta el filón manto como una sucesión de coladas submarinas, debido a la presencia de intercalaciones de tobas, calizas y chert en los pórfidos dioríticos y la presencia de autobrechas más textura vesicular.

La presencia de lentes o delgados horizontes (10-30 cm de espesor) de calizas marinas entre coladas sucesivas, representan la sedimentación autóctona en la cuenca. Estas en algunos puntos contienen fósiles bentónicos en posición de vida, demostrando así, que se depositaron en un fondo de mar somero. Las calizas contienen fragmentos líticos de lavas, indicando que las coladas estaban sujetas a la acción de corrientes erosivas, siendo los fragmentos de éstas incorporados al fango calcáreo que se depositaba en períodos de relativa calma en la actividad volcánica. Bajo la interpretación de que las rocas de la unidad son intrusivas las características señalas por Cisternas et al. (1999) serían producidas por cuerpos subvolcánicos intruidos en condiciones muy someras y, probablemente, en sedimento húmedo.

### 2.3.1.3 *Depósitos no consolidados*

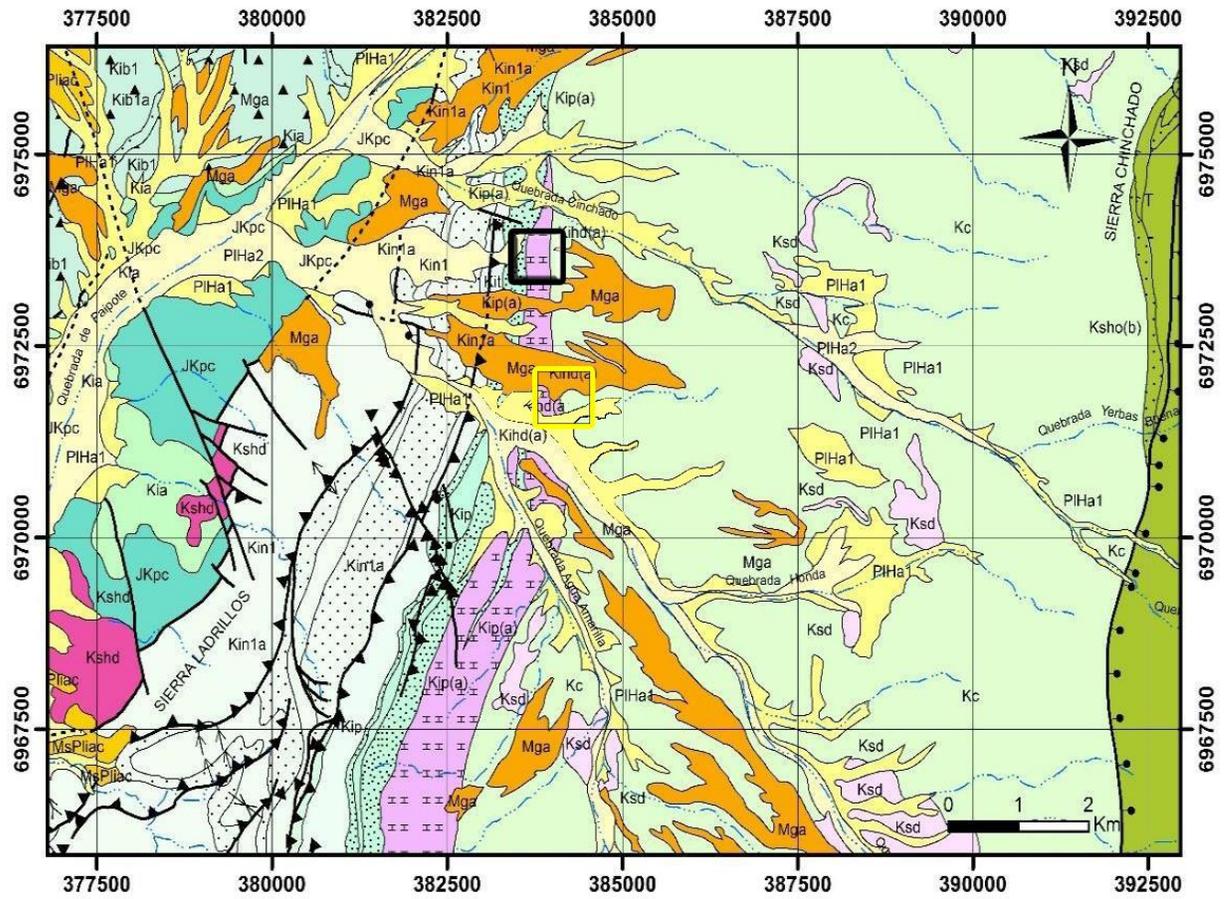
#### *Depósitos Aluviales (Cuaternario)*

Son depósitos no consolidados de ripios, gravas y arenas mal clasificadas, que han sido transportados como flujos gravitacionales y que ocupan laderas de baja pendiente y rellenan quebradas.

La formación de estos depósitos se produce por la acumulación de flujos gravitacionales densos (corrientes de barro y/o flujos de detritos) aguas abajo de zonas más altas, que rellenan cursos aluviales antiguos y forman conos aluviales y mantos extendidos. Los flujos se producirían por episodios pluviales esporádicos, pero de gran intensidad.

Se asigna una edad pleistocena a holocena, ya que erosionan unidades continentales del Mioceno-Plioceno y actualmente se encuentran en actividad.

Los depósitos Manto Cobrizo y La Culebra se encuentran asociados al Grupo Chañarcillo, específicamente al filón manto o lavas ocoítas de la Formación Pabellón.



#### LEYENDA

	PIHa2	Depósitos aluviales activos: rípios, gravas, arenas y limos
	PIHa1	Depósitos aluviales inactivos: rípios, gravas, arenas y limos
	MsPIlac	Depósitos aluviales y coluviales antiguos: rípios a gravillas, arenas, limos y arcillas
	Mga	Gravas de Atacama: gravas polimíticas
	Ksho(b)	Formación Hornitos: areniscas rojas, fangolitas calcáreas y calizas
	Ksho(f)	Formación Hornitos: lavas basálticas y traquibasálticas
	Ksd	Stocks dioríticos de piroxeno, anfíbola y biotita
	Kshd	Intrusivos hipabisales dioríticos de anfíbola y clinopiroxeno: microdioritas, microdioritas porfídicas y dioritas
	Kc	Formación Cerrillos (indiferenciado): areniscas, brechas y conglomerados, intercalados con lavas andesítico - basálticas
	Kihd(a)	Intrusivos hipabisales dioríticos y porfíricos de clinopiroxeno y olivino: pórfido de augita y pseudomorfo de olivino
	Kib1	Formación Bandurrias: brechas y conglomerados con lavas andesíticas y areniscas intercaladas
	Kib1a	Formación Bandurrias: areniscas y fangolita fosilífera
	Kib2	Formación Bandurrias: lavas andesíticas
	Kib3	Formación Bandurrias: areniscas con estratificación cruzada
	Kip	Formación Pabellón (indiferenciado): calcilititas, calcarenitas y calciruditas con intercalaciones de fangolitas, fosilíferas
	Kip(a)	Formación Pabellón: areniscas y conglomerados volcánicos
	Kit	Formación Totoralillo: calcilititas y calcilititas arenosas, fosilíferas
	Kin1	Formación Nantoco (Miembro 1): calcilititas, calcilititas fosilíferas y calcarenitas
	Kin1a	Formación Nantoco: areniscas y conglomerados
	Kin2	Formación Nantoco (Miembro 2): calcilititas y calcarenitas, fosilíferas

**Figura 5:** Mapa Geológico del sector de Quebrada Los Cóndores escala 1:100000. El rectángulo amarillo indica el área aproximada de ubicación de La Culebra y el de color negro el de Manto Cobrizo. Modificado de Arévalo et al por Oetiker, 2016. Extraído de Oetiker 2016.

#### 2.3.1.4 *Estructuras*

El área de Copiapó se divide en dos dominios estructurales, el dominio de la cordillera de la costa y el dominio de la precordillera. Los depósitos Manto Cobrizo y La Culebra se sitúan en el dominio de la precordillera, el cual se tratará a continuación.

#### **Dominio de la Precordillera**

Las estructuras más antiguas están representadas por fallas normales de bajo y de alto ángulo en el valle del río Copiapó, al sur de Paipote. En ambos flancos del valle una falla frágil de bajo ángulo (Despegue Punta del Cobre) despega parcialmente la Formación Punta del Cobre de la suprayacente Formación Nantoco. En el bloque colgante de esta, se encuentran fallas listricas normales que convergen en profundidad con la falla principal, esto junto a otras estructuras indican que esta falla actuó como falla extensional durante su movimiento.

Al oeste del valle del río Copiapó se encuentra la Zona de Cizalle Ojancos-La Florida, de carácter extensional, se encuentra como una franja de rocas miloníticas, de manto moderado (50-60°) al sureste, en el borde suroriental del Plutón monzodiorítico San Gregorio.

Al noreste de Copiapó en la Zona de Sierra Fraga se encuentran fallas normales de alto y bajo ángulo que se relacionan con la apertura de la Cuenca Marginal Abortada de Chile central (Mpodozis y Allmendinger, 1993; Levi y Aguirre, 1981)

La Faja Plegada y Corrida de Paipote es un sistema de flor positiva localizado en la Falla Paipote que retrabaja la Zona de Cizalle Ojancos-La Florida, desplaza y deforma las secuencias cretácicas, a lo largo de la quebrada de Paipote y del valle del río Copiapó. La propagación hacia el este de la Falla Paipote habría generado retrocorrimiento intraestratal, formándose el despegue Cerrillos.

El anticlinal que afecta a las rocas del Grupo Chañarcillo a la altura del pueblo de Tierra Amarilla ('Anticlinorio de Tierra Amarilla'; Segerstrom, 1968), el periclinal de la sierra Partida y el anticlinal de la sierra del Medanos, se disponen como un alineamiento NNE de estructuras en échelon, que coincide con el límite entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera. Esta megaestructura se habría formado durante un episodio de transpresión sinistral, en el Cretácico Superior temprano (93-80 Ma; Arévalo y Grocott, 1997; Arévalo, 1999), que coincide con la fase peruana de deformación (Coira et al., 1982).

## 2.3.2 Área Quillota

En la Región de Valparaíso a la latitud donde se sitúa el depósito El Soldado, las Formaciones presentes son Horqueta, Lo Prado y Veta Negra. Su distribución se aprecia en la **Figura 6**.

### 2.3.2.1 Rocas estratificadas

#### *Formación Horqueta (Jurásico Medio- Superior; Piraces, 1976)*

Secuencia volcánica continental que consta de lavas y depósitos piroclásticos ácidos a intermedios. Yace concordantemente sobre la Formación Cerro Calera y subyace en discordancia con el miembro inferior de la Formación Lo Prado (Rivano, et al., 1993).

Esta formación corresponde a una alternancia de lavas andesítico-basálticas y niveles de brechas volcánicas y tobas riolíticas con intercalaciones de rocas sedimentarias detríticas.

La litología predominante corresponde a lavas de color pardo oscuro a pardo rojizo de textura porfírica a vitrofídica con fenocristales (30 a 35%) de plagioclasa y piroxeno. (Sepúlveda, 1988).

Las brechas volcánicas son de un color violáceo a rojizo y presentan acuñamiento lateral. Su composición varía desde brechas andesíticas a riolítico-dacíticas con clastos de pómez, riolitas y las más máficas presentan clastos andesíticos.

Las tobas son de colores gris a pardo rojizo, con masa fundamental vítrea intersertal y parcialmente desvitrificada y alterada a clorita, epidota y arcilla.

Las intercalaciones sedimentarias corresponden a areniscas, areniscas conglomerádicas y conglomerados rojos con algunos niveles limolíticos; los clastos son predominantemente volcánicos con redondeamiento y esfericidad regular a buena y con tamaños de hasta 10 cm; la matriz de los conglomerados es arenosa a limolítica con cemento hematítico y/o calcáreo. En los niveles de arenisca o limolitas se ven estructuras de desecación, improntas de gotas y laminación fina.

El espesor de la unidad varía entre 1200 a 2000 m. (Piraces, 1976).

La edad de la formación se define por la posición estratigráfica respecto a las unidades infra y suprayacente, lo que le da una edad Jurásica Media-Superior.

La formación fue depositada en un ambiente continental a lagunar, dominado por un fuerte volcanismo efusivo-explosivo de carácter calcoalcalino a toleítico (Cancino, 1992).

*Formación Lo Prado (Neocomiano; Thomas en 1958)*

Consta de lavas andesíticas y brechas volcánicas e intercalaciones de niveles sedimentarios marinos con fósiles. Sobreyace concordante a la Formación Horqueta y subyace del mismo modo a la Formación Veta Negra (Rivano, et al., 1993).

Las rocas sedimentarias de la formación corresponden a calcilitas negras, fértidas fosilíferas intercaladas con niveles macizos de calcarenitas grises. En algunos sectores hay intercalaciones volcánicas de andesitas afáníticas y porfíricas, a veces ocoíticas con niveles superiores de las coladas brechosas que tienen intercalaciones de tobas de color rojizo. En el sector del Soldado, el nivel volcánico varía a traquitas. El espesor de la formación se estima en 3000 m.

El material fosilífero correspondiente a *Spiticeras (Kilianiceras) sp.*, *Olcostephanus sp.*, y *Thurmanniceras duraznensis* dan una edad Berriasiano a Valanginiano Superior.

La Formación Lo Prado representa un periodo de extenso volcanismo calcoalcalino. Los sedimentos indican un ambiente marino somero (sublitoral).

*Formación Veta Negra (Barremiano-Albiano; Thomas, 1958; Piraces y Maksaev, 1977)*

La Formación Veta Negra (Barremiano-Albiano), se divide en dos miembros: Purehue y Ocoa. Esta unidad sobreyace concordantemente a la Formación Lo Prado y subyace del mismo modo a la Formación las Chilcas. El contacto entre ambas es gradual.

El miembro Purehue consiste en lavas andesíticas y brechas, con intercalaciones calcáreas hacia la base, estas corresponden a areniscas, conglomerados y brechas. Mientras que el miembro Ocoa es una secuencia de lavas porfíricas andesíticas, que se caracteriza por una textura porfírica gruesa con fenocristales de plagioclasas a veces mayor a 2 cm de largo y masa fundamental microcristalina, a esto se le denomina ocoítas, con intercalaciones de volcarenitas. (Rivano, et al., 1993)

El espesor total de la unidad se estima entre 4000 a 5000 m. El espesor de miembro Purehue varía entre 350 a 2000 m. Mientras que el del miembro Ocoa va de 2500 a 3000 m.

No existe material fosilífero de valor cronoestratigráfico. Existen dataciones radiométricas en rocas del miembro Ocoa, resultando en edades K-Ar entre  $94 \pm 2$  y  $115 \pm$  Ma, lo que la sitúa en el Hauteriviano Superior-Barremiano, esto correspondería a una edad mínima. Se le asigna una edad Barreamiana-Albiana de acuerdo con las relaciones litoestratigráficas de esta respecto a las formaciones sub y sobreyacente.

La Formación Veta negra se interpreta como un ambiente volcánico subáreo.

*Formación Las Chilcas (Barrremiano-Turoniano; Thomas, 1958; Piraces y Maksaev, 1977)*

La Formación Las Chilcas es una secuencia volcanoclástica que subyace en discordancia angular a la Formación Salamanca y sobreyace de modo concordante a la Formación Veta Negra.

La Formación Las Chilcas presenta un característico color rojizo a pardo y una litología variable.

La base es un nivel volcánico con secuencias clásticas y tobáceas con intercalaciones de niveles calcáreos, consistentes en areniscas calcáreas y calcilutitas grises a negras, a veces margosas con estructuras estromatolíticas. En la parte superior de la unidad dominan rocas volcánicas de carácter andesítico con intercalaciones de volcarenitas y tobas.

El espesor estimado de la unidad varía entre 1500 a 3500 m.

El hallazgo de microfósiles en el sector de las calizas de Polpaico (Gallegos, 1994) y la relación estratigráfica respecto a las unidades sub y sobreyacente, permiten asignar una edad Cretácica Inferior a esta unidad.

La formación se habría depositado en un ambiente subáreo continental con episodios de influjos de ambiente marino costero somero (ambiente de llanura aluvial a plataforma somera), delante de un frente volcánico, que aporta lavas y material piroclástico, que correspondería a una etapa terminal del volcanismo del cretácico inferior.

El depósito El Soldado es hospedado por una secuencia félsica y basáltica que manta 30° al este perteneciente a la Formación Lo Prado. (Boric, et al., 2002).

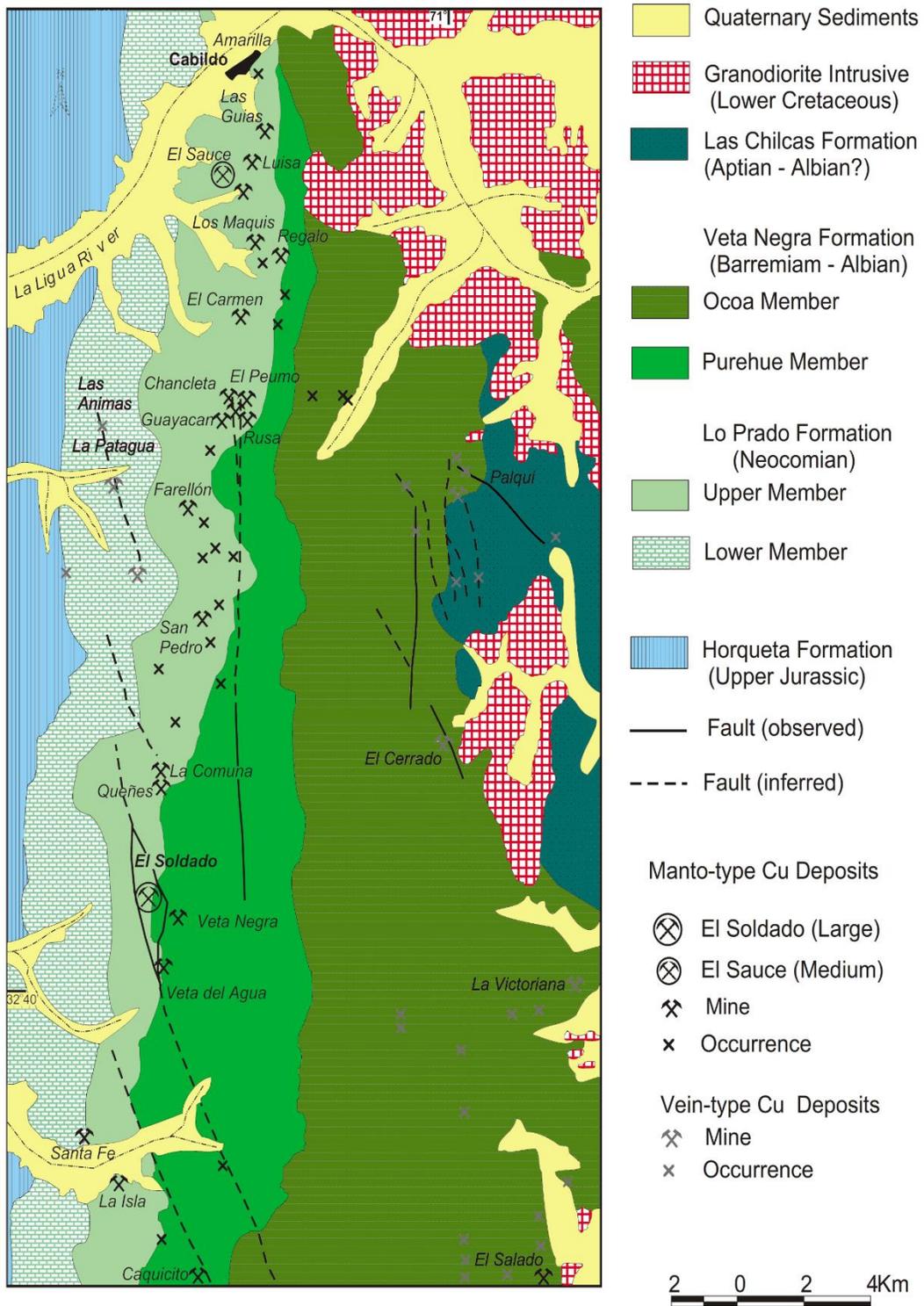
### **2.3.2.2 Rocas Intrusivas**

#### *Unidad Chalinga*

Presenta una amplia gama de rocas que van de dioritas a sienogranitos, con facies granodioríticas a tonalíticas predominantes y en menor proporción facies monzonitas y monzodioritas cuarcíferas.

Según la petrografía corresponden a granodioritas de hornblenda y biotita y monzodioritas cuarcíferas con textura hipidiomórfica inequigranular y a veces porfídica.

La edad de la unidad se asigna, acorde a una serie de dataciones radiométricas K/ Ar que indican una edad Cretácica Inferior a Cretácica Superior basal.



**Figura 6:** Mapa esquemático de la configuración geológica regional del yacimiento El Soldado, Región de Valparaíso. Extraído de Boric, et al. (2002)

### 2.3.2.3 *Depósitos no consolidados*

#### *Sedimentos aluviales y coluviales, depósitos de relleno de valles*

Se relacionan a cursos de aguas actuales y se asocian principalmente a la hoyada del río Aconcagua. En la zona sur están formados por acumulaciones de gravas y ripios, regular a mal estratificados, y por arenas y limos, con buena estratificación, se trata en la mayoría de los casos de sedimentos efímeros, especialmente los depósitos de valle y conos de deyección, los que varían año a año, ligado a las precipitaciones.

#### *Formación Confluencia (Rivano y Sepulveda, 1991)*

Aflora en los valles de La Ligua, Catapilco, Limache y Valle del río Aconcagua. Secuencia de gravas y ripios con intercalaciones de arenas poco consolidadas que se distribuyen en terrazas altas y con potencias de 50 a 100 m. Estos sedimentos se depositaron discordantemente sobre las unidades de rocas jurásicas y paleozoicas que afloran en la costa y engranan lateralmente con la Formación Caleta Horcón.

### 2.3.2.4 *Estructuras*

El área de Santiago se divide en tres dominios estructurales, dominio costero, dominio central y dominio cordillera. El depósito El Soldado se encuentra en el dominio central, el que se trata a continuación.

#### **Dominio Central**

Corresponde al borde oriental de la cordillera de la costa y a la mediana montaña. Geológicamente su borde occidental es la discordancia entre la Formación Horqueta y la Formación Lo Prado. El límite oriental corresponde a la megafalla Pocuro.

Este dominio presenta una deformación suave y limitada a pliegues que afectan las rocas volcanoclásticas.

Se destaca una serie de monoclinales hacia el este, en la parte occidental del dominio, mientras que la parte oriental se tienen relieves subhorizontales.

Las estructuras más importantes del dominio son el Pilar de Panquehue, que corresponde a un bloque del batolito de Panquehue alzado por compresión y limitado por fallas inversas de alto ángulo, La Falla del Carbón, por el oeste y la falla La Giganta por el este, con dirección NNW-SSE

El Soldado se encuentra dentro de un sistema de fallas de extensión, subverticales a verticales que presentan una orientación NS-NNW que destaca a nivel regional, del cual forma parte la Megafalla Pocuro.

La Megafalla Pocuro separa el dominio central del cordillerano, su traza se puede apreciar desde los 31° a los 34°. Es una falla extensiva con componente de rumbo.

### **3 ANTECEDENTES GENERALES DE LOS DEPÓSITOS ESTRATOLIGADOS DE COBRE DE CHILE**

Esta sección pretende recopilar, a modo resumen, los estudios de Maksaev & Zentilli (2002), Kojima (2009), y Zentilli et al (1997) sobre los depósitos estratoligados en Chile. Primero se tratarán aspectos generales, para luego dar pie a la ocurrencia de bitumen en estos depósitos.

#### **3.1 Generalidades**

Los depósitos estratoligados ocurren a lo largo de la Cordillera de la Costa y son hospedados por rocas volcánicas y volcano-sedimentarias del Jurásico y del Cretácico Inferior (**Figura 7**). Conforman dos grupos significativos: i) secuencias volcánicas del Jurásico que se localizan entre los 22° y 26° latitud S y ii) secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias del Cretácico Inferior, que van desde los 30° a los 34° latitud S, formados en cuenca intracontinental de trasarco (Maksaev y Zentilli, 2002).

Kojima et al., (2009) divide los depósitos estratoligados en cinco áreas geográficas: Arica-Iquique, Tocopilla-Taltal, Copiapó, La Serena y finalmente Santiago. Las dos primeras áreas, corresponden al primer grupo descrito por Maksaev y Zentilli (2002), mientras que el resto y corresponden al segundo grupo.

La mineralización corresponde a sulfuros de cobre, siendo los principales calcosina y bornita con menor cantidad de calcopirita, covelina y digenita. La ganga corresponde a cuarzo, hematita, pirita, clorita y calcita. El modo de ocurrencia de la mineralización puede ser diseminada, rellenando amígdalas, en stockworks o vetillas. Su estilo de mineralización es diverso, este puede ser irregular, tabular, estratiforme (manto), chimeneas de brecha, lentes, vetas o una combinación de estas (Espinoza et al.,1996; Maksaev y Zentilli, 2002).

#### **3.2 Modelos genéticos de los depósitos estratoligados**

El origen de los depósitos estratoligados aún es objeto de estudio, aunque se tiene consenso en que son de origen epigenético. Sin embargo, existen distintas posturas al respecto, donde destacan: i) origen hidrotermal asociado a intrusivos volcánicos, donde los fluidos provienen de una fuente magmática profunda (Palacios 1990; Vivallo y Henríquez, 1998; Maksaev y Zentilli, 2002) y ii) fluidos de diverso origen que lixivian roca caja y se movilizan por calor de intrusivos (Losert, 1973; Sato, 1984; Kojima 2009; Carrillo-Rosúa et al.,2014)

### 3.3 Bitumen en depósitos estratoligados

Materia orgánica, bajo la forma de bitumen y/o pirobitumen se reporta principalmente en depósitos de edad cretácica, los cuales serán tratados en la presente sección.

#### 3.3.1 Bitumen

El término materia orgánica es muy amplio, ya que incluye todos los materiales enriquecidos en carbono con enlaces carbono-hidrógeno, por lo cual es necesario adoptar una clasificación. En este estudio el esquema utilizado será el basado en la solubilidad en agua o en solventes orgánicos. Ésta se detalla en la **Tabla 2**.

**Tabla 2:** Categorías de materia orgánica basada en características de solubilidad. Extraído de Leventhal y Giordano 2000

<b>Tipo de Materia orgánica</b>	<b>Definición</b>
<b>Ácido Húmico</b>	Soluble en agua alcalina y soluciones ácidas
<b>Ácido Fúlvico</b>	Insoluble en soluciones acuosas
<b>Querógeno</b>	Insoluble en solvente orgánicos
<b>Bitumen</b>	Derivado desde el querógeno y soluble en solventes orgánicos
<b>Pirobitumen</b>	Derivado desde el querógeno y bitumen e insoluble en solvente orgánicos

De acuerdo con lo anterior el bitumen se define como materia orgánica derivada del querógeno, que se disuelve en un solvente orgánico (Leventhal y Giordano, 2000; Kelemen ,2010). Se dice bitumen primario a aquel que es extraíble directamente desde una roca fuente, mientras que el secundario es aquel que ha migrado y es extraíble desde estratos que lo alojan o rocas hospedantes, también se le denomina migrabitumen. (Cisternas & Hermosilla,2006; Kelemen 2010).

El bitumen consiste en una mezcla de hidrocarburos de distintos pesos moleculares, con diferentes elementos como azufre, nitrógeno y oxígeno, así como elementos trazas como vanadio y níquel. La verdadera naturaleza del bitumen no es completamente conocida. La mayoría de las publicaciones sostienen que el bitumen es una dispersión coloidal de asfaltenos en maltenos. (Kelemen, 2010)

El precursor del bitumen es el querógeno, al igual que del petróleo y gas natural, éstos son formados como resultado de enterramiento y calentamiento durante una etapa conocida como catagénesis (Leventhal y Giordano, 2000).

El bitumen sólido es materia orgánica alóctona que fue petróleo líquido que migró desde su roca de origen y ahora son sólidos a condiciones superficiales o subsuperficiales. (Kelemen, 2010)

A diferencia de otros materiales orgánicos el bitumen se asocia tanto a mineralización singenética como epigenética, por lo que es necesario determinar su origen para dilucidar cuál es su rol en la formación de depósitos de metales (Leventhal y Giordano, 2000).

Los roles en los que se puede involucrar la materia orgánica son: movilización, transporte, concentración, reducción, oxidación y preservación (véase **Tabla 1**), en estos su rol puede ser activo o inactivo durante la mineralización.

En los yacimientos estratoligados de cobre del centro y norte de Chile la materia orgánica presente corresponde a hidrocarburos sólidos: bitumen y pirobitumen. Estudios de éstos en la formación de depósitos estratoligados de Cu-(Ag) asignan un rol como agente reductor, participando en la precipitación de metales (Cisternas y Hermosilla, 2006).

### **3.3.2 Ocurrencia de bitumen en depósitos estratoligados**

La presencia de materia orgánica se encuentra en depósitos de edad cretácica, los cuales se localizan entre la III Región de Atacama y la XIII Región Metropolitana.

A continuación, se cita la bibliografía de depósitos estratoligados Cu-(Ag) con registro de materia orgánica y se resumen los estudios llevados a cabo en algunos de ellos y sus resultados. Los depósitos con presencia de materia orgánica se pueden visualizar en la **Figura 7**.

#### **3.3.2.1 Bitumen en la III Región de Atacama**

Al norte de Copiapó y cercano a los depósitos Altamira y las Luces se encuentra la mina Lorena, la cual presenta bitumen asociado a sulfuros de cobre, en amígdalas y vetillas (Herazo, *comunicación personal*, 2017).

En el sector de Quebrada Cinchado y Quebrada los Cóndores en las cercanías de Copiapó se tienen una serie de estratoligados de tonelaje menor a 100000 toneladas, con leyes que oscilan entre los 1,5% a 5,1%, estos corresponden a: Manto Gloria - Chinchas, San Pedro, María Luisa, San José, San Vicente, Manto Freire, Manto Cobrizo y La Culebra, pertenecientes al denominado Metalotecto Ocoita Pabellón (Cisternas, 1994). Una serie de estudios se han llevado a cabo en el área, donde el bitumen, hospedado en andesitas, se encuentra como una masa irregular con grietas de contracción o globular, este es previo a la mineralización de cobre y en algunos sectores presenta evidencia de grafitización. Al igual que en Lorena se encuentra en amígdalas y vetillas. La mineralización de cobre corresponde a bornita, pirita, calcopirita, tetraedrita, calcosina, covelina (Hermosilla y Cisternas 2000; Haggan et al., 2003, Cisternas y Hermosilla, 2006)

### **3.3.2.2 Bitumen en la IV Región de Coquimbo**

Los estratoligados de Cu-(Ag) con bitumen se asocian a dos zonas en particular: Talcuna, y Uchumi. Los depósitos presentes en distrito Talcuna han sido estudiadas de modo individual por Cucurella (2005), estas corresponden a Mina 21 de mayo y mina Nivel 2001. Materia orgánica también ha sido reportada en depósitos estratoligados de edad terciaria, estos corresponden a: Jardín y Elisa de Bordos (Jurgeit y Fontboté, 1990; Mayer y Fontboté, 1990)

#### *Distrito Talcuna*

Se encuentra a 35 km al este de La Serena. Los depósitos son alojados por la Formación Quebrada Marquesa, de edad Barremiano Superior a Albiano, corresponde a flujos de lavas con intercalaciones volcanoclásticas y evaporitas, (Carrillo-Rosúa, et al. 2014). La mineralización se encuentra en los miembros Manto Talcuna y Manto Delirio, que corresponden a arenisca con toba de lapilli y andesitas, respectivamente. La mineralización ocurre relleno de poros y en vetillas de andesitas. Los principales minerales son calcopirita y bornita con menor cantidad de calcosina, esfalerita, galena y pirita. La ganga es calcita, clorita, hematita. La mineralogía de alteración consiste en calcita, baritina, albita, ceolitas, epidota, prehnita, clorita, sericita y arcillas. El bitumen se encuentra como la capa más externa de vetillas crustiformes y diseminado, relaciones de corte indican que es previo a sulfuros de Cu. (Zentilli et al. 1997, Wilson & Zentilli, 2006).

En las Minas 21 de Mayo y Nivel 2001 el bitumen se encuentra asociado a sulfuros de cobre en vetas bandeadas y brechas hidrotermales, entrecrecido con calcita, baritina y zeolitas y en sectores estériles se encuentra en la intersección de diques y vetas, en las paredes de las fallas, y relleno de vetillas (Cucurella, 2005).

Carrillo-Rosúa et al. (2014) distingue en depósitos al este de La Serena, dos asociaciones minerales, la primera correspondiente a bornita-djurleita y la segunda la denomina polimetálica. El pirobitumen de acuerdo con las relaciones de corte, se emplaza posterior a la primera asociación de mena.

#### *Distrito Uchumi*

Se encuentra en el Valle del Elqui, en Quebrada Uchumi. La mineralización ocurre diseminada en conglomerado arcoso, corresponde a bornita-calcosina. El bitumen se encuentra asociado a esos sulfuros y relleno de la porosidad primaria de las rocas clásticas. (Zentilli et al., 1997; Wilson y Zentilli, 2006)

### **3.3.2.3 Bitumen en la V Región de Valparaíso**

La quinta región presenta una serie de depósitos del tipo estratoligados, entre ellos mina El Soldado, que es el estratoligado de mayor tonelaje. Sin embargo, la presencia de materia orgánica se encuentra documentada solo en un par de ellos

### *Cerro Negro*

Se encuentra 20 km al este del yacimiento de El Soldado, y es hospedado por la Formación Las Chilcas. La mineralización rellena porosidad primaria de areniscas y brecha volcánica (Brecha Diablo). La mineralogía se encuentra diseminada en la matriz de la brecha, alcanza 2 a 3 metros de potencia y consiste en bornita, calcosina, calcopirita y en menor cantidad pirita, hematita, magnetita, galena y esfalerita. La alteración incluye clorita, calcita, prehnita y pumpellyíta. (Zentilli et al. 1997).

### *Mantos de Catemu*

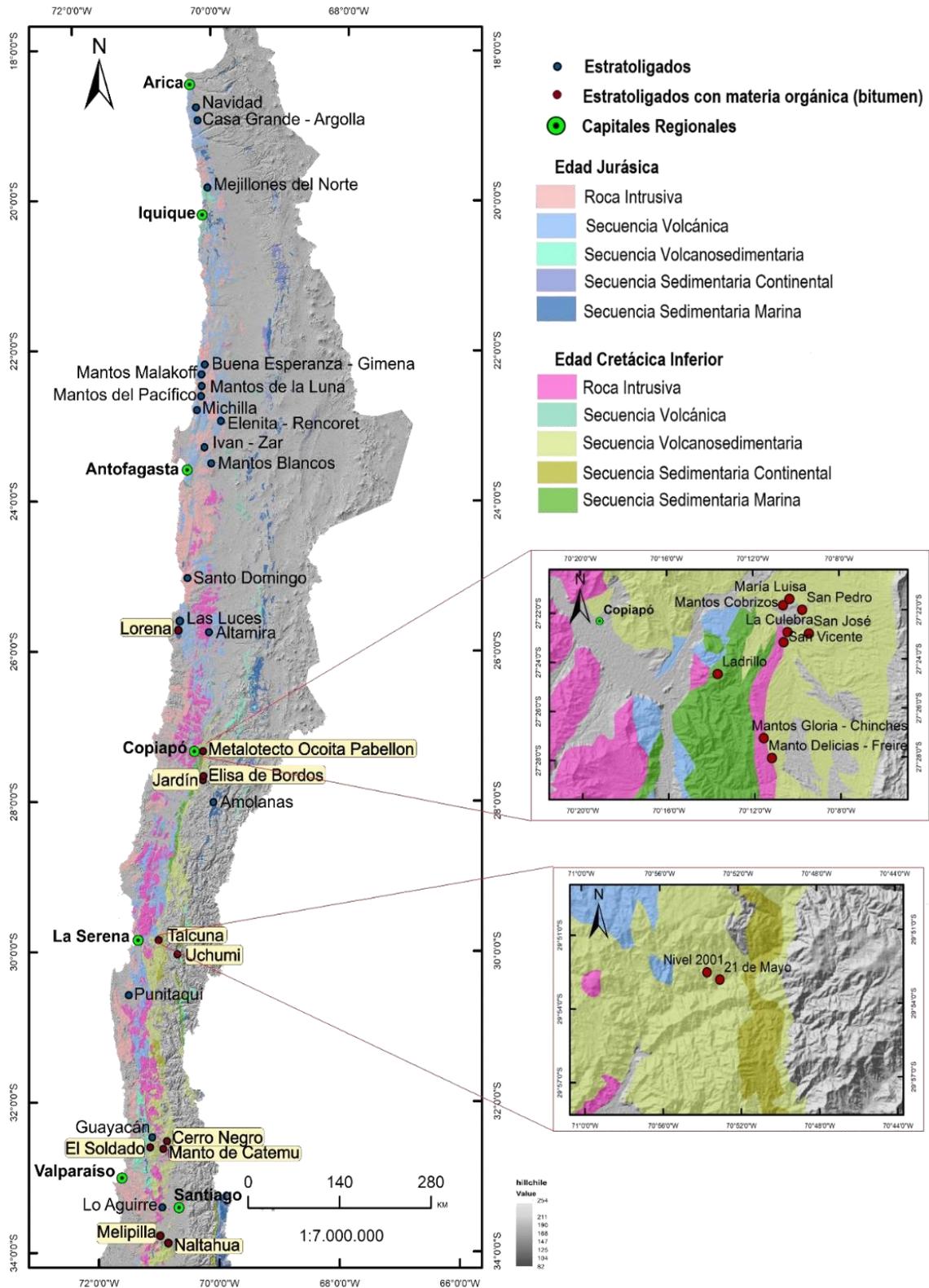
Al igual que Cerro Negro, este es hospedado por la formación Las Chilcas. La mineralización ocurre lentes estratiformes, en vetillas, y diseminadas.

#### **3.3.2.4 Bitumen en la XIII Región Metropolitana de Santiago**

En la Región Metropolitana se encuentran varios depósitos del tipo estratoligado de Cu-(Ag). Sin embargo, materia orgánica de tipo bitumen/pirobitumen solo se ha reportado en el Distrito Melipilla-Naltahua, por estudios realizados por Carrillo-Rosúa et al. (2014).

Las Formaciones involucradas en estos distritos corresponden a Lo Prado y Veta Negra, las mismas en donde se encuentra mina El Soldado. En Melipilla la mineralización se hospeda en andesitas y secuencias carbonáticas del miembro superior de la Formación Lo Prado. Naltahua consiste en pequeños depósitos hospedados también por el miembro superior de la Formación Lo Prado (Carrillo-Rosúa et al, 2014).

La mineralización ocurre en cuerpos discontinuos, irregulares o tabulares, los sulfuros dominantes corresponden a bornita, calcopirita y pirita y en menor cantidad tenantita, esfalerita, arsenopirita, galena, estos minerales pueden ser agrupados en dos asociaciones: la primera correspondiente a bornita-djurleita y la segunda a una asociación polimetálica. El pirobitumen usualmente forma texturas glóbulos y esferoidales, y a diferencia de otros depósitos, éste se emplaza entre ambas asociaciones de mena y la segunda asociación lo corta (Carrillo-Rosúa et al, 2014).



**Figura 7:** Distribución de los depósitos estratoligados Cu-Ag de edad Jurásica y Cretácica. Destacados en fondo de color amarillo se encuentran depósitos con materia orgánica. Modificado de Maksaev y Zentilli, (2002) y Kojima et al. (2009).

## 4 MUESTRAS Y MÉTODOS ANALÍTICOS

### 4.1 Muestras

Las muestras utilizadas corresponden a 50 cortes transparentes pulidos, de las cuales 16 provienen de muestras de sondajes realizados en el cuerpo de mena denominado Filo en la mina El Soldado. Los restantes se obtuvieron de muestras recolectadas de centros de acopio, 17 de la mina La Culebra y 17 desde la mina Manto Cobrizo.

El detalle de los cortes transparentes pulidos utilizados y los distintos análisis se resumen en la **Tabla 3**.

**Tabla 3:** Código de muestras, depósito al que pertenece y tipo de análisis realizados, petrografía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). ESL=El Soldado. MTCUL= La Culebra. MTC= Mantos Cobrizos

Muestra	Depósito	Petrografía	SEM	Muestra	Depósito	Petrografía	SEM
NW08	ESL	X	X	MTCUL2A-g	MTCUL	X	
NW27	ESL	X		MTCUL2C-d	MTCUL	X	
NW29	ESL	X	X	MTCUL2C-g	MTCUL	X	X
NW39	ESL	X	X	MTCUL2D-d	MTCUL	X	X
NW43	ESL	X		MTCUL2D-g	MTCUL	X	
NW46-1	ESL	X	X	MTCUL3A-d	MTCUL	X	
NW120	ESL	X	X	MTCUL3A-g	MTCUL	X	
NW121	ESL	X	X	MTCUL3B-d	MTCUL	X	X
NW122	ESL	X		MTCUL11D	MTCUL	X	X
NW137	ESL	X	X	MTC8-d	MTC	X	
NW140-3	ESL	X		MTC1B-d	MTC	X	
NW152	ESL	X		MTC1B-g	MTC	X	X
NW155	ESL	X		MTC7A-d	MTC	X	
NW157	ESL	X		MTC7A-g	MTC	X	X
NW50-2	ESL	X		MTC7C-g	MTC	X	
NW24	ESL	X		MTC9-d	MTC	X	
MZ-4-91	ESL	X	X	MTC10-d	MTC	X	
MTCUL1A-d	MTCUL	X		MTC10-g	MTC	X	
MTCUL1A-g	MTCUL	X	X	MTC11B-d	MTC	X	
MTCUL1B-d	MTCUL	X		MTC12-d	MTC	X	
MTCUL1B-g	MTCUL	X		MTC13-d	MTC	X	
MTCUL1C-d	MTCUL	X		MTC15C-d	MTC	X	
MTCUL1D-d	MTCUL	X		MTC16B-d	MTC	X	
MTCUL1D-g	MTCUL	X		MTC17A1-d	MTC	X	
MTCUL2A-d	MTCUL	X		MTC17A2-d	MTC	X	X
				MTC17A2-g	MTC	X	X

## 4.2 Microscopía Óptica

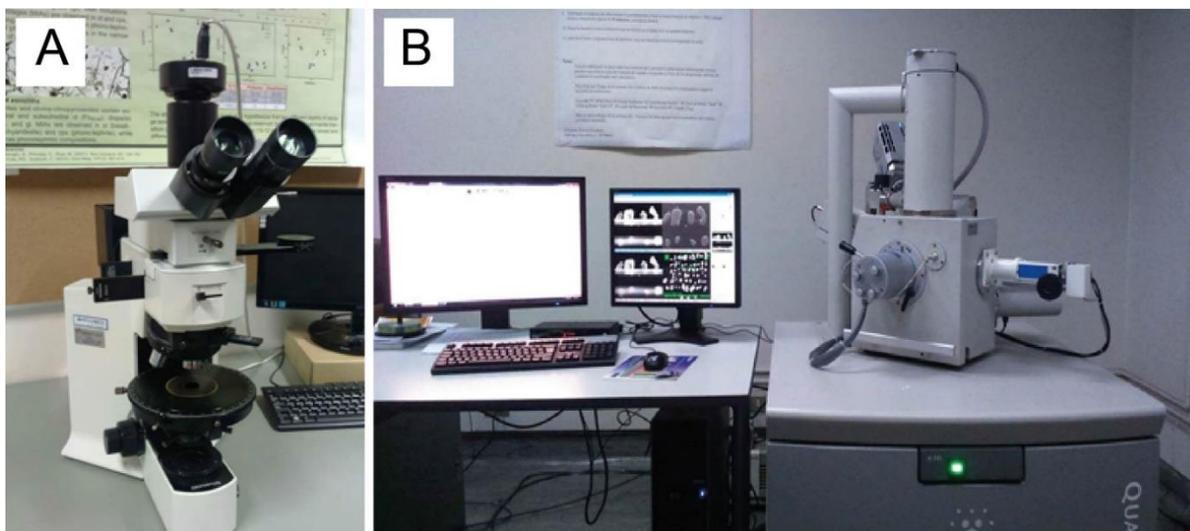
En primera instancia se realizó una caracterización microscópica mediante técnicas petrográficas, que permitió identificar el bitumen, los distintos minerales presentes, las diferentes texturas y las asociaciones paragenéticas, estableciendo las zonas de interés para análisis de detalle en la siguiente etapa. Para ello se utilizó un microscopio óptico, modelo Olympus CX31P (**Figura 8A**) en el Laboratorio de Microscopía del Centro de Excelencia de Geotermia de los Andes (CEGA), en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

## 4.3 Microscopia electrónica de barrido

Se realizaron observaciones y análisis de composición mineral química semicuantitativa y mapas elementales, a 17 muestras -elegidas entre las 50 anteriores- mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca FEI, modelo Quanta 250 (**Figura 8B**), ubicado en el Laboratorio de Microscopia Electrónica y Microanálisis, perteneciente al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) en el Departamento de Geología, Universidad de Chile. El SEM cuenta con detectores de electrones secundarios (SE), electrones retrodispersados (BSE), catodoluminiscencia (CL) y un detector de dispersión de energía de rayos X (EDS).

Se usó un voltaje entre 15 y 20 kV, una intensidad de corriente de 80uA y el haz incidente entre 4.5 y 6 (en escala nominal de 1 a 10). Se realizaron análisis de pruebas usando bajo vacío, sin metalizar y con bajo voltaje, pero debido al alto ruido de los espectros obtenidos, se optó por trabajar en alto vacío y usar una cinta de cobre. Por último, para obtener fotomicrografías y mapas de mayor resolución se optó por metalizar algunos cortes transparentes pulidos con un recubrimiento de carbono.

Los resultados obtenidos son semi-cuantitativos y se presentan en porcentaje peso wt%.



**Figura 8:** (a) Microscopio Óptico modelo Olympus CX31P. (b) Microscopio electrónico de barrido marca FEI, modelos Quanta 250.

## 5 RESULTADOS

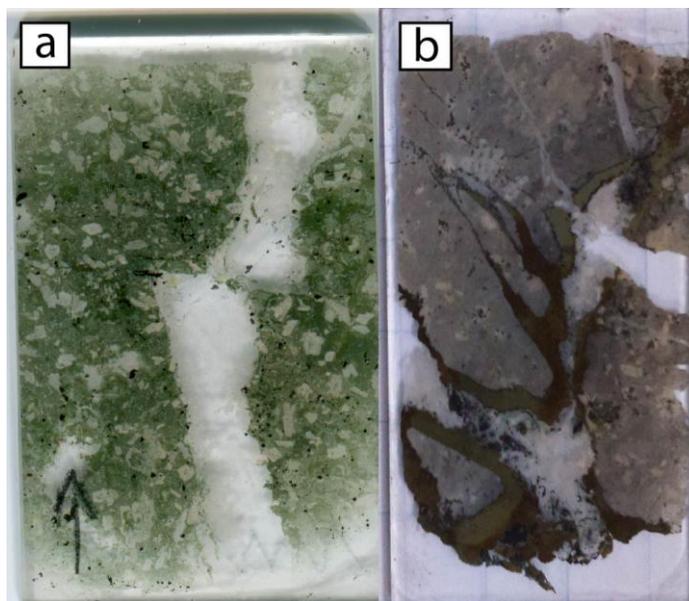
### 5.1 Análisis Petrográfico

Esta sección presenta un resumen de las descripciones microscópicas de los cortes transparentes-pulidos. Se describen las principales ocurrencias minerales y de materia orgánica sólida (bitumen), las asociaciones de alteración y mineralización y sus relaciones texturales. La descripción detallada de cada muestra estudiada se presenta en la **Tabla 1** del anexo A

#### 5.1.1 El Soldado

El Soldado es el estratoligado más grande de la franja Cretácica, sus reservas identificadas (producción histórica más reserva) comprenden sobre 200 millones de toneladas de 1.35% Cu. Las operaciones de esta mina constan de un rajo abierto y faena subterránea, una planta concentradora de flotación de sulfuros y una planta de lixiviación (Boric et al, 2002; Quiroga 2013).

Se describieron 16 cortes provenientes de la zona denominada Filo del depósito. Estos corresponden a andesitas, andesitas verdes (**Figura 9A**) y riolitas (**Figura 9B**) que presentan diversos grados de alteración y brechización y se distribuyen en distintas áreas y profundidades del cuerpo de mena.



**Figura 9:** Cortes transparentes pulidos de las rocas observadas en EL Soldado (a) Andesitas verdes. (b) Riolitas.

La mineralización corresponde a sulfuros de cobre, representados principalmente por bornita y calcopirita, en menor grado se encuentra calcosina, djurleita, digenita y covelina. También se encuentra esfalerita.

Los minerales de alteración corresponden principalmente a pirita, calcita y clorita. En menor cantidad se encuentra albita, sericita, epidota, cuarzo, clorita-esmectita los que representan diversos tipos de alteración que se detallan en el siguiente párrafo.

Los episodios o eventos de alteración están representados por albitización de plagioclasas, alteración sericítica y los minerales: clorita, clorita-esmectita, calcita, epidota, cuarzo, los que pueden estar relleno de amígdalas, vetillas, a veces asociados con sulfuros y/o bitumen y pueden asociarse a alteración o metamorfismo de muy bajo grado de facies de prehnita-pumpellyíta. A pesar de que, en general los minerales presentes en amígdalas se consideran como de origen metamórfico, esto es difícil de distinguir y es probable que exista sobreposición de eventos hidrotermales (Losert 1973; Sato 1984).

#### 5.1.1.1 *Bitumen*

Se presenta de color gris claro, anhedral, anguloso o redondeado y agrietado, de tamaño variable, llegando algunos fragmentos a medir 0,5 mm. Se encuentra como relleno de amígdalas (**Figura 10A**) o diseminado en vetillas de calcita o calcita-clorita (**Figura 10B**). Rara vez se encuentra diseminado en masa fundamental. En amígdalas suele estar en el centro y puede estar rodeado por calcita, clorita, clorita-esmectita. Las amígdalas pueden llegar a medir 1mm, dentro de éstas en ocasiones el bitumen se encuentra asociado con esfalerita. Las grietas que presenta el bitumen suelen estar rellenas de calcita o sulfuros, entre ellos calcopirita, bornita y en menor cantidad cuarzo y clorita.

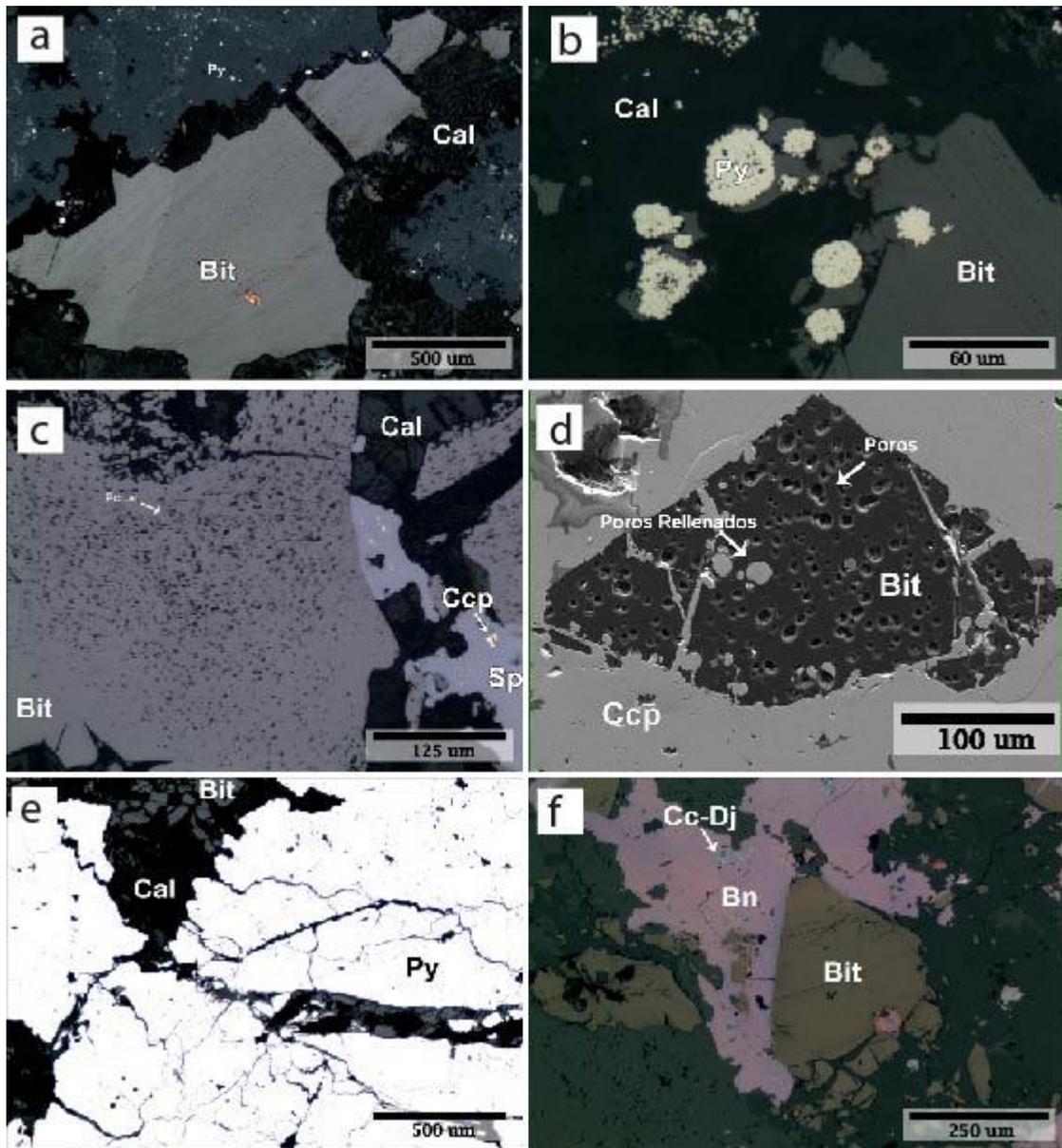
El bitumen en El Soldado puede presentar dos texturas. La primera de carácter uniforme, con una cantidad menor de fracturas e inclusiones minerales. Estas últimas suelen ser: pirita, calcopirita, cuarzo y calcita (**Figura 10A-B**). La segunda consiste en un bitumen con poros, los cuales suelen ser irregulares (**Figura 10C**), con escasos casos donde estos son redondeados. Algunos poros pueden estar rellenos con calcopirita, pirita, cuarzo o calcita (**Figura 10D**) dependiendo de qué mineral esté asociado el bitumen.

Las relaciones texturales indican que hay más de una generación de bitumen, identificándose de forma clara al menos tres. La primera corresponde a un bitumen uniforme asociado con pirita framboidal, calcita y clorita (**Figura 10B**). La segunda corresponde a bitumen poroso asociado espacialmente con esfalerita-calcita o calcopirita (**Figura 10C-D**), mientras que la tercera generación corresponde a bitumen uniforme, asociado con calcita que corta a pirita anhedral (**Figura 10E**). Localmente se observa un cuarto tipo de bitumen que se caracteriza por estar en contacto mediante bordes simples con bornita, sin evidencia de haber reemplazo de pirita o calcopirita previa (**Figura 10F**).

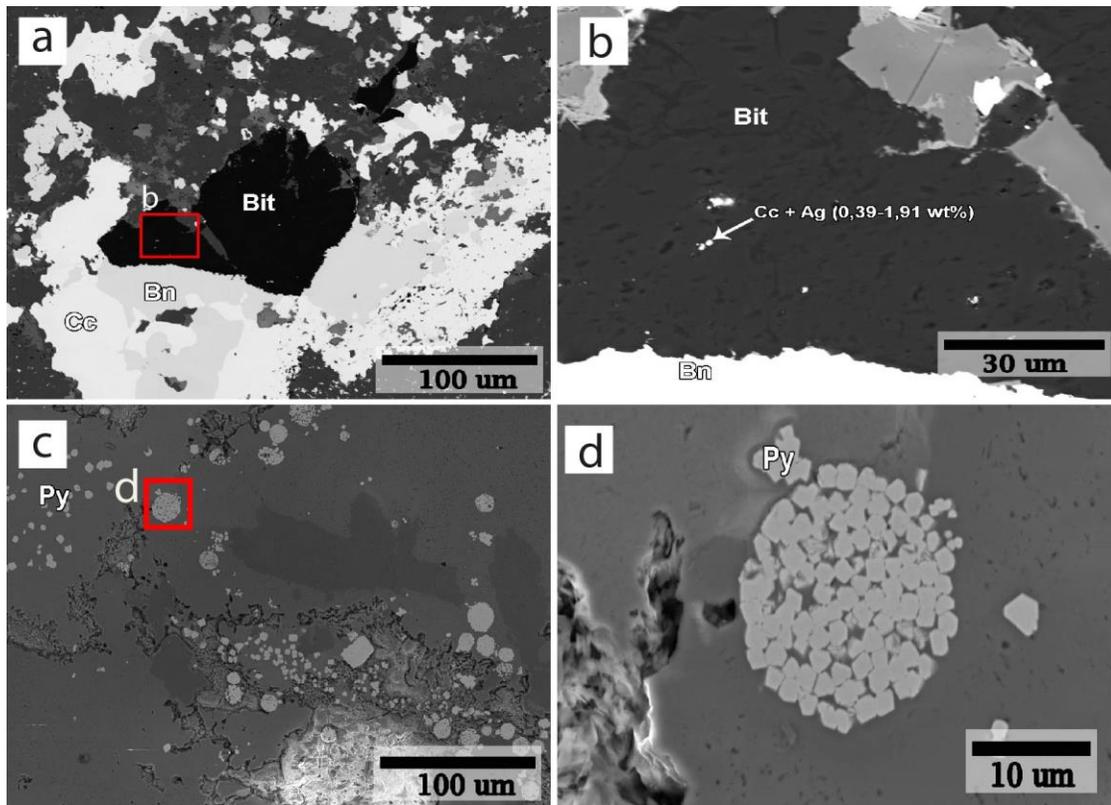
En general el bitumen es previo a los sulfuros de cobre, calcopirita, bornita, calcosina, covelina y digenita, ya que estos últimos rellenan sus fracturas, lo brechizan o presentan bordes irregulares y/o cóncavos con este. Estas observaciones son similares a lo observado en estudios previos, (Wilson, 1998; Boric, 2002; Boric et al., 2002). Sin embargo, algunos fragmentos de bitumen se presentan con bordes rectos o entrecrecidos con bornita (cuarta generación), indicando ser coetáneos.

No fue posible distinguir entre bitumen y pirobitumen, ya que no se realizaron análisis de reflectancia.

A nivel micrométrico el bitumen se encuentra comúnmente asociado con cuarzo, calcita y pirita. Esta última presenta tamaños de aprox. 1  $\mu\text{m}$ , el cuarzo puede presentar tamaños de hasta  $\sim 0,5 \mu\text{m}$ . Localmente se detecta Pb con concentraciones entre 54,89 y 88,21 wt. %, junto a Ca y O ( $\pm\text{Cl}$ ) o S, ( $\pm\text{Cl}$ ), es decir, probablemente ocurriendo como cerusita o galena. En el bitumen poroso se identifican inclusiones de albita y de calcosina, la cual presenta Ag, con valores que oscilan entre 0,39 y 1,01 wt.% (**Figura 11A-B**). Además, los poros de este bitumen se encuentran rellenos con calcopirita o calcita (**Figura 10D**).



**Figura 10:** Fotomicrografía del bitumen del depósito El Soldado. (a) Muestra MZ-4-91. Bitumen anguloso y liso en amígdala cortado por calcita. (b) bitumen liso con piratas framboidales rellenas (formas esferoidales) (c) Muestra MZ-4-91. Bitumen con poros irregulares en vetilla junto a esfalerita y calcita. (d) Bitumen anguloso y con poros redondeados, algunos rellenos de calcopirita. (e) Piratas subhedrales cortadas por bitumen liso y calcita. (f) Bitumen liso asociado con bornita. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Ccp= calcopirita, Cc=calcosina, Dj=Djurleita, Py=pirita, Sp= esfalerita



**Figura 11:** Fotomicrográficas de asociaciones minerales, obtenidas mediante SEM. (a) y (b) Imágenes BSE de bitumen poroso asociado con bornita y calcosina, con calcosina con Ag en sus poros. (c) y (d) Pirita framboidal, la cual se observa que está compuesta de una aglomeración de piritas euhedrales. Imagen BSE. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cc=Calcosina, Py=pirita.

#### 5.1.1.2 Mineralogía de ganga

**Calcita:** Es el mineral de ganga más abundante. Se presenta rellenando amígdalas, vetillas, y alterando plagioclasas primarias. Se encuentra en agregados anhedrales, masiva o formando mosaicos euhedrales, cuyos tamaños oscilan entre los 0,1 y los 0,4 mm. Se identificaron varias generaciones de calcita. La primera de ellas se asocia con clorita rellenando amígdalas y calcita que altera plagioclasas y se denomina Calcita I (**Figura 12A**). La segunda corresponde a calcita que corta bitumen y se acumula en amígdalas y vetillas asociadas a éste, a clorita, a pirita framboidal y/o euhedral y se denomina Calcita II (**Figura 10A-C**). Por último, se tiene calcita masiva en vetillas que corta sulfuros de cobre y que suele estar entrecrecida con clorita y por contacto simple con calcopirita, bornita-calcopirita y/o bornita (**Figura 12F**).

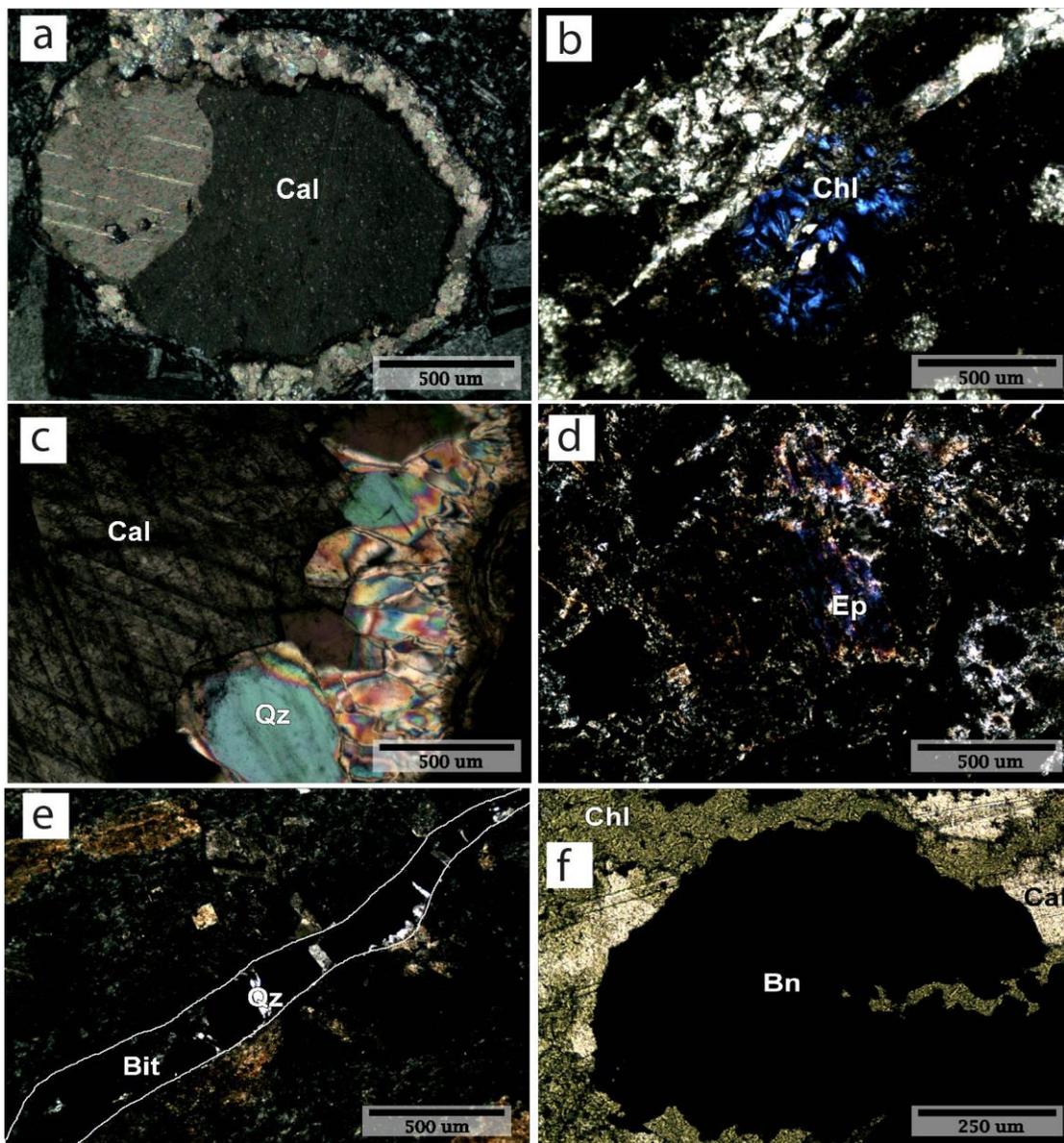
**Clorita:** La clorita con hábito acicular radial se encuentra en amígdalas, vetillas, alterando minerales primarios y la roca huésped. En roca poco alterada y sin mineralización se encuentra como relleno de amígdalas y a veces está asociada con calcita y/o bitumen, ubicándose este último

en el centro y la clorita el borde. En zona puntuales se presenta con color de interferencia azul anómalo (**Figura 12B**). A ésta se le denomina Clorita I, mientras que, la clorita que ocurre en vetillas, anhedral masiva y a veces intercrecida con pirita framboidal y/o euhedral fina, se le denomina Clorita II. En otras muestras se presenta con interestatificados de clorita-esmectita. A la clorita alterando masa fundamental y minerales primarios se le denomina Clorita III (**Figura 9A**) y de acuerdo con las relaciones texturales observadas, esto ocurre antes de la mineralización de sulfuros de cobre. Un último tipo de clorita en vetillas, la cual se encuentra en granos anhedrales, sola o intercrecida con calcita, usualmente cortando sulfuros de cobre, se relaciona a una etapa post mineralización y se denomina Clorita IV (**Figura 12F**).

**Cuarzo:** Se observa en menor cantidad respecto a clorita y calcita. Se distingue en diversas ocurrencias, por ejemplo, en vetillas que brechizan la roca caja presentándose poligonal con tamaños que promedian los 10 mm, con zonas que presentan texturas coliformes y o esferoidales, en ocasiones suele asociarse con calcita (**Cuarzo I; Figura 12C**). Además, se presenta en formas poligonales subhedrales en grietas de bitumen (**Cuarzo II**).

**Pirita:** La pirita presenta una secuencia deposicional donde la primera variedad de pirita es de carácter framboidal, denominada PiritaI (**Figura 11C-D**). Ésta consiste en una acumulación de cristales euhedrales de tamaño micrométrico, se concentra en vetillas, diseminada en masa fundamental, suele estar rodeada por calcita o en bitumen y acompañada por piritas euhedrales de mm. (**PiritaII; Figura 11C**): Posteriormente estos framboides se rellenan dando una forma esferoidal o formando estructuras de atolón, cuyos espacios están rellenos por bitumen o calcopirita. La pirita euhedral a subhedral envuelve a piritas framboidales y esferoidales, formando polígonos o piritas euhedrales de mayor tamaño (**Figura 10B; Figura 13C**). La pirita, independiente de su variedad, se encuentra en islas dentro de esfalerita, calcopirita y/o bornita (**Figura 13C-D**) indicando que estos sulfuros se formaron por reemplazo de pirita.

En este depósito se identifican además otros minerales más escasos, los cuales corresponden a: Sericita, altera la roca hospedante y plagioclasas, suele observarse asociada con cuarzo, calcita, clorita y/o epidota. Las plagioclasas también se encuentran alteradas albita o epidota (**Figura 12B-D**).



**Figura 12:**Minerales de ganga y de alteración en El Soldado. (a) Amígdala rellena por calcita. Calcita I en los bordes y calcita II al centro. (b) Clorita de color azul de interferencia relleno amígdalas. (c) Calcita y cuarzo en mosaico y esferoidal en vetilla. (d) Roca alterada a sericita cortando epidota que altera minerales primarios. (e) Vetilla de bitumen siendo reemplazado por cuarzo. (f) Muestra Clorita y calcita cortando bornita en vetillas. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Chl=clorita, Ep=epidota, Qz=cuarzo.

### 5.1.1.3 *Mineralogía de mena*

**Esfalerita:** Se identificaron dos tipos de esfalerita, una gris claro, subhedral a anhedral asociada con bitumen poroso y calcita, ya sea en vetillas o en amígdalas, que se denomina Esfalerita I y otra gris oscura con calcopirita y pirita euhedral en su interior diseminada, denominada esfalerita II (**Figura 13A**).

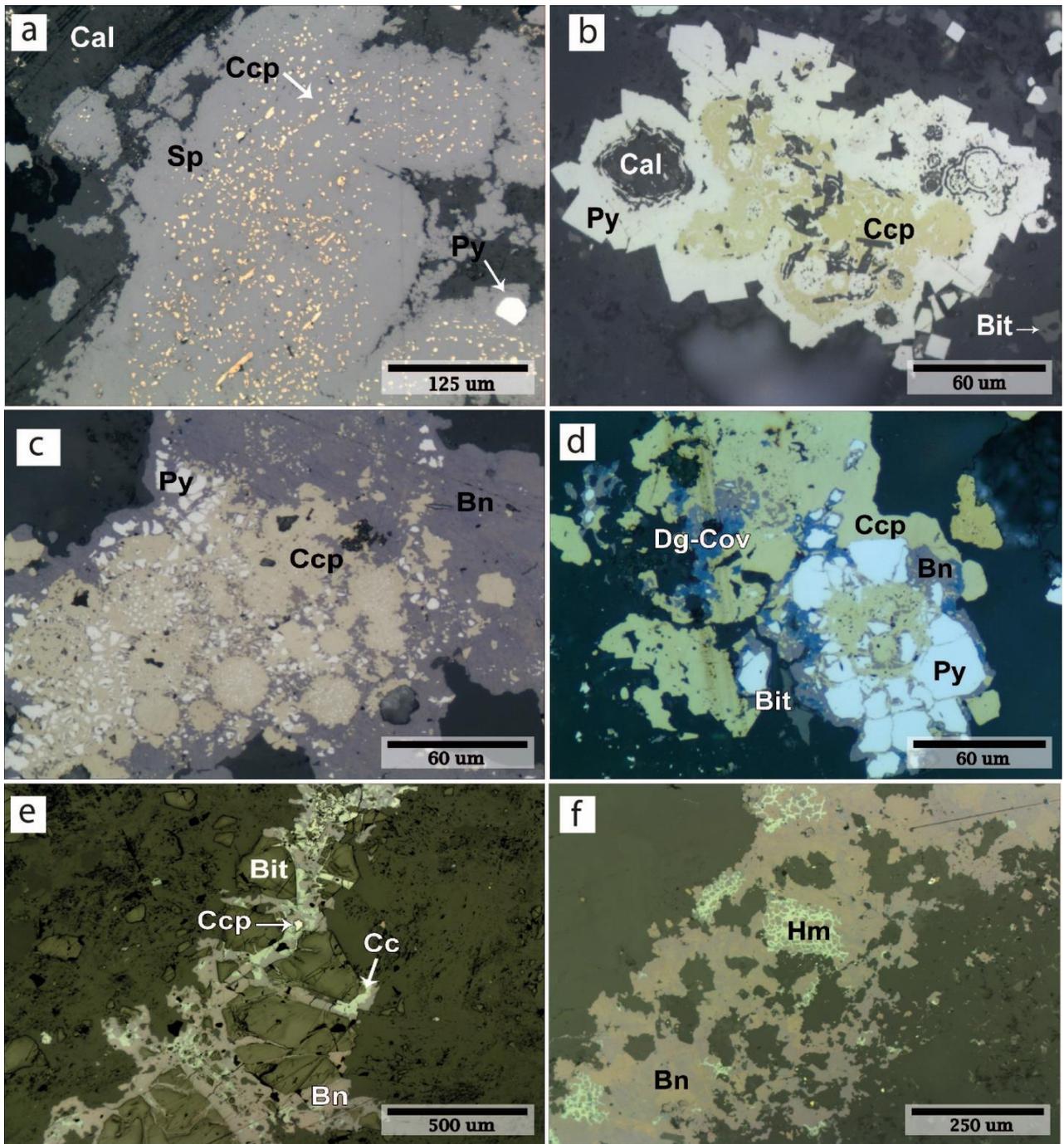
**Calcopirita:** Aparece como emulsiones dentro de Esfalerita II (**Figura 13A**). La calcopirita se forma por reemplazo de pirita, conservándose texturas previas, que pueden ser framboides, o formas euhedrales a subhedrales y al igual que esta se encuentra diseminada en vetillas (**Figura 13B-C-D**), se denomina Calcopirita I. Puede estar asociada con bornita, calcosina o bitumen-esfalerita o solo esta última. En ocasiones se encuentra diseminada, muy destrozada y asociada a bornita o bitumen. Suele estar reemplazada e intercrecida con bornita, formando un ensamblaje calcopirita-bornita (**Figura 13B-D**).

**Bornita:** Hay dos tipos de bornita. Una que se forma por reemplazo de calcopirita y pirita, conservando las texturas de los minerales originales y/o islas de estos en su interior (**Figura 13C-D**), denominada Bornita I y otra formada de modo directo, usualmente anhedral y masiva que puede estar asociada con calcita y/o clorita en amígdalas o vetillas (**Figura 12F**) o en grietas de bitumen o calcita, denominada Bornita II. La bornita puede presentar texturas de reemplazo con calcopirita o de intercrecimiento, indicando ser coetánea a posterior a ésta (**Figura 13C-D**). En estadios más tardíos sus bordes o en su interior suele aparecer covelina digenita, aunque es más frecuente encontrar calcosina con escasa hematita (**Figura 13D-F**). Ambos tipos de bornita se encuentran en vetillas principalmente y en menor cantidad en amígdalas.

**Calcosina:** Se encuentra principalmente asociada a bornita con texturas mirmequítica, (**Figura 13E**), también se pueden observar texturas de reemplazo con ésta. Comparando su aparición respecto a la asociación bornita-calcopirita, suele ser menos frecuente. En casos puntuales se presenta anhedral redondeada en islas dentro de bornita, junto a hematita. La calcosina también se forma de modo directo y suele ser anhedral, en algunas zonas está asociada con djurleita por reemplazo. Esta última es muy escasa y también suele reemplazar pirita.

**Hematita:** Se encuentra asociada con bornita y calcosina, donde aparece subhedral a anhedral en interior de bornita, junto a calcosina o en arreglos en forma de red (**Figura 13F**). Localmente se observa hematita especular asociada con el arreglo calcopirita-bornita. Este mineral no se asocia con el bitumen.

En menor cantidad se encuentran covelina y digenita, en la mayoría de los casos juntas, anhedrales, reemplazando pirita, calcopirita o bornita y/o calcosina por bordes rectilíneos. La covelina suele reemplazar bornita desde sus bordes. Se observa un caso particular de arsenopirita coexistiendo con bitumen.



**Figura 13:** Fotomicrografías que muestran las asociaciones de mineralización en el depósito El Soldado. (a) Framboides de pirita reemplazados por calcopirita, dentro de bornita. (b) Secuencia de reemplazo, pirita por calcopirita, luego está por bornita, y finalmente esta última siendo reemplazada por digenita-covelina. (c) Djurleita entre fracturas de bitumen, reemplazando pirita. (d) Clorita y calcita intercrecida reemplazando brechizando bornita. (e) Bornita y calcosina entre fracturas de bitumen. (f) Bornita con calcosina y hematita en su interior. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Ccp= calcopirita, Cc=calcosina, Cov=covelina, Dg=Digenita, Hm= hematita, Py=pirita, Sp= esfalerita

Adicionalmente a los minerales descritos anteriormente se identificaron por medio del microscopio electrónico de barrido (SEM), los siguientes minerales, los cuales ocurren de manera muy local: Galena (NW39) y cerusita (NW29; NW39) encontrados en bitumen. Finalmente, fue identificada cobaltita (NW39) diseminada en masa fundamental de la muestra NW39.

#### 5.1.1.4 *Asociaciones Minerales*

El apartado anterior permite establecer asociaciones minerales basadas, principalmente, en los minerales opacos presentes. Sin embargo, la asociación mineral más temprana identificada corresponde a Clorita I y Calcita I que se encuentran como relleno de amígdalas, principalmente en andesitas. La Clorita I en algunas zonas llega a presentar colores de interferencia azul anómalo. Calcita I localmente suele estar en vetillas con Cuarzo I.

En una segunda asociación el mineral opaco dominante es Pirita I, la cual presenta textura principalmente framboidal y se encuentra diseminada dentro de vetillas de Clorita II y Calcita II, a veces asociada con bitumen liso, el cual se encuentra también diseminado en vetillas con Calcita II y/o Clorita II o en amígdalas rodeado por Clorita I y/o Calcita II y /o Pirita I. Los framboides en algunas zonas se encuentran agregados, generando formas transicionales como esferoides y estructuras de atolón, cuyos intersticios están rellenos o rodeados por bitumen liso, conservando sus texturas originales sugiriendo que la materia orgánica aún no estaba totalmente sólida (**Figura 10B; Figura13B**).

La Pirita II, también se asocia a Calcita II y Clorita II, coexiste con bitumen poroso y Esfalerita I y los arreglos subhedrales son cortados por otro input de bitumen liso

La Esfalerita I presenta superficie cóncava hacia el bitumen poroso y se encuentran islas de bitumen en ella, esta brechizando al bitumen, ya sea diseminado en vetillas o en amígdalas. Tanto el bitumen como la esfalerita son rodeados por Calcita II. El bitumen con calcita forma entrecrecimientos vermiculares, además de rellenar sus grietas y poros (**Figura 10C**).

La Esfalerita II reemplaza los agregados de pirita esferoidal y estructuras de atolón y además presenta cristales de pirita euhedral, pirita framboidal y gotas de calcopirita dentro de esta (**Figura 13A**). Localmente la Esfalerita I ocurre dentro de pirita subhedral, estos cristales se alojan sobre fisuras de pirita, indicando reemplazo y ser posterior a ésta. Cabe destacar que pirita subhedral presenta arsénico, detectado mediante SEM-EDS (Véase anexo E).

Todos los tipos texturales de pirita son reemplazados por Calcopirita I, este mineral representa el ingreso de cobre al sistema.

Posteriormente se tiene Cuarzo II con Calcita III en vetillas, posteriores a pirita y bitumen. Lo mismo sucede con Clorita III principalmente altera la masa fundamental y minerales primarios, también ocurre en algunas vetillas con Calcita II. La epidota es escasa y se encuentra en la masa fundamental o reemplazando minerales primarios (**Figura 9A; Figura 12D**)

Las fracturas en el bitumen están rellenas por Calcopirita I y/o bornita, bornita-calcosina, indicando que estos sulfuros son posteriores a la fase orgánica sólida. Sin embargo, en algunas muestras se observa que el bitumen se presenta con bordes rectos o entrecrecidos con bornita II, indicando ser, en cierto punto, coetáneos.

La Calcopirita I reemplaza a la pirita, por lo que se encuentra esferoidal, anhedral, relleno de fisuras y a la vez la Bornita I se forma por reemplazo parcial de Calcopirita I, conservándose islas de pirita y/o Calcopirita I (**Figura 13C-D**). Esta secuencia ocurre en vetillas diseminadas, en fracturas de bitumen, rodeado de calcita y/o clorita. De modo posterior, también por reemplazo se tienen pequeñas cantidades de digenita y covelina en bordes de bornita o pirita (**Figura 13B**). La calcosina también reemplaza Bornita I.

La Bornita I también se puede encontrar entrecrecida con Calcopirita I, mediante texturas pseudo mimerquíticas con bitumen en su interior, indicando que lo fueron brechizando. A veces junto a este ensamblaje se distingue hematita especular. La Bornita II (**Figura 12F**) se encuentra en amígdalas con bordes de clorita o en vetillas con clorita y/o calcita y/o cuarzo o en fracturas de bitumen, al igual que Bornita I a veces presenta covelina-digenita en sus bordes y zonas de debilidad y con mayor frecuencia se asocia con calcosina, mediante texturas mimerquíticas y/o de reemplazo, localmente se asocia con hematita y djurleita (**Figura 13E**). En algunas muestras la Bornita II con calcosina, se observa asociada por bordes rectilíneos con bitumen indicando ser coetáneos, por lo que se tendría una generación de bitumen entre la mineralización de cobre.

### 5.1.1.5 *Secuencia Paragenética*

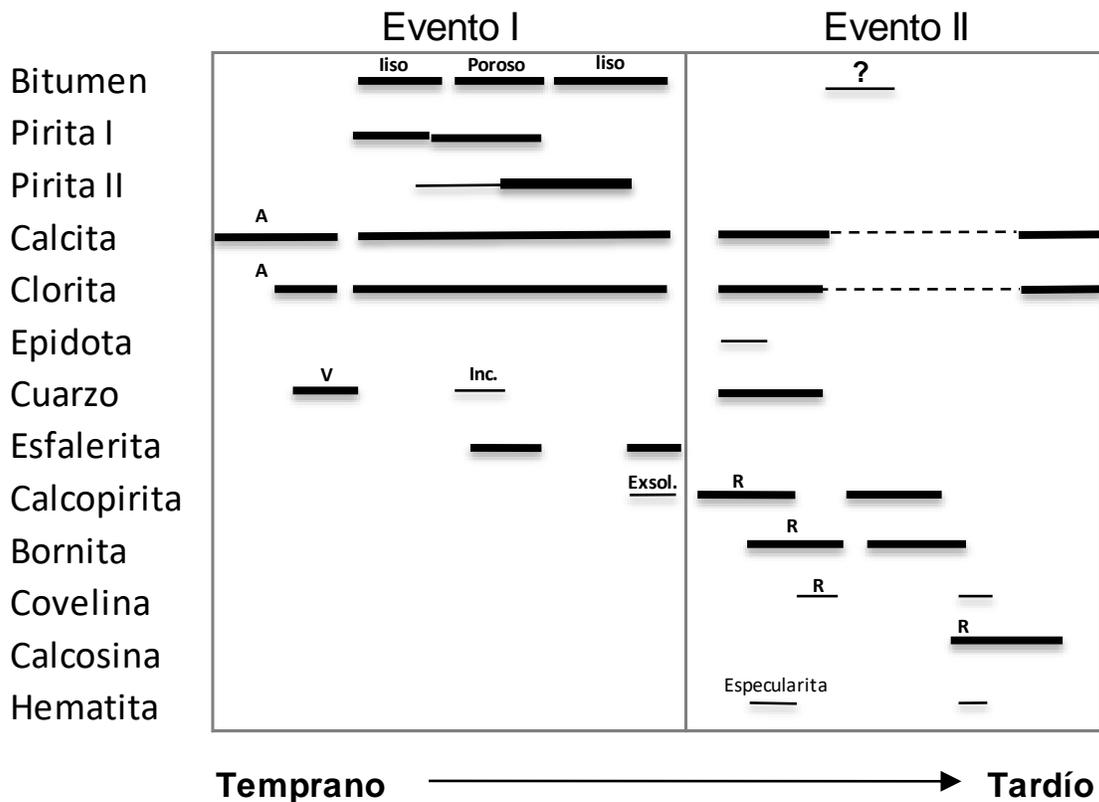
A partir de las observaciones de cortes transparente-pulidos, relaciones de corte entre minerales y entre asociaciones minerales se establece una secuencia cronológica relativa para el depósito de El Soldado.

Se logran distinguir dos etapas principales: pre- mena y mineralización principal, ambas con minerales hipógenos. La primera se relaciona a pirita, especialmente framboidal y bitumen, con menor cantidad de esfalerita, pirita euhedral y anhedral y calcopirita en esfalerita o reemplaza pirita. La segunda etapa corresponde a calcopirita y bornita que reemplazaron a la pirita, luego aparece bornita y calcopirita no relacionada a reemplazo, para dar paso a calcosina, covelina digenita y djurleita. Estos últimos tres minerales se pueden considerar como evidencia de algún grado de alteración supérgena en el sector Filo del yacimiento.

Wilson (1998) describe dos eventos, etapa I, denominada diagénesis y etapa II que corresponde a la mineralización de mena, similar a lo observado en este estudio.

A partir de lo anterior se define la siguiente secuencia paragenética para El Soldado:

**Tabla 4:** Secuencia Paragenética del depósito El Soldado. El grosor de las líneas indica abundancia relativa de cada mineral, línea punteada probablemente fue un evento continuo. A=Amígdalas, V=vetillas, Inc=inclusiones, R=Reemplazo.



## 5.1.2 La Culebra

La Culebra es una mina subterránea perteneciente a la minería de pequeña escala, donde su mena corresponde a óxidos y sulfuros de cobre. Su producción mensual es de 250 ton con leyes promedio de 2,4% Cu (Oetiker,2006).

Del depósito La Culebra se inspeccionaron 17 cortes transparentes-pulidos, correspondientes a andesitas de textura porfídica y/o amigdaloidal y brechas andesíticas provenientes de centros de acopio.

La mineralización está representada principalmente por calcopirita y covelina, menor cantidad de digenita y escasa bornita y calcosina. Además, presenta óxidos de cobre.

Los minerales de alteración están representados principalmente por clorita, calcita, pirita, prehnita, zeolitas, epidota, sericita, los cuales, de acuerdo con su asociación, representan distintos episodios de alteración, entre los que se incluyen: alteración sericítica y propilítica. Además existe presencia de prehnita y zeolitas en amígdalas, probablemente producto del metamorfismo regional de muy bajo grado que afecta a la secuencia cretácica.

### 5.1.2.1 *Bitumen*

El bitumen se presenta principalmente en amígdalas, las cuales suelen ser de mayor tamaño que las presentes en El Soldado, llegando a medir 1,5 cm. Su forma suele ser globular, de color gris oscuro a negro y suele presentar dos texturas características: i) bitumen liso que tiene una superficie uniforme, que puede presentar fracturas y minerales en su interior, usualmente pirita (**Figura 14 A-C-D**) y ii) bitumen poroso de superficie irregular con poros alargados y deformados o bien con poros redondeados (**Figura 14E**). Al igual que el bitumen liso, el bitumen poroso suele estar fracturado y presentar inclusiones minerales. A diferencia del depósito de El Soldado, en La Culebra el bitumen poroso es muy escaso y se encuentra en amígdalas siempre intercrecido con bitumen liso, por lo cual es difícil diferenciar a dos generaciones o inputs de bitumen distintos. Los poros suelen estar rellenos con cuarzo, calcita o pirita.

El bitumen en amígdalas puede ser el único relleno o estar asociado con otros minerales. Con clorita suele formar bandas bitumen-clorita-bitumen (**Figura 14A**), lo que sugiere una depositación rítmica o distintos eventos de introducción en etapas tempranas de formación del depósito. La calcita suele rellenar los poros y/o fracturas del bitumen, lo que indica un origen coetáneo a posterior. La pirita suele estar incluida dentro de bitumen, y su forma euédrica indicaría que bitumen aún no estaba totalmente sólido al momento de su formación (**Figura 14A-C**). El bitumen suele estar intercrecido con prehnita en amígdalas, en las cuales además se presenta bitumen poroso (**Figura 14E-F**).

De acuerdo con las relaciones texturales el bitumen en La Culebra es previo a la formación de los sulfuros de cobre a sulfuros de cobre. Éstos suelen brechizar al bitumen y/o rellenar sus fracturas.

Al igual que en El Soldado, la calcita y el cuarzo se presentan de modo recurrente a escala micrométrica, y en casos particulares, se reporta baritina.

### 5.1.2.2 *Minerales de alteración*

A continuación, se presentan las principales fases de minerales de alteración, presentes en La Culebra.

**Clorita:** La clorita es el mineral de alteración que se presenta con mayor frecuencia en el depósito, y se suele encontrar de forma acicular radial, a veces asociada con esmectita. Ambos ensamblajes suelen rellenar amígdalas. La primera generación de clorita, denominada clorita I, suele ser el único mineral presente en amígdalas, hasta la aparición de bitumen liso, el cual también rellena amígdalas y cuanto está asociado con Clorita I, suele formar bandas bitumen-clorita-bitumen (**Figura 14A**). Junto a la Calcita I, la Clorita I suele rellenar fracturas de bitumen y de otros minerales. La Clorita II, por otra parte, rellena vetillas y está asociada con esmectita que la altera masa fundamental de la roca huésped.

**Calcita:** La calcita también es un mineral abundante, se caracteriza por presentarse en mosaicos o morfología anhedral, rellenando amígdalas y fracturas de la roca. En amígdalas puede estar diseminada, o asociada con bitumen, rellenando sus fracturas o presentando bordes cóncavos hacia el bitumen, indicando ser posterior (**Figura 14 D**).

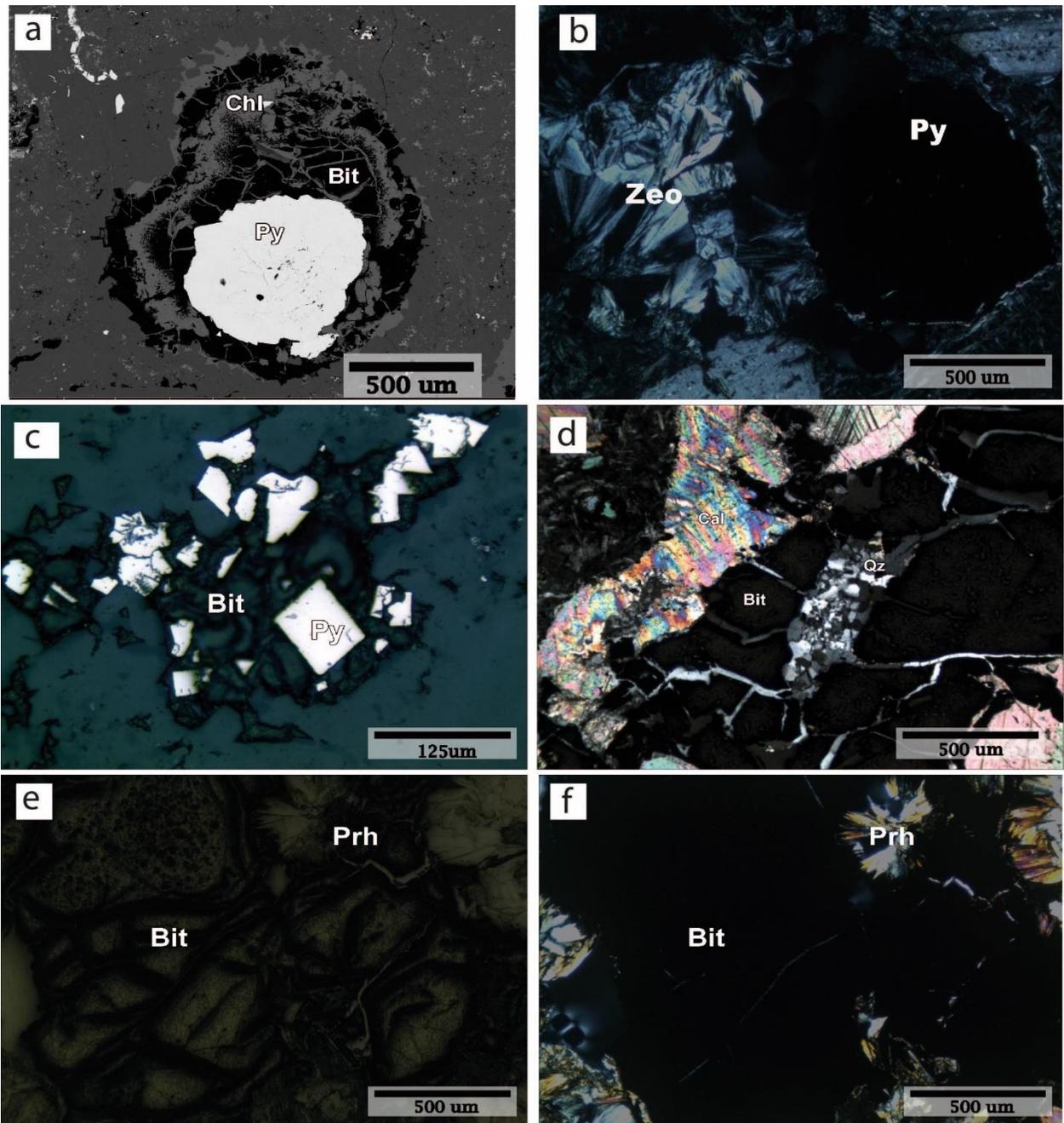
**Cuarzo:** La presencia de cuarzo es escasa comparado con los minerales anteriores. Se tienen cristales subhedrales, ubicados en amígdalas, donde suele localizarse en bordes y/o cortando bitumen (**Figura 14D**).

**Pirita:** La pirita aparece principalmente como cristales euhedrales. Estos pueden estar en cúmulos diseminados en masa fundamental, los cuales a veces cortan plagioclasa y junto con clorita forman pseudomorfos (Pirita I). La pirita euhedral también se encuentra asociada a bitumen en amígdalas, donde éste suele rodearla (**Figura 14C**). Además, esta pirita presenta sobrecrecimiento de pirita euhedral similares a los vistos en El Soldado, generando arreglos subhedrales (Pirita II).

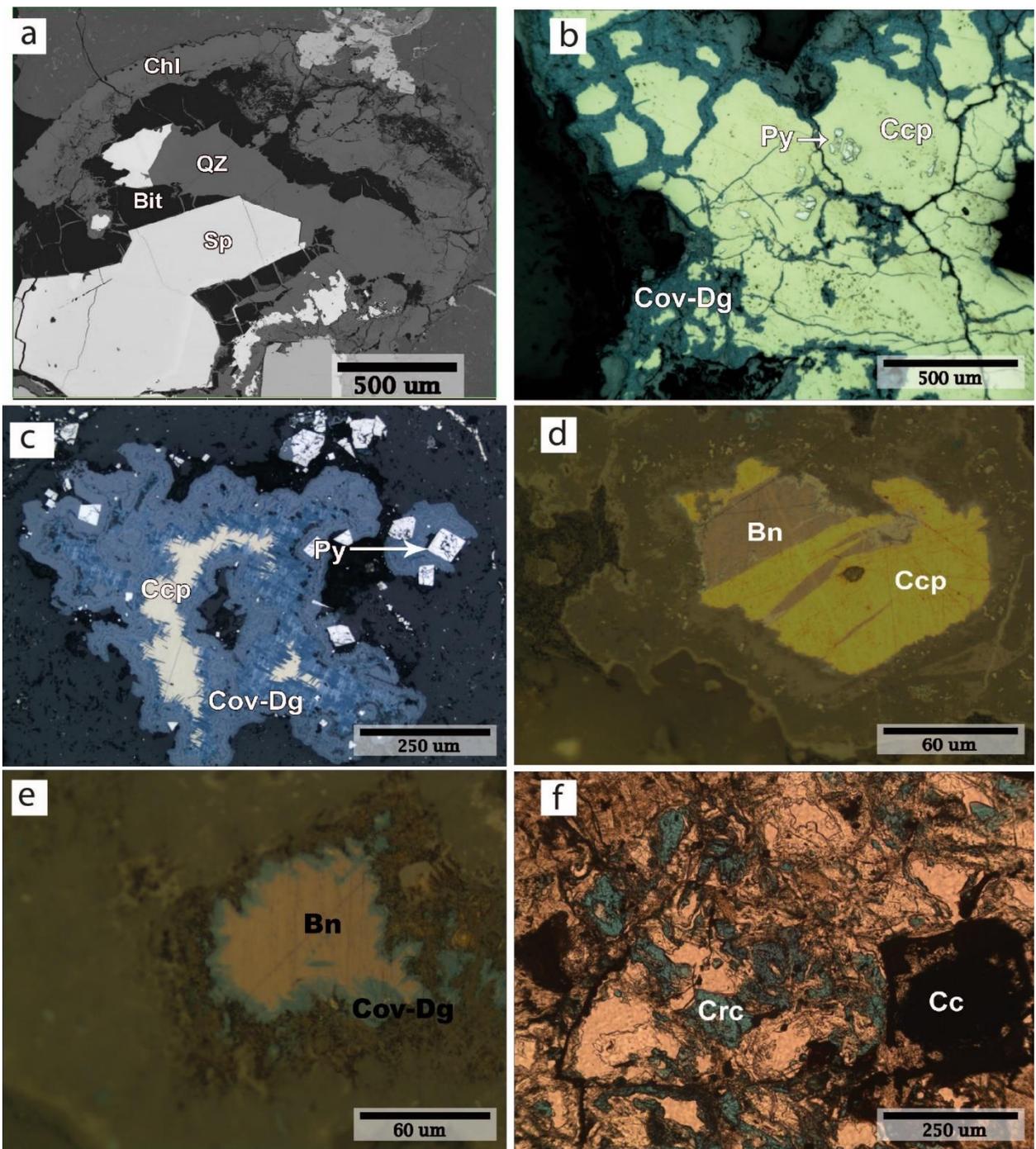
A diferencia de El Soldado no se observa pirita framboidal. Sin embargo, se tiene escasa pirita esferoidal, siempre dentro de calcopirita con borde de digenita-covelina, por lo que la pirita framboidal pudo haber sido totalmente reemplazada. Además, localmente hay calcopiritas con sobrecrecimientos que presentan microfracturas rellenas de calcita, que reemplazaron pirita

La pirita también está presente como relleno de vetillas, las cuales suelen cortar amígdalas con bitumen o calcita indicando ser posterior, se denomina pirita III.

En menor cantidad, suele aparecer albita, escapolita y feldespatos potásicos los cuales se encuentran diseminados en masa fundamental. La escapolita suele estar intercrecida con calcita y clorita-esmectita. La albita y feldespatos potásicos también se encuentran asociados a bitumen, reemplazando minerales previos.



**Figura 14:** Fotomicrografías de minerales de ganga en el depósito La Culebra. (a) Amígdala con relleno de pirita, clorita y bitumen, estos dos presenta una secuencia intercalada de relleno, bitumen-clorita-bitumen. (b) Amígdala con ceolita y pirita subhedral intercrecidas (c) Bitumen liso con pirita euhedral en su interior. (d) Bitumen con fracturas rellenas por cuarzo en mosaicos irregulares y calcita. (e) y (f) Bitumen liso y poroso en amígdala junto a prehnita (e) imagen a luz reflejada y (f) imagen a luz transmitida y nicols paralelos. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Chl=clorita, Prh=Prehnita, Py=pirita, Qz=cuarzo, Zeo=ceolita.



**Figura 15:** Fotomicrografía de minerales de mena en el depósito La Culebra. (a) Esfalerita con cuarzo cortando amígdala de bitumen y clorita (b) Secuencia de reemplazo: pirita-calcopirita-covelina. (c) Similar secuencia a (b) con asociada con bitumen y covelina coloforme (d) Bornita diseminada con calcopirita asociada por bordes rectilíneos. (e) Bornita anhedral diseminada con reemplazo tipo corona de covelina-digenita. (f) Crisocola relleno de espacios abiertos en roca altamente alterada, se tiene calcosina en amígdalas. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Chl=clorita, Ccp= calcopirita, Crc= crisocola, Cc=calcosina, Cov=covelina, Dg=Digenita, Py=pirita, Sp= esfalerita, Qz=cuarzo.

### 5.1.2.3 *Mineralogía de Mena*

**Calcopirita:** Al igual que en El Soldado la calcopirita se forma por reemplazo de pirita, y se observa de dos maneras. La primera corresponde a calcopirita que rellena microfracturas de pirita subhedral, la cual conserva texturas previas, se denomina Calcopirita I, mientras que la segunda corresponde a calcopirita anhedral con islas de pirita en su interior, esta se encuentra diseminada en vetillas o en amígdalas (Calcopirita II). A veces los bordes de calcopirita contienen digenita y covelina (**Figura 15B**). A veces se tiene en amígdalas junto con bitumen y calcita, por reemplazo de pirita previa (**Figura 15C**) o bornita y calcita. También se tiene vetillas con relleno de calcopirita.

**Bornita:** Es escasa. Se encuentran fragmentos anhedrales en amígdalas con bordes de covelina-digenita o de calcosina, también se observa diseminada en vetillas con relictos calcopirita en su interior. Localmente aparece con texturas de exsolución con calcopirita anhedral (**Figura 15D-E**).

**Calcosina:** Al igual que la bornita es escasa, se observa anhedral en amígdalas o con texturas de reemplazo, en bordes de granos de bornita o en islas dentro de bornita. También se encuentra en texturas de reemplazo con calcopirita, observándose en bordes de grano y microfracturas. No se observa calcosina asociada directamente con bitumen. (**Figura 15F**)

**Covelina:** Es abundante y a veces esta intercrecida con digenita. Siempre anhedral y localmente con texturas coliformes la covelina se encuentra en texturas de reemplazo con pirita y calcopirita, observándose en bordes de grano y microfracturas, de este modo puede estar en amígdalas o vetillas. Localmente se encuentra en bordes de granos de bornita. La covelina también se encuentra en amígdalas cortando bitumen, indicando ser posterior. (**Figura 15B-C**)

**Esfalerita:** Es escasa, reemplaza pirita anhedral diseminada o coexiste con calcopirita anhedral. Al igual que en El Soldado se asocia a bitumen en amígdalas, las relaciones de corte indican que esta es posterior a bitumen, ya que lo cruza junto con cuarzo y se asocia con bordes rectos con Calcita I (**Figura 15 A**).

**Crisocola:** Rellenando amígdalas y vetillas corta mineralización de sulfuros (**Figura 15F**).

#### 5.1.2.4 Asociaciones Minerales

La primera asociación corresponde a pirita y bitumen liso y los minerales de alteración clorita, calcita y en menor cantidad zeolita, los cuales se concentran principalmente en amígdalas y pueden presentar texturas de intercrecimiento o texturas secuenciales. Pirita I se encuentra en masa fundamental, mientras que, clorita I y zeolita rellenan amígdalas y a veces pueden presentar intercrecimiento o texturas secuenciales con bitumen liso o pirita II, por lo cual los minerales de alteración se forman primero o al mismo tiempo que bitumen. (Figura 14A; Figura 15A)

Posteriormente bitumen liso se encuentra junto a bitumen poroso en amígdalas, por lo general intercrecido con prehnita, (**Figura 14E-F**) otras con pirita subhedral. Además, aparece calcita la cual, junto a cuarzo rellena fracturas de bitumen y se aloja en amígdalas previamente rellenas con los minerales ya mencionados, dando paso a la segunda asociación calcopirita-covelina. La calcopirita reemplaza a todas las versiones de pirita, en especial a pirita subhedral, comenzando por microfracturas hasta lograr un reemplazo total, en la cual a veces quedan islas de pirita. (**Figura 15 B-C**). También aparece con bornita, esta última es escasa y se encuentra anhedral en amígdalas o vetillas. Además, clorita-esmectita altera masa fundamental y esfalerita anhedral corta bitumen y se asocia con calcopirita con bordes rectilíneos

La calcopirita es reemplazada desde sus bordes o por microfracturas por covelina y digenita, de igual modo sucede con la bornita, dando paso a la última asociación reconocida en las muestras. La bornita es reemplazada por calcosina, la cual está en bordes, en islas o diseminada en amígdalas junto a crisocola o con cuarzo. Esta asociación es claramente posterior al bitumen y la pirita.

Finalmente, se tiene crisocola relleno espacios abiertos. El bitumen asociado ocurre muy agrietado, es escaso y de color gris, presentando anisotropía (**Figura 15F**).

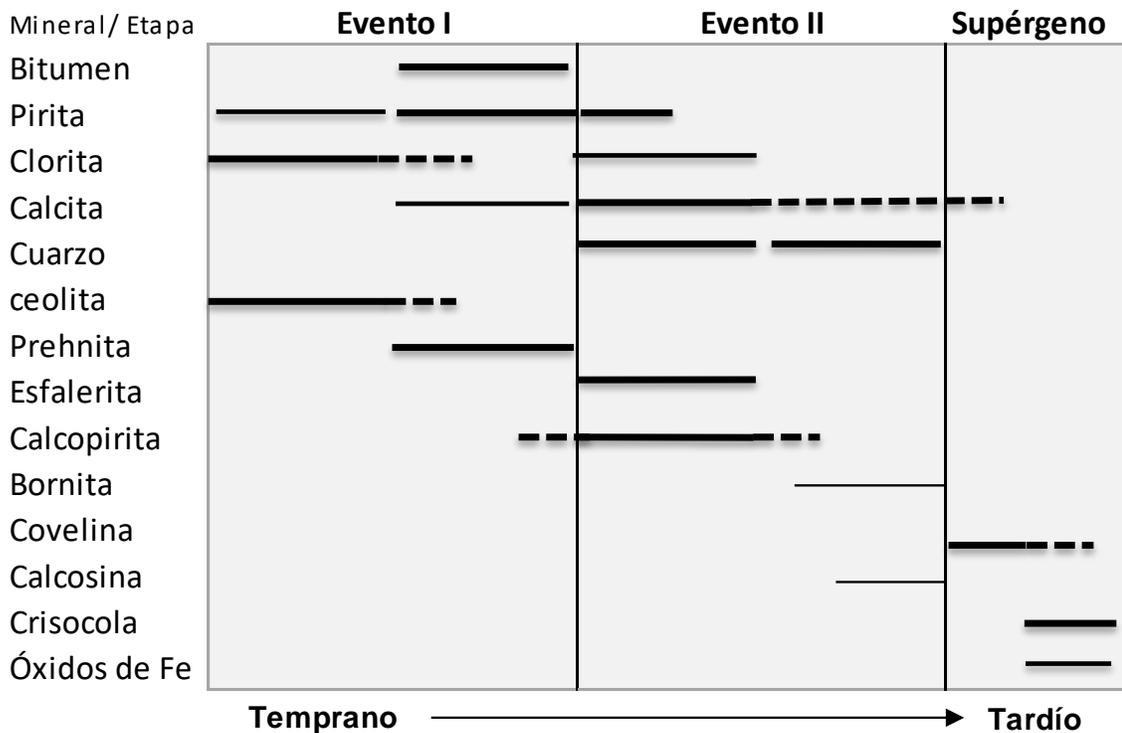
Oetiker (2016) también reporta la presencia de azurita, la cual se encuentra diseminada y en vetillas.

### 5.1.2.5 *Secuencia Paragenética*

A partir de lo anterior es posible distinguir claramente dos etapas de mineralización, una hipógena y otra supérgena. La mineralización hipógena, al igual que en El Soldado se puede dividir en dos etapas, la primera, denominada pre-mena, caracterizada por la presencia de pirita euhedral y bitumen, con menor cantidad de esfalerita y la segunda correspondiente a la mineralización principal caracterizada por calcopirita. La mineralización supérgena se caracteriza por covelina, óxidos de cobre y escasa calcosina.

Se define la siguiente secuencia paragenética para La Culebra:

**Tabla 5:** Secuencia Paragenética de La Culebra. Grosor de las líneas indica abundancia relativa y las líneas punteadas indican probablemente un evento continuo en el tiempo.



### 5.1.3 Manto Cobrizo

Manto Cobrizo es una mina subterránea perteneciente a la minería de pequeña escala con un tonelaje de sulfuros de alrededor de 100.000 toneladas con leyes de hasta 4,3% Cu (Cisternas y Hermosilla, 2006)

Para Manto Cobrizo, se observaron 17 muestras que fueron recolectadas de centros de acopio.

La roca huésped corresponde a andesitas y brechas andesíticas con distintos grados de alteración

La mineralización corresponde principalmente a bornita y calcosina, menor cantidad de calcopirita, enargita, covelina y escasa digenita.

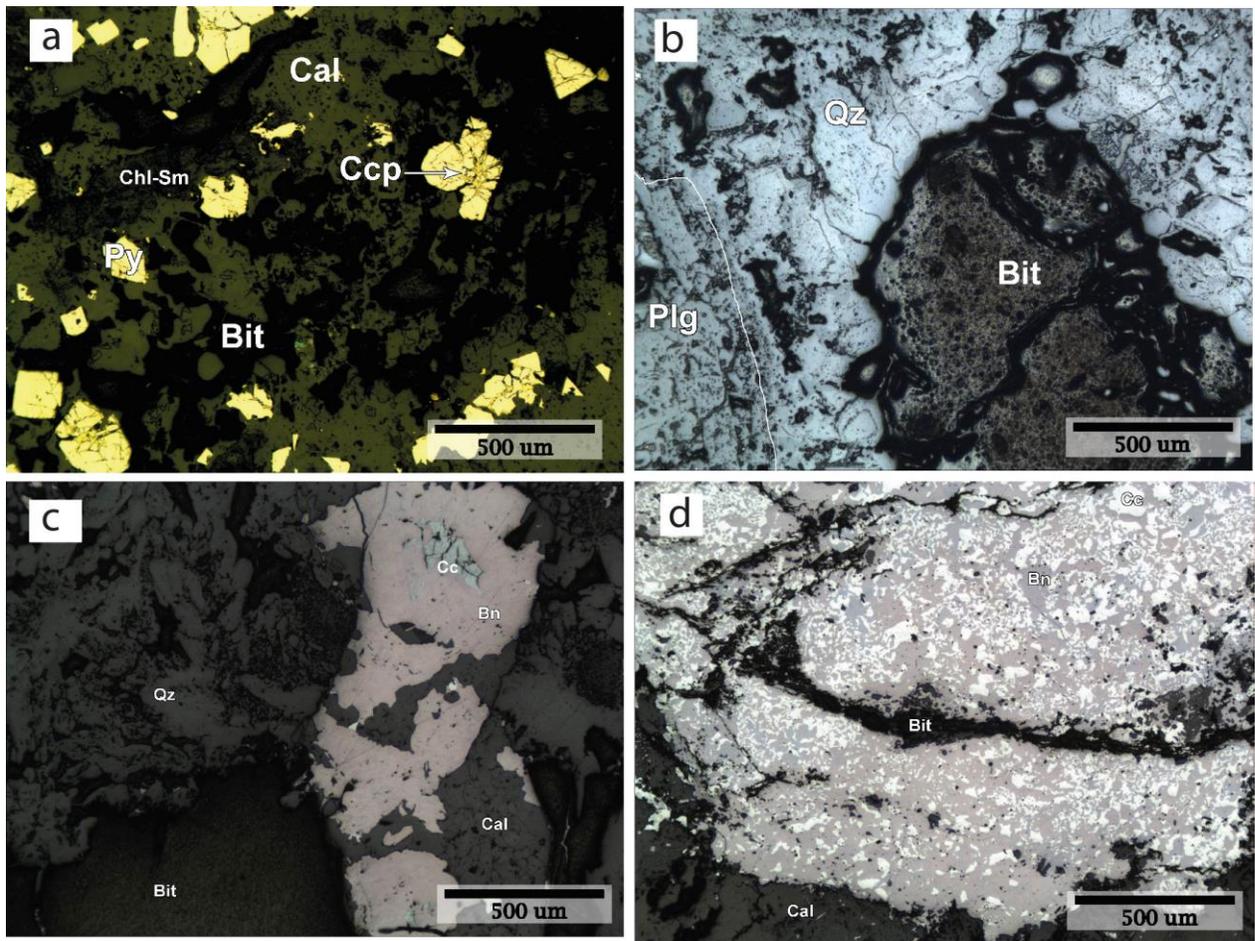
Los minerales de alteración corresponden a calcita, clorita-esmectita, cuarzo, pirita, albita y menor cantidad de zeolita, escapolita, estos minerales se relacionan a metamorfismo de muy bajo grado de la secuencia cretácica.

#### 5.1.3.1 *Bitumen*

El bitumen en Manto Cobrizo ocurre mayoritariamente en vetillas. Cuando ocurre en amígdalas, se presenta de color gris, globular y agrietado, con algunos matices rojizos, indicando estar oxidado (**Figura 16B**). A comparación de los depósitos anteriores el bitumen en este depósito es escaso.

Texturalmente el bitumen puede ser liso, con o sin fracturas y a veces presentar pirita (**Figura 16A-C-D**) o cuarzo en su interior. También ocurre como masas irregulares, con poros redondeados o sin forma y rellenas por lo general con cuarzo. Cabe destacar que esta variedad de bitumen se encuentra generalmente en vetillas de cuarzo o asociado a este mineral (**Figura 16B**).

El bitumen parece ocurrir en dos generaciones distintas, uno asociado a clorita, ceolita y pirita (**Figura 16A,17A-B-E**) y otro asociado a calcita, cuarzo y bornita, con la cual en algunas zonas está intercrecido, y en otras ésta lo corta (**Figura 16C-D**).



**Figura 16:** Bitumen en el depósito de Manto Cobrizo. (a) Bitumen diseminado en espacio entre fracturas asociado con pirita con reemplazos de calcopirita, clorita-esmectita y calcita. Imagen en luz reflejada. (b) Bitumen poroso diseminado en vetillas de cuarzo. (c) Bitumen liso diseminado en vetilla de cuarzo y cortado por vetilla de calcita, bornita, calcosina. (d) Bitumen liso cortando bornita con calcosina con texturas mimerquíticas. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Cal= calcita, Chl-Sm=clorita-esmectita, Ccp= calcopirita, Cc=calcosina, Plg=plagioclasa, Py=pirita, Qz=cuarzo.

### 5.1.3.2 *Mineralogía de ganga*

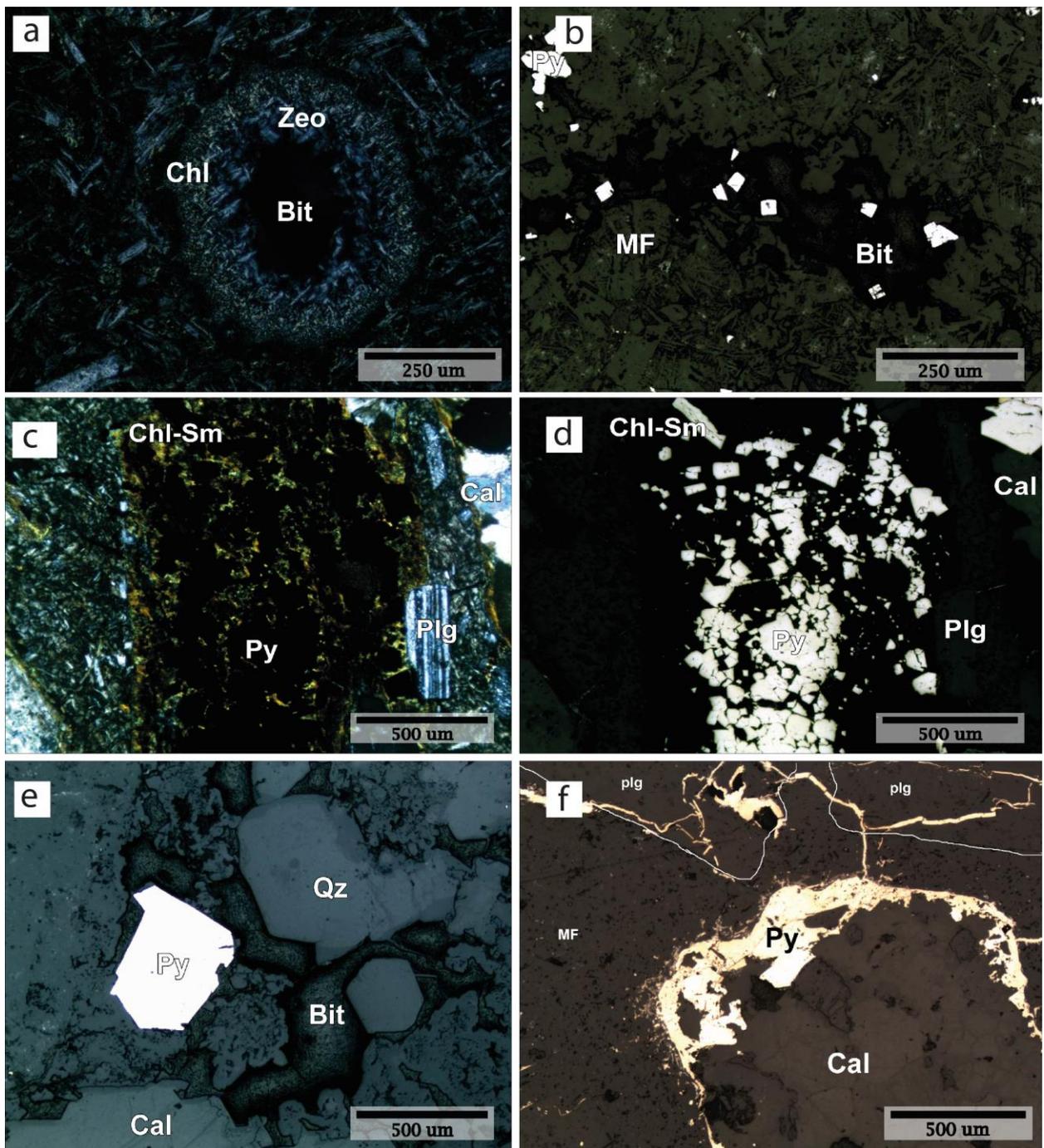
**Calcita:** Se encuentra entrecrecida con clorita-esmectita, diseminados en masa fundamental o relleno amígdalas (**Figura 17D-E-F**). Con cuarzo se asocia en vetillas, las cuales tienen pirita, bitumen y/o bornita (**Figura 17E**). Ocurre también en mosaicos anhedrales relleno vetillas con bornita que cortan bitumen liso (**Figura 16C**).

**Clorita:** Se encuentra acicular radial como relleno de amígdalas y asociada a zeolitas cálcicas y bitumen (**Figura 17A**), altera masa fundamental, y forma pseudomorfos de minerales primarios, intercrecida con pirita euhedral y/o bornita-calcosina (**Figura 17C-D; Figura 18C**). Rellena vetillas junto con calcita (**Figura 16A**).

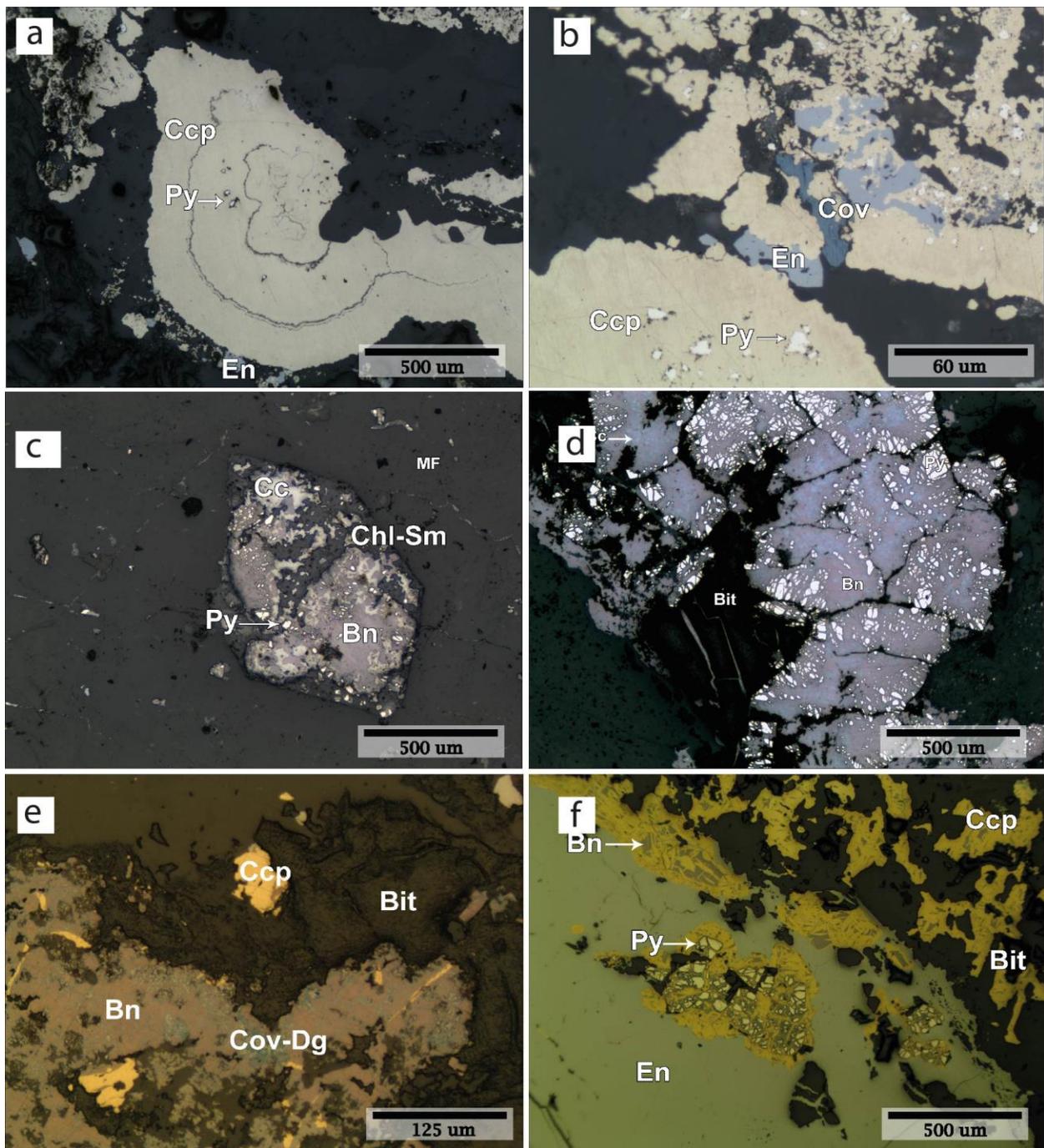
**Cuarzo:** Habitualmente se encuentra como relleno de vetillas y fracturas, suele estar en mosaicos subhedrales y localmente presenta texturas coliformes y esférulas, suele estar asociado con pirita calcita, bitumen y bornita.

**Pirita:** Se encuentran dos variedades. La primera corresponde a pirita euhedral, que es mayoritaria en el depósito, además se observa una segunda variedad de pirita intercrecida con clorita, formando pseudomorfos o en amígdalas intercrecida con bitumen (**Figura 17 B-D-E**). La segunda variedad se encuentra relleno vetillas y fracturas en la roca huésped (**Figura 17F**).

En menor cantidad se reconoce epidota, alterando plagioclasa que son cortadas por bitumen. Las ceolitas, de textura acicular radial, son relleno único de amígdalas, o con clorita-esmectita. Además, en etapas posteriores alteran la masa fundamental (**Figura 17A**). Se reconoce escapolita, muy escasa y diseminada en masa fundamental. No se relaciona con el bitumen.



**Figura 17:** Fotomicrografía que muestra minerales de ganga en Manto Cobrizo. (a) Amígdala con relleno central de bitumen, rodeado de zeolita y estas a su vez por clorita. Masa fundamental se encuentra alterada a ceolita. Imagen a luz transmitida. (b) Bitumen con pirita euhedral en su interior, en fracturas de la roca huésped. Imagen a luz reflejada. (c) y (d) Clorita-esmectita y pirita euhedral formando pseudomorfos de cristales primarios, imagen (c) a luz transmitida e imagen (d) a luz reflejada. (e) Pirita, bitumen, cuarzo y calcita asociado en fracturas. (f) Calcita en amígdalas siendo ‘cementada’ por pirita, la cual rellena fracturas de la roca huésped y corta plagioclasas. Abreviaciones minerales: Bit= bitumen, Cal=calcita, Chl-Sm=clorita-esmectita, MF=masa fundamental, Plg=plagioclase, Py=pirita, Qz=cuarzo, Zeo=ceolita.



**Figura 18:** Fotomicrografía de la mineralización de cobre en el depósito Manto Cobrizo. (a) Calcopirita con sobrecrecimientos y relictos de pirita y bordes con reemplazo incipiente de enargita. (b) Secuencia de reemplazo: pirita-calcopirita-enargita-covelina. (c). Islas de pirita en pseudomorfo, junto con clorita-esmectita y bornita-calcosina. (d) Bornita con relictos de pirita, producto de reemplazo, con reemplazo de calcosina desde fracturas entrecrecidas con bitumen. (e) Bornita con reemplazo de calcopirita y covelina-digenita con bordes cóncavos hacia el bitumen. (f) Secuencia de reemplazo: pirita- bornita- calcopirita-enargita. Abreviaciones minerales: Bit=bitumen, Bn= bornita, Chl-Sm=clorita-esmectita, Ccp= calcopirita, Cc=calcosina, Cov=covelina, Dg=digenita, En=enargita, MF=masa fundamental, Py=pirita.

### 5.1.3.3 *Mineralogía de Mena*

**Calcopirita:** Se presenta reemplazando a todas las generaciones de pirita por medio de microfacturas (**Figura 16A**), o reemplazando completamente la pirita. Se conservan las texturas originales y en ocasiones se reconocen relictos de pirita en su interior, se denomina Calcopirita I. Localmente la Calcopirita I presenta sobrecrecimientos (**Figura 18A**). La calcopirita también se observa subhedral a anhedral, diseminada en vetillas con sus bordes siendo reemplazados por enargita, la cual también se encuentra reemplazando bornita con calcopirita en texturas de exsolución, esta se denomina Calcopirita II(**Figura18A-B-E-F**).

**Bornita:** Se identifican dos tipos de bornita, la primera corresponde a bornita que puede estar como relleno de amígdalas o localmente diseminada en fracturas de la roca huésped rellenas de cuarzo, el cual a veces presenta textura coloforme. La bornita se presenta intercrecida o cortando bitumen, el cual puede ser liso o poroso, está se denomina Bornita I (**Figura 16 C-D; Figura 18D**). La segunda se observa reemplazando pirita y está en amígdalas o diseminada en vetillas de calcita. Ésta en ocasiones se observa con calcopirita, formando un arreglo en forma de cesta, mostrando texturas de exsolución, además en los bordes está siendo reemplazada por enargita y escasa digenita-covelina, se denomina Bornita II (**Figura 18F**). Ambas variedades de bornita presentan texturas de reemplazo e intercrecimiento con calcosina en la mayoría de los casos con textura mimerquíticas con calcosina. Éstos minerales también pueden presentar crecimientos vermiculares o reemplazo tipo corona, este ensamblaje también se encuentra formando pseudomorfos junto con clorita-esmectita, y presenta islas de pirita en su interior (**Figura 18C**).

**Calcosina:** Se encuentra asociada a todas las versiones de bornita, mediante texturas de reemplazo y/o intercrecimiento, formando texturas mimerquíticas o coronas, donde reemplaza los bordes de bornita o con crecimientos vermiculares (**Figura 16 C-D; Figura 18C-D**).

**Covelina:** Es escasa, aparece en bordes o microfracturas de bornita-calcopirita o calcopirita-enargita. No se relaciona directamente con bitumen (**Figura 18B-E**).

**Enargita:** Aparece como reemplazo en bordes de calcopirita o bornita-calcopirita, indicando ser posterior a éstas.

### 5.1.3.4 *Asociaciones minerales*

Se distingue una asociación mineral concentrada en amígdalas, reemplazando minerales primarios o alterando masa fundamental, y compuesta de clorita acicular radial, ceolita cálcica acicular radial y cuarzo coloforme y esferoidal. La clorita-esmectita altera la masa fundamental, en algunas zonas se encuentra intercrecida con calcita en mosaicos subhedrales y/o cuarzo subhedral. Las amígdalas se encuentran rellenas por ceolitas o calcita rodeadas por clorita; también, la clorita-esmectita altera minerales primarios, junto a ceolita o calcita. Además, se tiene pirita diseminada entre fracturas de minerales, formando pseudomorfos. Escasa escapolita se encuentra diseminada

en masa fundamental. Esta asociación altera la roca huésped y se considera previa a coetánea con el bitumen (**Figura 17A-C-D**). El bitumen globular y agrietado se concentra en amígdalas, cuyos bordes pueden ser de pirita anhedral, cuarzo subhedral, clorita subhedral acicular. En algunas zonas la pirita euhedral se encuentra dentro de bitumen (**Figura 17B**). Vetillas de pirita cortan la mineralogía primaria, amígdalas y masa fundamental. Además, la pirita empieza a ser reemplazada por calcopirita desde sus fisuras, este reemplazo puede ser completo o parcial; evidencia de ésto es la presencia de relictos de pirita dentro de calcopirita (**Figura 16A; Figura 18 A-B**).

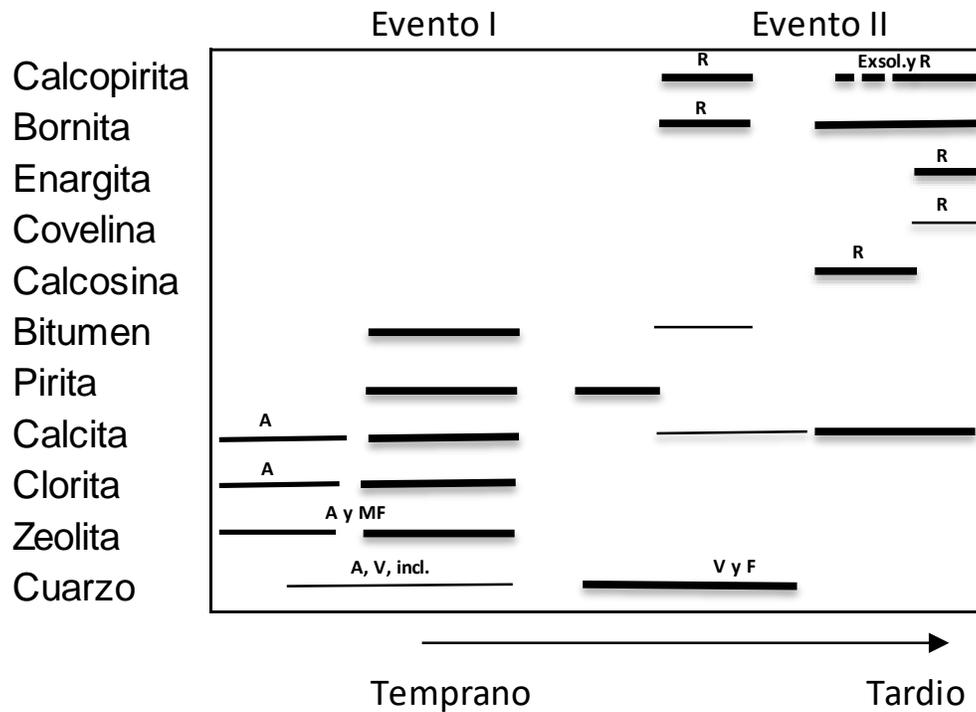
La bornita y calcosina se consideran los principales minerales de mena. Estos minerales se presentan en un arreglo anhedral, con diversos tipos de texturas de intercrecimiento, bordes irregulares, texturas gráficas y mimerquíticas, incluyendo crecimientos vermiculares (**Figura 16 C-D; Figura 18 C-D**). Pueden estar diseminados en vetillas, junto con cuarzo poligonal, rellenando amígdalas o formando pseudomorfos. Localmente, la bornita presenta reemplazos de covelina en microfracturas y relictos de pirita en su interior. Además, este arreglo suele estar asociado con bitumen, con el cual puede ser coetáneo o posterior (**Figura 16 C-D**).

La calcopirita rellena vetillas junto a bornita conformando arreglos en forma de cesta, los cuales son reemplazados desde los bordes por enargita y localmente por covelina. En algunas zonas el reemplazo de bornita por calcopirita y enargita es completo (**Figura 18E-F**).

### 5.1.3.5 *Secuencia Paragenética*

En Manto Cobrizo la mineralización es netamente hipógena. La escasa covelina y el bitumen con matices rojizos (**Figura 16A**), son los escasos indicios de un evento supérgeno. La mineralización hipógena se puede dividir en dos etapas: i) mineralización pre-mena, la cual consta de bitumen y pirita con un evento previo a coetáneo de calcita, clorita, ceolita, cuarzo, sericita y ii) mineralización principal caracterizada por la asociación bornita-calcosina.

**Tabla 6:** Secuencia Paragenética Manto Cobrizo. Grosor de las líneas indica abundancia relativa, línea punteada probablemente fue un evento continuo. A=Amígdalas, V=vetillas, Incl=inclusiones, R=Reemplazo, F=fracturas, MF=masa fundamental



## 5.2 Micro-análisis SEM

### 5.2.1 Composición del Bitumen

Los análisis se realizaron en 137 puntos, correspondientes a bitúmenes provenientes de 17 muestras representativas. El tiempo de conteo en general fue de 60 segundos, con excepciones de 100 segundos. Un punto importante que destacar es el método analítico utilizado, SEM-EDS, es semi-cuantitativo, obteniéndose rangos aproximados de concentraciones de elementos, con un límite de detección de alrededor 0,1 wt.% (1000 ppm.). Estos análisis, si bien no permiten cuantificar las concentraciones, permiten realizar un barrido exploratorio de las composiciones elementales presentes en el bitumen.

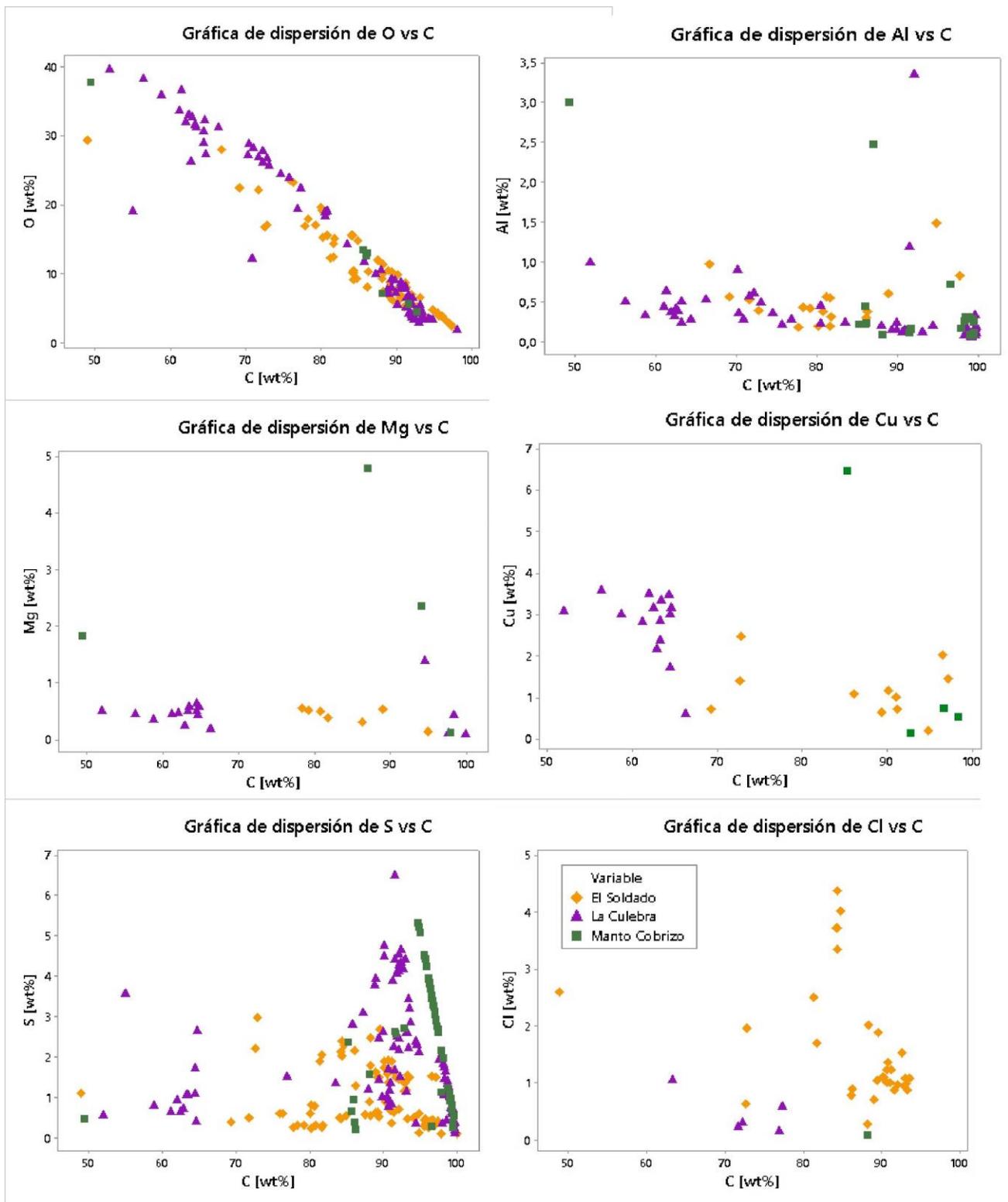
Los elementos detectados en bitumen de todos los depósitos estudiados, sin contar el C y O, son los siguientes: Na, Mg, Al, Si, S, Ca, Fe, Cu, y Cl. En general, estos elementos se encuentran en bajas concentraciones, en muchos casos menores al límite de detección. Sin embargo, en algunos puntos específicos del análisis estos sobrepasan el 10 wt%.

Casos particulares de elementos detectados son: K, Mn, Zn, Pb, N en El Soldado y K, N en La Culebra. Es importante destacar que todos los análisis SEM-EDS se realizaron en superficies de bitumen homogéneas, las cuales carecían de inclusiones minerales.

A parte del C y O, el elemento que aparece en la mayoría de los puntos analizados, y a veces el único detectado, es el azufre (S), el cual puede alcanzar concentraciones de hasta un 4,72 wt.%. El Si y el Al son los elementos más abundantes después del C, O y S, variando entre los 0,01 a 5,68 wt. % y los 0,02 y 3 wt. %, respectivamente. Con menor frecuencia (menos de 90 puntos) se encuentra un segundo grupo de elementos constituido por: Cl, Cu, Na, Mg y Ca, cuyos valores varían entre 0.02 y 6,58 wt%.

Los elementos con concentración promedio mayor a 1 wt. % son: Cu (2,0 wt. %), Fe, (1,9 wt.%) Cl (1,43 wt. %) y S (1,69 wt. %).

El bitumen es materia orgánica sólida remanente, por lo cual la mayor fracción de su composición corresponde a carbono. Para determinar si existe relación o diversidad de poblaciones entre los elementos detectados y su componente mayoritario se realizaron una serie de diagramas de correlación para el total de datos obtenidos (**Figura 19; Anexo D**). Se observa una marcada tendencia de que, a mayor cantidad de C, hay menor cantidad de O, algo similar se tiene para el Al, aunque de forma menos clara. Los datos de Cu y Mg se separan en dos grupos. El S, el Cl y el Fe, también forman dos poblaciones, aunque con una tendencia menos marcada. El Na, Ca y Si no presentan una correlación significativa.



**Figura 19:** Diagramas de dispersión de elementos detectados en bitumen mediante SEM-EDS, graficados en función del contenido de carbono. Rombos amarillos corresponde al depósito El Soldado, triángulos morados al depósito La Culebra y cuadrados verdes al depósito Manto Cobrizo.

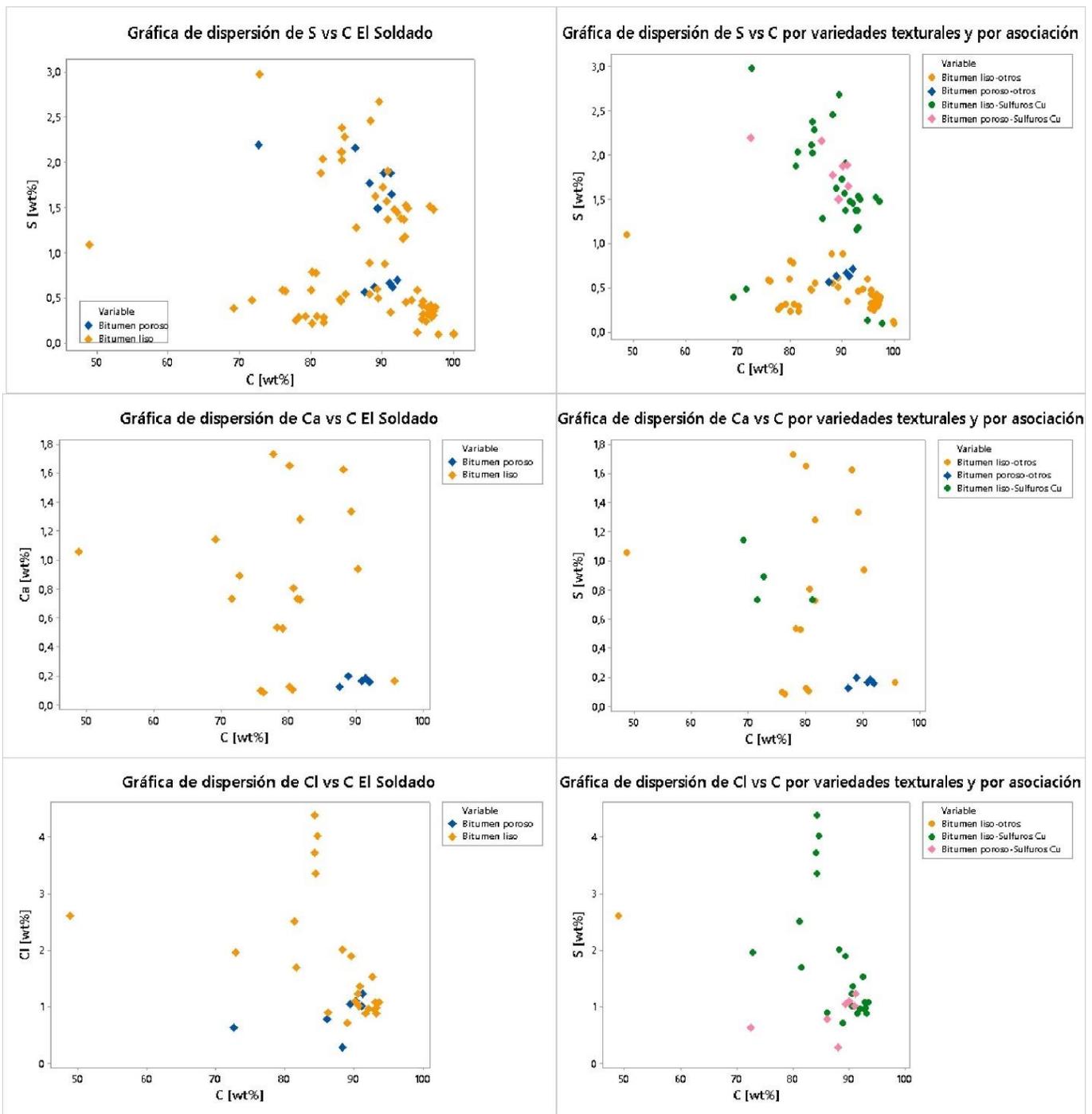
Para El Soldado, fue posible obtener datos SEM-EDS para bitumen liso y bitumen poroso. Este último presenta solo S, Ca, Cu, Cl, Fe, y en casos puntuales Si, Al y Na. Se realizaron diagramas de correlación entre variedades de bitumen (**Figura 20**), en los cuales destaca que Ca se separa en dos grupos, donde solo en uno está presente la variedad porosa. Lo mismo sucede con Cl. El Cu y el Fe no presentan una tendencia significativa, ya que se tienen pocos datos. Por otro lado, el S presenta dos grupos donde se incluyen ambas variedades de bitumen.

Al agrupar cada variación textural de acuerdo con la fase mineral con la que está asociada, se observa que el bitumen asociado a sulfuros de Cu (bornita para el caso de bitumen liso y calcopirita para bitumen poroso), presenta mayor concentración de S, con algunas excepciones para bitumen liso, que bitumen asociado a otras fases minerales, (calcita, cuarzo, etc.). Al observar los gráficos de Fe, Cu, Cl y Ca con esta división se observa que los tres primeros aparecen en el bitumen asociado a sulfuros de Cu y Ca cuando calcita acompaña al bitumen.

Wilson (2000) observa tendencias similares en su análisis elemental utilizando técnicas de microsonda electrónica (EMPA). El bitumen asociado con calcita, por lo general incorpora Ca y bitumen asociado a sulfuros incorpora significativa cantidad de Cu, Fe, Pb, S y Cl. Además, sugiere que Ca, Na, Mg, y Al probablemente representan material de la roca huésped que fue incorporado durante la migración del petróleo.

En resumen, bitumen está compuesto principalmente por C, O, con menor cantidad de S, y cantidad variable de otros elementos, con la particularidad que cuando el bitumen está asociado a sulfuros de cobre, este se enriquece en Cl, Fe, Cu y S y Ca cuando está asociado con calcita. Esto permite sugerir una interacción entre bitumen y fluidos hidrotermales modificando su estado original.

Los resultados de los análisis puntuales efectuados en bitumen, mediante SEM se presentan en el Anexo B.



**Figura 20:** Diagramas de dispersión de elementos detectados en bitumen mediante SEM-EDS para El Soldado. En la columna izquierda se despliegan las gráficas separadas por variedad textural, donde rombos amarillos corresponden a bitumen liso y rombos azules a bitumen poroso, mientras que a la derecha las gráficas se separan por variedad textural y asociación mineral. Rombos amarillos corresponden a bitumen liso no asociado a sulfuros de cobre, rombos verdes a bitumen liso asociado a sulfuros de cobre, rombos azules a bitumen poroso no asociado a sulfuros de cobre y rombos rosados a bitumen poroso asociado a sulfuros de Cu.

### 5.2.2 Mapas de elementos mediante espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS)

En esta sección se muestran mapas de distribución de elementos detectados en bitumen mediante SEM-EDS.

Los mapas, presentados en la Figura 21, presentan escalas cualitativas (relativas) de concentración. La totalidad de éstos se puede observar en el Anexo C.

La muestra MTCUL2C, se caracteriza por presentar bitumen en amígdalas, por lo general asociado a piritita con fracturas rellenas de covelina, cuarzo o calcita. La **Figura 21** muestra mapas de C y O, elementos de mayor composición en el bitumen. Le siguen el Al, Cl, Fe y S, los cuales se encuentran distribuidos homogéneos en la superficie del bitumen.

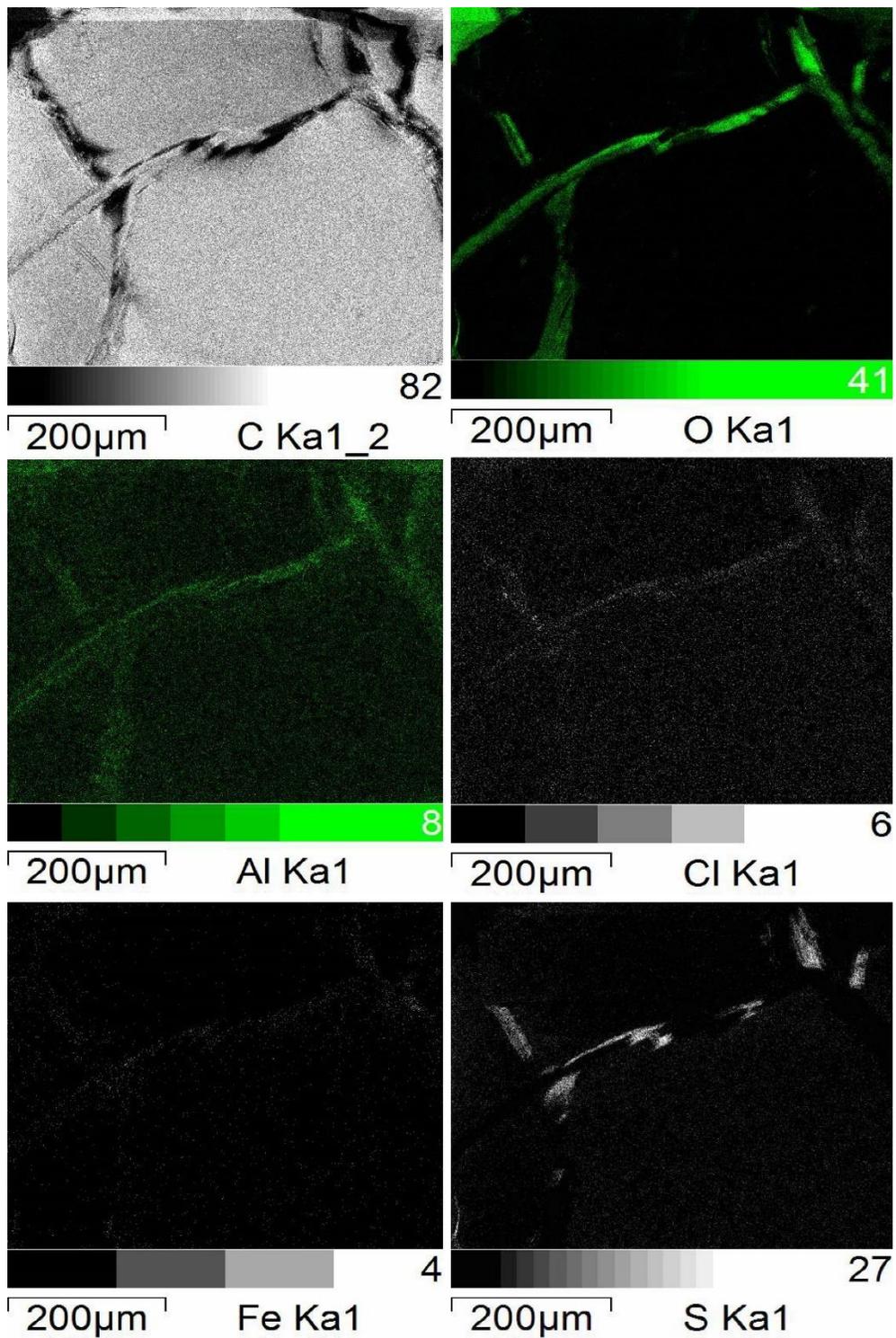
Menos frecuentes de observar en mapas de bitumen son Si, Na, Ca y K los cuales cuando son visibles en bitumen presentan una casi distribución homogénea en bitumen. El Cu no es visible en los mapas, indicando que está bajo el límite de detección.

El O, Si y Ca también suelen presentarse concentrados en puntos, donde se acoplan entre ellos, indicando inclusiones minerales de cuarzo y calcita en respectivamente.

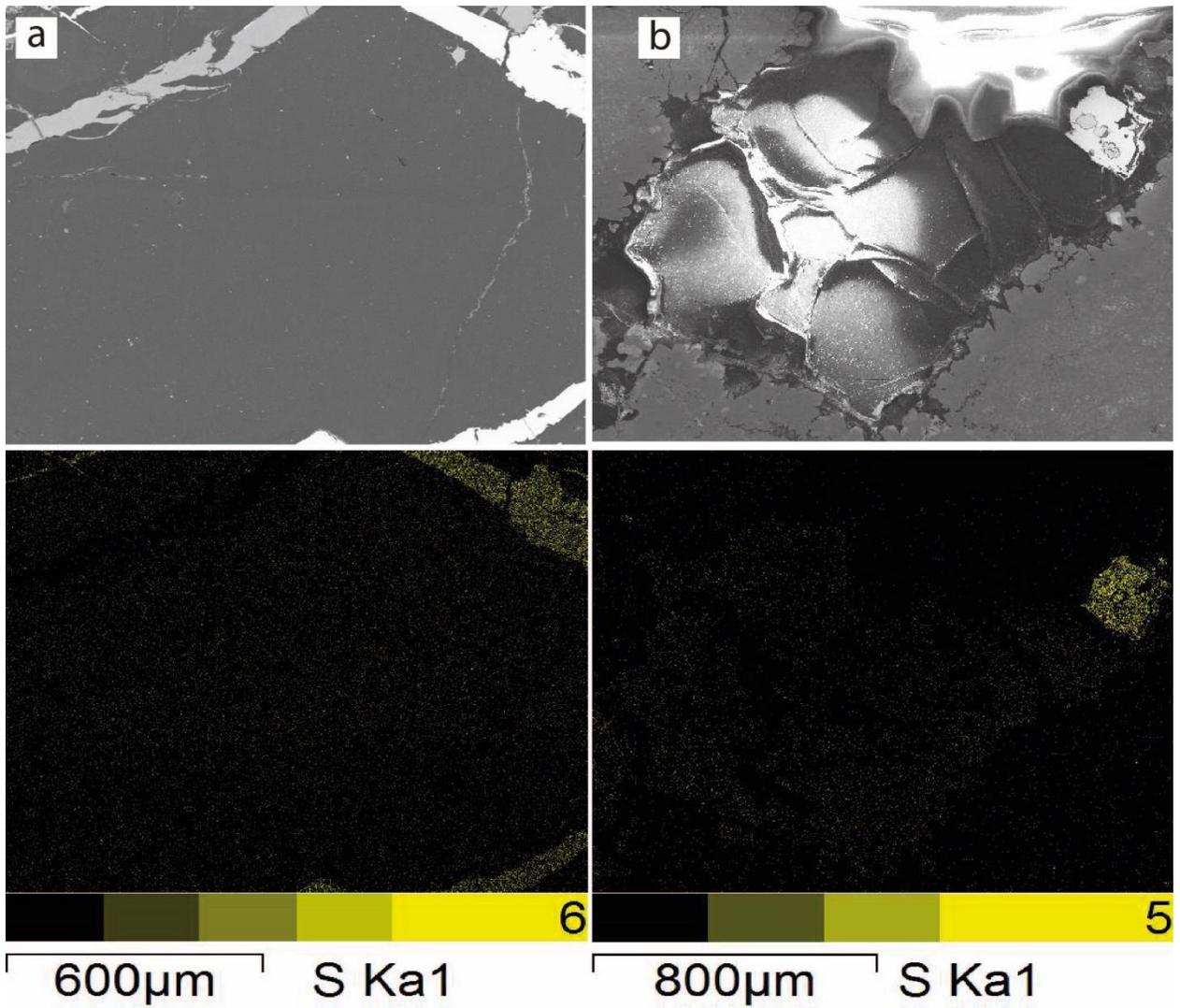
El S es un elemento frecuentemente detectado en los mapas realizados, y en general se distribuye homogéneo en bitumen. Se detectan mayores concentraciones de este cuando está asociada a algún sulfuro de cobre, lo que se visualiza en un mapa con mejor contraste. Si hay mayor concentración fuera de bitumen, por ejemplo, en las fracturas, indica la presencia de algún sulfuro (**Figura 21, Figura 22**)

En la muestra NW46-1 se tiene bitumen liso con fracturas rellenas de calcita y bornita en este se identificaron microfracturas donde el C se encuentra más concentrado y el Cl presenta una disminución respecto a la superficie del bitumen.

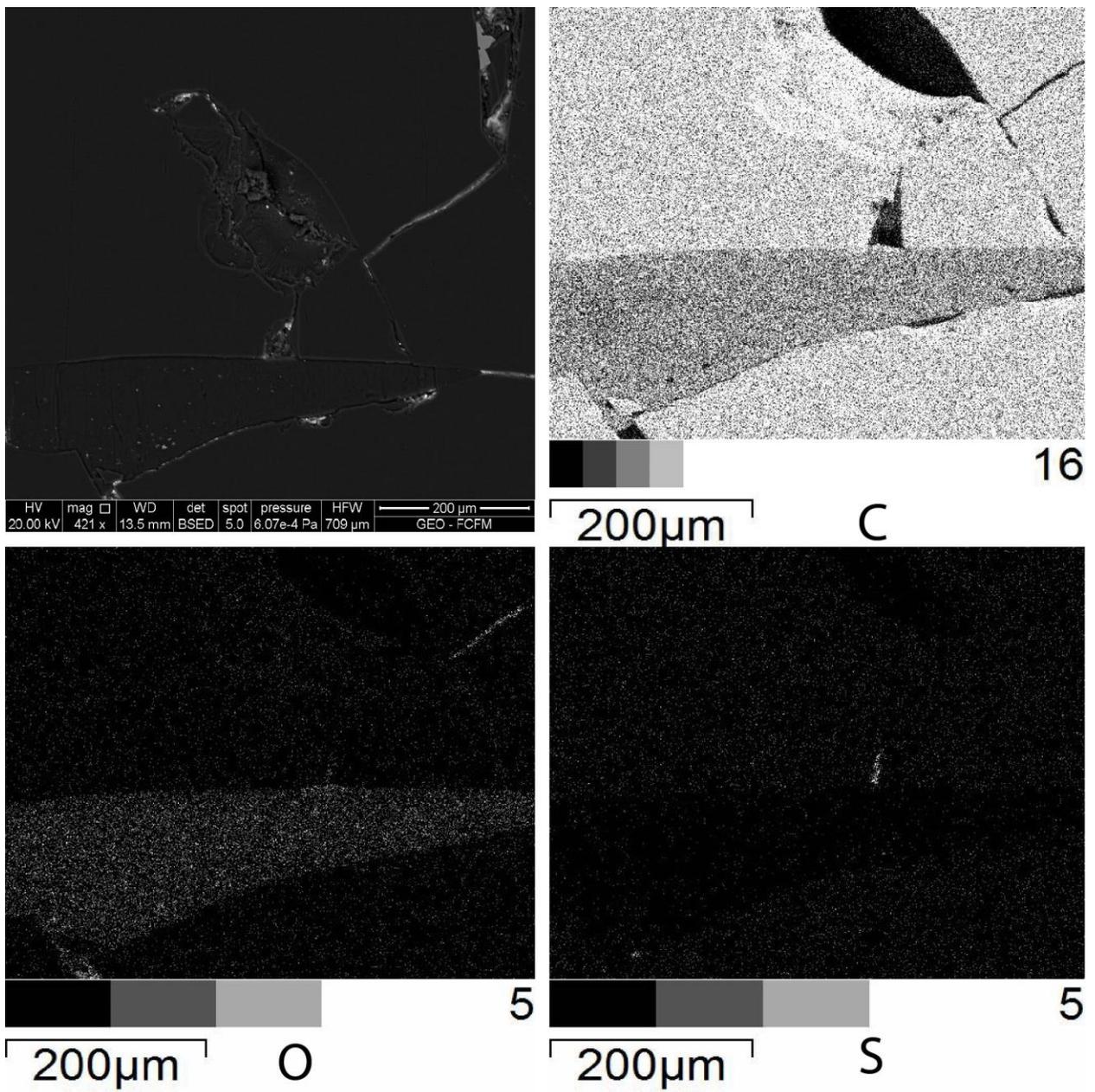
Al comparar las variedades texturales de bitumen se tiene que bitumen liso concentra más C y S que bitumen poroso, el cual concentra más oxígeno, además presenta cuarzo en sus poros (Si+O) (**Figura 23**).



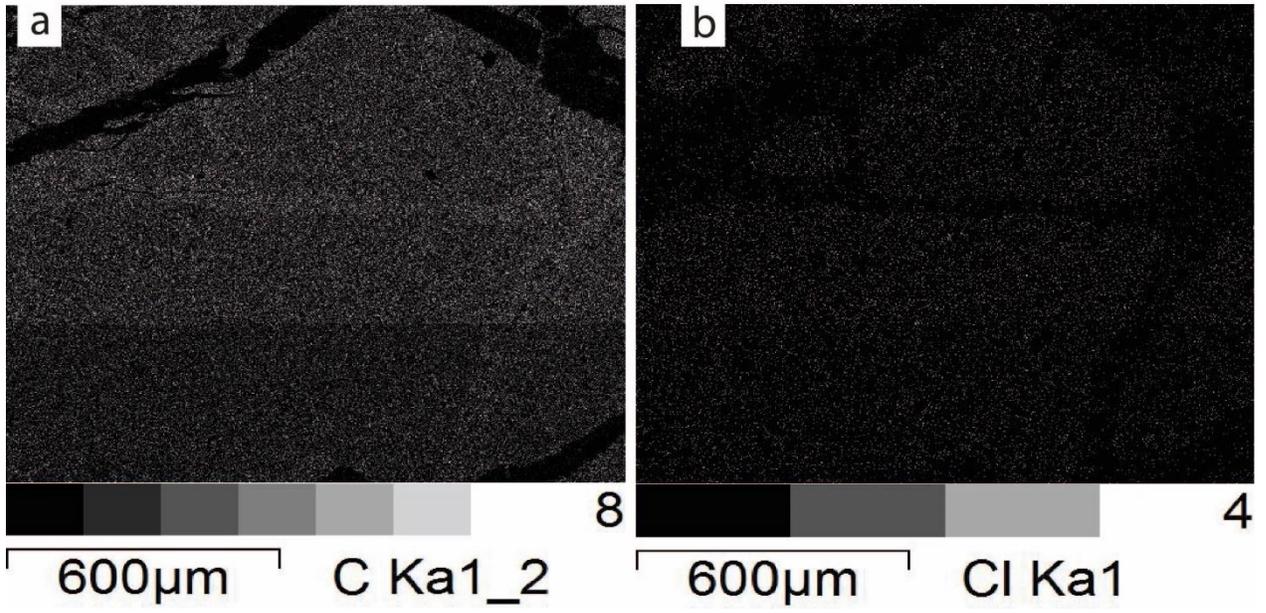
**Figura 21:** Mapa SEM-EDS que muestra la distribución de C, O, Al, Cl, Fe, S en bitumen. Muestra MTCUL2C, La Culebra.



**Figura 22:** Mapa de distribución de elementos para S en bitumen, obtenido mediante SEM-EDS (paneles inferiores). Se muestra en los paneles superiores una imagen SEM del grano analizado. (a) Bitumen asociado con bornita y calcita, presenta distribución homogénea en bitumen. Muestra NW46-1, El Soldado. (b) Bitumen asociado con calcopirita, presenta distribución homogénea en bitumen. Muestra MTCUL1A-G, La Culebra.



**Figura 23:** Mapas de distribución de elementos C, O, y S en bitumen liso y bitumen poroso, obtenidos mediante SEM-EDS. Muestra NW39, El Soldado.



**Figura 24:** Bitumen con microfracturas, las cuales se encuentran enriquecidas en C(a) y empobrecidas en Cl(b). Muestra NW46-1. El Soldado.

## 6 DISCUSIONES

### 6.1 Generalización y Comparación entre las áreas de estudio

#### 6.1.1 Bitumen

El bitumen asociado a la mineralización de mena se encuentra presente en los tres depósitos estudiados. Su ocurrencia se asocia a porosidad primaria, que incluye amígdalas y poros, y porosidad secundaria, la que se relaciona con vetillas, fracturas, poros, relleno de espacios de brecha. La primera es común en La Culebra, mientras que la segunda lo es en El Soldado. En Manto Cobrizo el bitumen se encuentra tanto en amígdalas y vetillas, además aparece relleno de fracturas de minerales como clorita, plagioclasa, cuarzo. Comúnmente está asociado con calcita y con sulfuros de Fe y Cu.

Morfológicamente dos tipos de bitúmenes pueden ser identificados: i) Bitumen anhedral anguloso y ii) Bitumen anhedral redondeado o globular. Ambos se encuentran agrietados y una tercera variedad aparece en La Culebra, que corresponde a bitumen relleno de fracturas de clorita, pirita o de la roca caja.

Texturalmente, se distinguen dos variedades: i) Bitumen liso o uniforme, en ocasiones con fracturas o inclusiones minerales y ii) Bitumen no uniforme con poros irregulares o redondeados. Éstos en ocasiones estas pueden estar rellenas con minerales, por lo general de ganga como: pirita, calcita o cuarzo, en ocasiones por sulfuros de cobre como calcopirita o calcosina (**Figura 10B; Figura 11B**), también puede presentar fracturas. Estos poros son interpretados por algunos autores como estructuras de desgasificación (Haggan et al., 2003; Wilson y Zentilli, 1999).

Las observaciones petrográficas expuestas en el capítulo anterior permiten concluir que el bitumen es previo a la mineralización de cobre. Sin embargo, en El Soldado y Manto Cobrizo se identifica un evento o input de bitumen que está relacionado con bornita, y que pareciera ser coetáneo o incluso posterior respecto al ingreso principal de bitumen, similar a lo observado en el distrito Melipilla-Naltahua (Carrillo-Rosúa et al., 2014).

En los depósitos estudiados, la mineralización de Cu y el bitumen asociado se encuentran hospedados en rocas volcánicas (andesitas porfídicas, brechas andesíticas o incluso riolitas). Considerando que la ocurrencia de bitumen se relaciona a porosidad primaria y porosidad secundaria, se deduce que el ingreso de la materia orgánica a la roca hospedante se realizó por migración desde una roca fuente rica en materia orgánica, por lo que su origen es alóctono. De acuerdo con las relaciones texturales observadas para cada depósito, esta migración se habría realizado en uno o más inputs.

## 6.1.2 Etapas de formación

La mineralización en El Soldado, La Culebra y Manto Cobrizo presenta similitudes con otros depósitos chilenos estratoligados Cu-(Ag) (Kojima et al.,2009; Makshev y Zentilli,2002). Esta corresponde principalmente a: calcopirita, bornita y calcosina, donde estos dos últimos por lo general presentan en texturas de intercrecimiento. En menor cantidad se tiene covelina y digenita. Los tres depósitos estudiados presentan una mineralización hipógena y una limitada mineralización supérgena, caracterizada por covelina y/o hematita y/o crisocola. La pirita euhedral es común en todos los depósitos estudiados, mientras que su forma framboidal es detectada solo en El Soldado, cuya formación se atribuye a una etapa de diagénesis por reducción bacteriana de sulfato en un sistema semi-cerrado, también reportada en el distrito Melipilla-Naltahua, de igual origen, pero en un sistema abierto (Carrillo-Rosúa et al.,2014). Sin embargo, tanto en La Culebra y Manto Cobrizo se detectan calcopiritas con sobrecrecimientos que reemplazaron piritas previas (**Figura 18A**), además piritas euhedrales se observan asociadas a directamente con bitumen (**Figura 16A; Figura17B; Figura 14C; Figura 15C**), o se encuentran creciendo sobre piritas previas, (**Figura 17D**), indicando un posible origen diagenético (Machel, 1995)

Los minerales de alteración corresponden a clorita, calcita, cuarzo, pirita, zeolitas (ricas en Ca), prehnita, albita y epidota, los que se corresponden con los siguientes tipos de alteración: albitización de plagioclasas, cloritización, alteración propilítica, alteración sericitica y carbonatación. Sin embargo, el grupo de fases minerales presentes hacen difícil distinguirlos del metamorfismo regional. Algunos autores asocian minerales presentes en amígdalas a metamorfismo regional (Boric et al., 2002; Cisternas y Hermsilla 2006) y minerales en masa fundamental o reemplazando minerales a alteración de carácter hidrotermal.

Dada las similitudes en la mineralización y los minerales de alteración, es posible establecer una secuencia paragenética general, la cual se divide en dos etapas: i) mineralización hipógena y ii) mineralización supérgena.

i) Mineralización hipógena: Esta etapa se puede dividir en dos subetapas, la primera de pre-mena, ya que es previa a la formación de los sulfuros de cobre, y estaría relacionada al emplazamiento del hidrocarburo líquido en estructuras primarias y secundarias, seguida por su solidificación y de un episodio de metamorfismo regional de muy bajo grado. La formación del bitumen sería coetánea con la formación de pirita, ya sea framboidal o euhedral, y en estadios más tardíos puede estar acompañado por esfalerita (a través de un segundo input de hidrocarburos). La formación del bitumen en la roca huésped puede ser precedido o acompañado por un fluido hidrotermal y/o de origen metamórfico, que precipita clorita ± calcita ± cuarzo ± zeolitas. Estos minerales también pueden estar asociados e intercrecidos con bitumen y/o pirita (La Culebra, Manto Cobrizo).

La segunda sub-etapa, de mineralización principal de cobre, consiste en la precipitación de sulfuros de cobre. El primer indicio de esta sub-etapa sería la aparición de calcopirita en esfalerita, o el reemplazo de pirita previa por calcopirita. Gradualmente, se tiene un aumento en la proporción de Cu en el sistema, dando paso a la formación de bornita y calcosina, los cuales en la mayoría de los casos suelen ser la mena principal de Cu y por lo general se encuentran formando texturas de reemplazo, mimerquítica o de intercrecimiento.

En estudios anteriores (Wilson,1998; Boric et al., 2002; Cisternas y Herмосilla 2006) se concluye que el bitumen es previo a la mineralización de cobre. En general esto es concordante con lo observado en este estudio; sin embargo, aquí se plantea la posibilidad de distintos inputs o ingresos de hidrocarburos, donde el último de estos se relaciona con la mineralización de bornita (El Soldado, Manto Cobrizo), involucrándose al inicio de esta subetapa, similar a lo observado en el distrito Melipilla-Naltahua y La Serena, donde pirobitumen es depositado entre dos asociaciones distintas de sulfuros de cobre y está relacionado con la asociación bornita-djurleita (Carrillo-Rosúa et al.,2014).

i) Mineralización supérgena: Esta etapa de mineralización suele ser de extensión limitada e incluso puede no estar presente. Cuando se desarrolla suele haber covelina, digenita formada por reemplazo de bornita-calcosina o calcopirita y hematita, que aparece en microfracturas de bornita, además de óxidos de cobre como crisocola y azurita (La Culebra), los cuales suelen encontrarse en fracturas de la roca huésped o diseminados en la masa fundamental.

## 6.2 Caracterización de las etapas

Las observaciones realizadas permiten, a grandes rasgos, reconocer al menos tres pulsos o eventos de mineralización, los cuales están presentes en los tres depósitos estudiados: un primer pulso rico en hierro y azufre, relacionado a la sub-etapa pre-mena definida anteriormente, seguido de un segundo evento rico en cobre, relacionado a la sub-etapa de mineralización principal. Un tercer evento postmineralización genera las asociaciones minerales supérgenas. De estos tres pulsos, los primeros dos estarían íntimamente relacionados con la presencia y/o ingreso de hidrocarburos al sistema (**Tabla 4; Tabla5; Tabla 6**).

La subetapa de pre-mena, en todos los depósitos estudiados, se caracteriza por la presencia de sulfuros de hierro (pirita) y bitumen. Las relaciones texturales de corte sugieren la ocurrencia de un evento previo a la introducción de los hidrocarburos. Esto también fue visto por Haggan et al. (2003) en La Culebra y Manto Cobrizo, y consiste en clorita, calcita, cuarzo  $\pm$  zeolitas en, asociación que indica facies ceolita. Posteriormente se presenta clorita, calcita con prehnita, pumpellyíta e incluso epidota o escapolita, indicando facies de prehnita-pumpellyíta y transicional a esquistos verdes (o alteración propilítica). La primera se relaciona con temperaturas hasta 100°C y la segunda temperaturas hasta 300°C, lo que implica que hubo un aumento gradual de la temperatura que alcanzó los 200-300 °C.

La presencia de pirita y otros minerales como cuarzo y calcita en el bitumen sugieren que éste aún no estaba sólido al momento de su formación, luego de migrar como una fase líquida. Algunos autores consideran a las texturas no uniformes de bitumen, poros irregulares o redondeadas como evidencia de su entrapamiento como petróleo líquido (Cisternas et al.,1999; Wilson & Zentilli, 1999; Wilson 2000).

La formación y migración del bitumen comienza a gestarse cuando el querógeno producto de enterramiento de la roca generadora alcanza la temperatura de generación del petróleo, cuya estabilidad se encuentra en un rango de temperaturas entre 60 y 120°C (North, 1985). El petróleo se va generando gota a gota en los poros de roca generadora, estas coalescen, son expulsadas, junto con agua connata (Wilson, 2000) y migran. Dado que los depósitos estratoligados ocurren en un contexto de cuenca de intra-arco, es probable que la solución heterogénea petróleo líquido-agua connata se haya encontrado con otro fluido (aguas meteóricas y/o fluido de cuenca) para desencadenar el proceso de biodegradación, aportando los microorganismos y/o iones metálicos.

La biodegradación del petróleo por reducción de sulfatos genera como productos CO<sub>2</sub>, bitumen, sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S), sulfuros de metales base (pirita y esfalerita) y carbonatos (Machel, 1997). La estabilidad de este proceso ocurre a temperaturas menores a 90°C y en pH entre 5 y 9,5 (Postgate,1984; Leavy et al.,1997). Dado que este proceso se superpone con la estabilidad del petróleo, la temperatura de cuando este se emplazó en la roca huésped debería ser <90°C. Sin embargo, de acuerdo con la evidencia de paragénesis minerales no sulfuradas hubo un aumento gradual de la temperatura, esto sumado a diversos inputs de bitumen, sugieren fluidos de distinto origen, que en algún punto se mezclaron, alterando el equilibrio y precipitando minerales que crecen intercrecidos con bitumen.

Independiente de su morfología y/o textura, la pirita se encuentra frecuentemente incluida dentro del bitumen (**Figura 10B; Figura 14C; Figura 17B-E**), sugiriendo que se formó mientras éste aún no estaba sólido (Wilson,1998). También es posible encontrarla fuera del bitumen (**Figura 11C; Figura 17D**), sugiriendo que petróleo líquido ingresó acompañado por un fluido acuoso rico en hierro, acompañado de Zn y Ca, los cuales reaccionan con H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> para formar esfalerita y calcita, respectivamente, en vetillas y/o amígdalas. El origen de los metales de este fluido puede atribuirse a lixiviación de roca caja y/o fuente, ya que algunos elementos presentes en el bitumen también están presentes en las andesitas (análisis de roca total, Boric et al 2002; Cisternas et al. 1999). Esto podría ser consecuencia del paso de un fluido acuoso ácido que precede a la migración de los hidrocarburos, y que se genera, producto de la gran cantidad de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S generados por biodegradación (Mazullo y Harris,1991).

La formación de la morfología framboidal de la pirita presente en El Soldado (**Figura 10B; Figura 11C.**) se asocia a fases tempranas de diagénesis, como producto de reducción de sulfato por acción bacteriana (Wilson, et al.,1998; 2003), similares condiciones se le atribuyen en el distrito Melipilla-Naltahua (Carrillo-Rosua et al., 2014). También se plantea su formación cuando las condiciones de sobresaturación en pirita son muy altas y la velocidad de nucleación es mayor que la velocidad de crecimiento cristalino (Coleman y Raiswell, 1995; Ohfuji y Rickard, 2005). La ausencia de pirita framboidal en La Culebra y Manto Cobrizo, se explicaría por diferencias en las condiciones ya mencionadas, favoreciendo la formación de otras morfologías, como pirita euhedral (**Figura 14C; Figura 17B-E**), las que podrían ser una modificación de pirita framboidal (Love y Amstutz,1966), ya que su formación puede deberse a un mismo proceso, pero con un grado distinto de bioturbación o con menor concentración de sulfato disuelto (Borrego et al., 2003; Coleman y Raiswell, 1995). Un aspecto para destacar es que los framboides están formados por aglomerados de pirita euhedral de tamaño micrométrico.

Una secuencia de cambio en la morfología de piritas se observa en los tres depósitos, donde la piritita presenta un sobrecrecimiento a partir de morfologías previas, esto tiene lugar cuando hay un contacto continuo entre la superficie de los microcristales de piritita con una solución que contenga los solutos necesarios ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ) (Wilkin et al., 1996;1997; Borrego et al., 2003), por lo cual piritita framboidal pudo haber sido completamente reemplazada. Posibles indicios de esto se observaron localmente en pirititas de La Culebra.

Cerrando esta primera sub-etapa, que marca la introducción de hidrocarburos líquidos y posterior formación del bitumen junto a piritita y esfalerita, se da paso a la segunda sub-etapa, la cual se plantea aquí que comienza con presencia de calcopiritita en esfalerita (**Figura 13A**). Dicho proceso de exsolución indicaría un descenso en la temperatura del sistema, por lo que se sugiere que el peak metamórfico sería previo a la etapa mineralización principal de cobre en estos depósitos.

La segunda sub-etapa se relaciona al ingreso de fluido(s) hidrotermal(es) con alta concentración de cobre. Esto genera un reemplazo secuencial de sulfuros ricos en hierro, piritita y calcopiritita, por sulfuros ricos en cobre, bornita y calcosina. Esta sucesión mineralógica indica un aumento gradual de Cu en los sulfuros. Además, la asociación de bitumen liso con bornita, por lo general de primera generación (Bornita I), observada en El Soldado y Manto Cobrizo, permite concluir que la formación de bitumen se extendió hasta el inicio de la mineralización de cobre, y que ésta probablemente ocurrió en diferentes pulsos, siendo el más importante el primero de ellos.

Las texturas vermiculares/mimerquíticas entre bornita y calcosina, al igual que las exsoluciones de calcopiritita en esfalerita, indican un descenso en la temperatura. Finalmente, la presencia de djurleita y/o anilita (la existencia de esta última se debe corroborar mediante análisis cuantitativos) indicarían temperaturas menores a  $100^\circ\text{C}$ , rango donde éstas son estables (Barnes, 1997).

La etapa de post-mineralización o supérgena se caracteriza por covelina, escasa digenita, hematita, que aparecen como reemplazo en borde de bornitas y calcosinas, covelina localmente en La Culebra presenta textura coliforme (**Figura 15C**) y crisocola, esta última indicaría la presencia de un fluido ácido y oxidante (Newberg, 1967). El cuarzo aparece como la ganga principal. La hematita se formaría por una alta concentración de Fe, cuya fuente puede ser el reemplazo de bornita por calcosina que deja libre este elemento.

Estudios de microtermometría de inclusiones fluidas en calcita, señalan temperaturas de homogenización de entre  $93$  y  $303^\circ\text{C}$  para El Soldado y entre  $116$  a  $404^\circ\text{C}$  para los depósitos en el Metalotecto Ocoita Pabellón (Holmgren, 1987; Klohn, 1990; Cisternas y Hermosilla, 2006), evidenciando cuantitativamente un aumento de temperatura durante la etapa hipógena. En el caso de La Culebra y Manto Cobrizo, la temperatura estimada es mayor a la estabilidad de la facies prehnita-pumpellyíta. Considerando que no hay minerales metamórficos asociados a facies de mayor temperatura, se estima que el input de temperatura fue producido por otro proceso, como, por ejemplo, producto del emplazamiento de intrusivos (Boric et al., 2002).

### 6.3 Metales en bitumen

El bitumen es materia orgánica termalmente madura y se forma a partir de querógeno, por lo cual consiste en una mezcla de hidrocarburos, principalmente aromáticos y asfaltenos, formados principalmente por C y H (García-Cruz y Aguirre-Macedo, 2014). En menor proporción, el bitumen está compuesto por O, S y N, que se encuentran en asfaltenos, tioles (mercaptanos) y piridinas, respectivamente (Salleh et al., 2003)

Los elementos con mayor frecuencia detectados en el bitumen en este estudio coinciden con lo anterior. Independiente de la morfología del bitumen, se tiene una alta proporción de C y O, y una apreciable concentración de S que está presente en casi todos los puntos analizados. El N se detecta solo en tres puntos. Sin embargo, su porcentaje en peso supera el 10 %.

Los demás elementos detectados en todos los depósitos corresponden a: Si, Al, Ca, Na, Mg, Cl, Cu, Fe. De éstos, el Al, Ca, Cu y Fe, junto a Ni y V se han detectado en petróleo líquido, querógeno y bitumen en otras partes del mundo (Giordano, 2000). Esto podría indicar que existe una concentración inicial de estos elementos en el bitumen de los yacimientos estratoligados estudiados. Aunque las concentraciones no superan en ocasiones el 0,01 wt%, y por ende se encuentran por debajo del límite de detección del método utilizado en este estudio (SEM-EDS), es probable que el bitumen contenga, o en su defecto, haya contenido concentraciones relevantes de estos elementos, heredadas de la roca fuente, o incorporadas durante su evolución.

Las moléculas orgánicas se caracterizan por su capacidad para formar complejos con metales, especialmente con metales de transición y aluminio (White, 2005), por lo que probablemente el bitumen incorporó estos elementos desde que migró como petróleo líquido. Una fuente probable de estos metales puede ser la roca hospedante ya que contiene Si, Al, Na, Mg, Ca (Boric et al., 2002; Cisternas et al., 1999). Estos elementos podrían haber sido lixiviados e incorporados al hidrocarburo líquido, quedando en la estructura del bitumen tras la degradación de éste. Esto también explicaría la formación de minerales como pirita, cuarzo, calcita dentro de bitumen. Los metales también pudieron ser incorporados desde un fluido hidrotermal y/o fluido de cuenca que se mezcló con el petróleo líquido en algún momento de la evolución de los depósitos.

Algunos autores sostienen que elementos distribuidos de manera homogénea en mapas elementales indican que estos están presentes en la estructura del bitumen, bien o como nanopartículas (Fuchs et al., 2016; Wilson & Zentilli, 1999). Los mapas realizados muestran que el C, O, Si, Al, Na, Mg, Ca y el Cl, presentan dicha distribución (**Figura 24; Figura 24; Anexo C**). Sin embargo, la intensidad observada en los mapas realizados en muchos casos suele ser débil, por lo cual no se puede asegurar con certeza que esto sea pausable para todos los elementos ni discernir si es una tendencia general o son casos puntuales de que estos elementos fueron incorporados a bitumen.

Un caso particular es el S, el que fue detectado en todos los mapas elementales realizados (**Figura 25; Figura 22**). El S en dichos mapas siempre se distribuye de forma homogénea en el bitumen, lo que apuntaría a la presencia de complejos de composición hetero-aromática (tiol y tiofenos) que son comunes en la fracción insoluble de hidrocarburos derivados de sedimentos

marinos bajo condiciones reductoras (Fuchs, 2014). Adicionalmente, análisis de geoquímica orgánica realizados en depósitos del Metalotecto Ocoita Pabellón, al cual pertenecen La Culebra y Manto Cobrizo, detectan un alto porcentaje de componentes tio-aromáticos (Rieger et al. 2008). También se han realizado análisis de isotopos de  $\delta^{13}\text{C}$  en dichos depósitos, los cuales presentan rangos entre -26 a -23,50 ‰ (Cisternas et al., 1999), mientras que en El Soldado los valores oscilan entre -30 a -27 ‰ (Wilson en Haggan et al, 2003). Estos valores son consistentes con un origen marino de los hidrocarburos (-31 a 25‰, Hunt, 1996).

Una particularidad detectada en el gráfico de correlación de O vs C es que a mayores cantidades de C se asocian a menor O (**Figura 26**). Una probable explicación a esto es que la materia orgánica pierde hidrocarburos livianos cuando aumenta la temperatura, y esto se traduce en primera instancia en una pérdida de hidrógeno, y de oxígeno en etapas avanzadas, aumentando la concentración de hidrocarburos pesados y con ello la concentración de carbono (Wilson, 2000). Esto también se puede ver reflejado en el aumento de S, donde en La Culebra se observa claramente que a mayor cantidad de C hay también más S, ya que este también es característico de hidrocarburos pesados.

Al considerar la variación textural del bitumen, se tiene que el bitumen liso es más rico en Ca, Cl y S que bitumen poroso. Además, en los mapas de elementos se observa que el bitumen liso concentra mayor cantidad de C y S que el bitumen poroso (**Figura 27**). Si se toma en consideración la mineralogía asociada al bitumen, se distingue una población enriquecida en S, en la cual el bitumen se encuentra asociada con sulfuros de cobre, siendo la variedad textural lisa la que presenta los valores más altos (**Figura 28**). La variedad porosa, también registra un enriquecimiento, aunque menos significativo. Además, se observa que el Cl y Cu tienden a ser detectados cuando ambas variedades de bitumen están asociadas con sulfuros de Cu. Algo similar se observa para el Fe, pero son pocos los datos que se tienen para definir una tendencia.

Dado lo anterior, se tiene que independiente de la variedad textural del bitumen, si éste está texturalmente relacionado con sulfuros de cobre suele contener cantidades medibles, mediante SEM-EDS, de Cu, Cl, Fe y S.

El bitumen, al incrementarse la temperatura durante la evolución de los depósitos, presenta cambios en sus propiedades ópticas, pasando de isotrópico a anisótropo (Cisternas et al., 1999). Esta alteración física, producto de fluidos de alta temperatura, podría causar una alteración química (Gize, 1999; Wilson & Zentilli, 1999). Dicha alteración podría verse reflejada en la composición del bitumen, siendo responsable del ingreso de Cu, Cl, Fe, S y los otros elementos a la estructura del hidrocarburo sólido.

Respecto a cómo fueron transportados estos elementos, la presencia de Cl y sus características como ligante sugiere que éste elemento pudo haber transportado los metales como complejos clorurados en fluidos hidrotermales. En cuanto a la fuente de estos, se sugiere nuevamente lixiviación de roca, ya que estos se encuentran en roca hospedante.

## 6.4 Rol del bitumen

Leventhal y Giordano (2000) proponen una serie de criterios que se deben cumplir para asegurar el rol que tiene la materia orgánica en un depósito.

En los tres depósitos estudiados, se observa que los sulfuros de cobre se asocian con bitumen en amígdalas o vetillas (**Figura 13D; Figura 16A**), suelen cortarlo (**Figura 10D; Figura 15C; Figura 16C**), aunque en el caso de la Bornita puede estar intercrecido con éste (**Figura 16D**). El bitumen enriquecido en Fe, Cu y Cl suele estar asociado a sulfuros de cobre y también suele tener una mayor concentración de S. Además de acuerdo a lo observado en mapa de elementos y la composición de hidrocarburos obtenida por Rieger et al. (2008) el S en bitumen indicaría la presencia de complejos de composición hetero-aromática, entre estos los grupos tiol y tiofenos son radicales con presencia de S, que tienden a oxidarse (Weininger & Stermitz, 1988), lo cuales otorgan al bitumen la cualidad de actuar como agente reductor, oxidándose y proporcionando H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, dando lugar a que metales reaccionen con estos y precipiten. Todos estos antecedentes apuntan a que el bitumen probablemente tuvo un rol como agente reductor en la génesis de estos depósitos.

Dado que el bitumen tiene concentraciones anómalas de algunos elementos (ej. Cu, S, Cl), es probable que el bitumen haya actuado, además de “trampa redox” para la precipitación de sulfuros, como un agente pre-concentrador de metales y ligantes. Dicha pre-concentración podría haber ocurrido tanto desde la generación del hidrocarburo en la roca fuente, como durante su migración y/o posterior contacto con fluidos hidrotermales.

Estudios recientes han destacado el potencial de los hidrocarburos como medio de transporte de metales, formando complejos metálico-orgánicos (Migdisov, et al., 2017). Este es inferido, por ejemplo, por Fuchs et al. (2015), dada la presencia de metales y otras especies en bitumen asociado a yacimientos de uranio en Sudáfrica. El autor mencionado sostiene que elementos dispersos de igual modo en bitumen podrían haber sido transportados por un hidrocarburo precursor. El grupo enlazante, también pueden ser tioles, pero son las denominadas porfirinas, el cual suele formar complejos métalo-porfirinas, con elementos como Fe, Mg, metales encontrados dispersos en mapas de distribución de elementos en bitumen.

En resumen, el principal rol del bitumen depósitos estratoligados Cu (Ag) es actuar como agente reductor, fomentando la precipitación de sulfuros de cobre. De modo secundario se le puede atribuir un rol como concentrador y teorizar acerca de un rol como medio de transporte de metales y ligantes.

## 7 CONCLUSIONES

El presente trabajo reporta nuevos antecedentes acerca del rol de la materia orgánica sólida remanente (bitumen) en depósitos estratoligados Cu-(Ag) del centro-norte de Chile. Para ello, se estudiaron y compararon los depósitos de El Soldado en la V Región de Valparaíso, y los depósitos de La Culebra y Manto Cobrizo en la III Región de Atacama. Estos se encuentran hospedados en rocas volcánicas a volcanoclásticas de carácter principalmente andesítico (Formación Lo Prado y Formación Pabellón, respectivamente). Estos depósitos se formaron en un contexto de cuenca de intra-arco, y se caracterizan por presentar altas leyes de Cu y mineralización de sulfuros de cobre asociada a materia orgánica en forma de bitumen, la cual está controlada por porosidad primaria y secundaria y a escala mayor por estructuras maestras N-S y fallas menores E-W.

Los estudios de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) permitieron establecer que hay más de un input de materia orgánica y que en general ésta es previa a la mineralización de sulfuros de cobre, con un input de menor envergadura asociado a una primera generación de bornita. En los tres depósitos estudiados se distinguen, en general, dos etapas principales de mineralización. La primera etapa, de mineralización hipógena, se puede subdividir en dos sub-etapas, denominadas de pre-mena de y mineralización principal. La sub-etapa de pre-mena se caracteriza por la introducción de hidrocarburos al sistema, mientras que la sub-etapa de mineralización principal se caracteriza por la introducción de cobre al sistema. Esta última consta de calcopirita, bornita y calcosina. Finalmente, la mineralización concluye con una segunda etapa o fase supérgena, que presenta un desarrollo variable en los depósitos estudiados.

Dado lo anterior y las similitudes entre los depósitos se llevó a cabo una generalización de estos, consistente en dos etapas, una de mineralización hipógena que se subdivide en pre-mena y mineralización principal. La primera se caracteriza por la presencia de bitumen y sulfuros como pirita y esfalerita y la segunda por la aparición de sulfuros de cobre que van aumentando de modo gradual su contenido de cobre. La mineralogía de ganga revela que en la etapa pre-mena hubo un aumento gradual de la temperatura, el cual llega a un peak antes de la mineralización principal y disminuye en la parte final de la etapa de mineralización. La segunda etapa es de mineralización supérgena y es limitada, su desarrollo varía depósito a depósito, incluso puede no estar presente y se caracteriza por la presencia de covelina, escasa digenita, hematita y óxidos de cobre.

Los estudios de composición, distribución de elementos y graficas de correlación permiten definir que bitumen está compuesto principalmente por C, O y S, incorporando además cantidades relevantes de Si, Al, Ca, Na, Mg, Fe, Cu y Cl. El bitumen liso suele tener mayor cantidad de Ca, Cl y S que el bitumen poroso. Es importante resaltar que, independientemente de su variedad textural, el bitumen se encuentra enriquecido en Cu, Cl, Fe y S cuando está texturalmente asociado con sulfuros de cobre en todos los depósitos.

El rol principal del bitumen depósitos estratoligados Cu (Ag) es actuar como agente reductor, fomentando la precipitación de sulfuros, propiedad otorgada probablemente por los grupos tiol presentes en su estructura, los cuales tienden a oxidarse. En el bitumen se detectan una serie de elementos, por lo cual, de modo secundario podría haber actuado como concentrador de

metales. Además, dado que bitumen es una mezcla de hidrocarburos tiene potencial para formar complejos-metalo orgánicos con grupos tioles y/o porfirinas, sugiriendo un rol como un medio de transporte secundario.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Arévalo, C. (2005). Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 91, 53 p., mapa escala 1:100.000.*
- Barnes, H. L. (Ed.). (1997). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits, Vol. 1. John Wiley & Sons.*
- Boric, R. (2002). The Geology of the El Soldado Manto Type Copper Deposit, Chile. Unpublished M.Sc.Thesis, Dalhousie University, Halifax, Canada, 150p.
- Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N.S.F., Zentilli, M., (2002). The geology of the El Soldado manto-type Cu (Ag) deposit, Central Chile. *In Porter, T.M. (Ed), - Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits, Vol. 2, PGC Publ., Adelaide, 163-184.*
- Borrego, J., Monterde, J., Morales, J., Carro, B. y Lopez, N. (2003). Morfología de la pirita diagenética en sedimentos recientes de estuario del río odiel (So de espana). *Geogaceta. 33. 99-101.*
- Carrillo-Rosúa, J., Boyce A.J., 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 Geol Rev 56, 13-24.*
- Cisternas, M.E. y Frutos, J., (1996). Importancia metalogenética del volcanismo extensional del Cretácico Inferior en la región de Copiapó, Chile. *In Congreso Brasileiro de Geologia, No. 39, Anais, Vol. 7, 303-306. Salvador-Bahia.*
- Cisternas, M.E. y Hermosilla, J., (2006). The role of bitumen in stratabound copper deposit formation in the Copiapó area, Northern Chile. *Miner Deposita, v. 41, 339-355.*
- Cisternas, M.E., Frutos, J., Galindo, E., y Spiro, B. (1999). Lavas con bitumen en el Cretácico Inferior de Copiapó, Región de Atacama, Chile: Petroquímica e importancia metalogénica. *Revista Geológica de Chile, no.26, 205-226.*
- Coleman, M. L. y Raiswell, R. (1995). Source of carbonate and origin of zonation in pyritiferous carbonate concretions; evaluation of a dynamic model. *American Journal of Science, 295(3), 282-308.*
- Corvalán, J. (1974). Estratigrafía del Neocomiano marino de la región al sur de Copiapó, Provincia de Atacama. *Revista Geológica de Chile, Vol. 1, 13-36.*
- Cucurella, J., Canut de Bon, C. y Cisternas M.E. (2005). Pyrobitumen-related to silver-copper deposits in a Cretaceous volcanic-sedimentary sequence: Talcuna district, Coquimbo, Chile. *Mineral Pol 36(1), 21-29.*
- Espinoza, S. (1982). Definición del tipo “diseminado infravolcánico de los sulfuros de cobre”. III Congreso Geológico Chileno.

- Espinoza, S., Véliz, H., Esquivel, J., Arias, J., y Moraga, A. (1996). The cupriferous province of the Coastal Range, northern Chile. *In: Camus, F., Sillitoe, R.H., Petersen, R. (Eds.), Andean copper deposits: new discoveries, mineralization, styles and metallogeny. Soc Econ Geol, special publication, 5*, 19–32.
- Fuchs, S., Przybylowicz, W.J. y Williams-Jones, A.E. (2014). Elemental imaging of organic matter and associated metals in ore deposits using micro-PIXE and micro-EBS. *Nucl. Instrum. Meth. B 318 (Part A)*, 157–162.
- Fuchs, S., Schumann, D., Williams-Jones, A.E. y Vali, H. (2015). The growth and concentration of uranium and titanium minerals in hydrocarbons of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Chem. Geol.* 393–394, 55–66.
- Fuchs, S., Williams-Jones, A.E., Jackson, S.E. y Przyblowicz, W. (2016). Metal distribution in pyrobitumen of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa: evidence for liquid hydrocarbon ore fluids. *Chem. Geol.* 426, 45–59.
- García-Cruz, N. y Aguirre-Macedo, M. (2014). Biodegradación de petróleo por bacterias: algunos casos de estudio en el Golfo de México. Capítulo 35, 651-662.
- Giordano, T. H. (2000). Organic matter as a transport agent in ore-forming systems. *Rev. Econ. Geol*, 9, 133-155.
- Haggan, T., Parnell, J. y Cisternas M.E. (2003). Fluid history of andesite hosted CuS-bitumen mineralization, Copiapó district, North Central Chile. *J Geochem Explor* 78–79, 631–633.
- Holmgren, C. (1987). Antecedentes para un modelo genético del yacimiento El Soldado, V Región de Valparaíso. *Revista Geológica de Chile*, No. 30, p. 3-18.
- Kelemen, S. R., Walters, C. C., Kwiatek, P. J., Freund, H., Afeworki, M., Sansone, M., ... y Bolin, T. (2010). Characterization of solid bitumens originating from thermal chemical alteration and thermochemical sulfate reduction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 74, No 18, 5305-5332.
- Klohn, E., Holmgren, C., y Ruge, H., (1990). El Soldado, a Stratabound Copper Deposit Associated with Alkaline Volcanism in the Central Chilean Coastal Range. *En Fonbote, L., Amstutz, G.C., Cardozo, M., Cedillo, E. and Frutos, J., (eds.), Stratabound ore deposits in the Andes*, 435-448.
- Kojima, S., Tristá-Aguilera, D. y 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.
- Leventhal, J.S. y Giordano, T.H. (2000). The nature and roles of organic matter associated with ores and ore-forming systems: An introduction, *Economic Geology*, v. 9, 1–26.
- Levi B (1969). Burial metamorphism of a Cretaceous volcanic sequence west from Santiago, Chile. *Contrib. Mineral Petrol* 24: 30-49.
- Levi, B. y Aguirre, L. (1981). Ensilic spreading-subsidence in the Mesozoic and Paleogene of Central Chile. *Journal of the Geological Society of London*, Vol. 138, 75-81.

- Leavy, J.y Colwell, R. (1990) Microbial Degradation of Hidrocarbons in the Enviroment. *Microbiological Reviews*. p. 305-315.
- 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.
- Love L. G. y Amstutz G. C. (1966) Review of microscopic pyrite from the Devonian Chattanooga Shale and Rammelsberg Banderz. *Fortschr. Mineral.* 43, 273-309.
- Machel, H. G., Krouse, H. R. y Sassen, R. (1995). Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Applied geochemistry*, 10(4), 373-389.
- Machel, H.G. (1997). Thermochemical sulfate reduction and its relationships to carbonate diagenesis, sour gas, sulfur, and metal sulfide deposits. *En: Hendry, J.P., Carey, P.F., Parnell, J., Ruffell, A.H., Worden, R.H. (Eds.), Geofluids II '97. Contributions to the Second International Conference on Fluid Evolution, Migration, and Interaction in Sedimentary Basins and Orogenic Belts, Belfast, Northern Ireland*, 469-472.
- Maksaev, V. y Zentilli, M. (2002). Chilean strata-bound Cu- (Ag) deposits: An Overview. *Porter, T.M. (Editor), 2002 - Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective, Australian Mineral Foundation, Volume 2; PGC Publishing, Adelaide, Australia*, 185-205 (ISBN 0-9580574-1-9).
- Mazzullo, S. J. y Harris, P. M. (1991). An overview of dissolution porosity development in the deep-burial environment, with examples from carbonate reservoirs in the Permian Basin. *West Texas Geological Society, Midland, TX*, 91-89.
- Migdisov, A. A., Guo, X., Williams-Jones, A. E., Sun, C. J., Vasyukova, O., Sugiyama, I., ... & Roback, R. (2017). Hydrocarbons as ore fluids. *Geochemical Perspectives Letters*, 5, 47-52.
- Morata D, Aguirre L (2003) Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29 20'–30 S), *Chile: geochemistry and petrogenesis. J South Am Earth Sci* 16(6): 459-476.
- Mourgues, F.A. (2001). Bioestratigrafía y paleontología del Grupo Chañarcillo, Cretácico Inferior, III Región, Chile (Inédito), *Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Paleontológico, No. 2000-09*, 84 p.
- Mpodozis, C., Ramos, V. (1990) The Andes of Chile and Argentina. Circum Pacific council for energy and minerals resources. *Earth Sci Ser* 11, 59–90.
- Mpodozis, C. y Allmendinger, R. (1993). Extensional Tectonics, Cretaceous Andes, Northern Chile (27°S). *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 105, 1462-1477.
- Newberg, D.W. (1967). Geochemical implications of chrysocolla-bearing alluvial gravels. *Economic Geology*, Vol. 62, 932-956.
- Oetiker, R., (2016) Modelo Metalogénico y Potencial Económico de Mina La Culebra, Región de Atacama, Chile. Universidad de Atacama, 98p.

- Palacios, C., (1990) Geology of the Buena Esperanza Copper-Silver Deposit, Northern Chile. *En: Fontboté, L., et al. (editors), Stratabound Ore Deposits in the Andes. Berlin, SpringerVerlag*, 313-318.
- Pérez, E. y Reyes, R. (1999). Moluscos fósiles neocomianos, procedentes de quebrada Bandurrias, norte de mina Teresita, oeste de Copiapó, III Región (Inédito), *Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Paleontológico, No. 1999-13*, 3 p.
- Ohfuji, H. y Rickard, D. (2005) Experimental syntheses of frambooids. A review. *Earth Sci. Rev.*, 71, 147-170.
- Pérez, E., Reyes, R., Mourgues, F.A. y Rubilar, A. (2000). Perfil estratigráfico detallado de la sucesión de edad cretácica inferior (Formación Pabellón) medido en quebrada Meléndez, ladera sur (27°29' y 70 °12' W), ca. 2 km al norte de Tierra Amarilla, sureste de Copiapó. Informe paleontológico de avance (Inédito), *Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Paleontológico, No. 2000-10*, 32 p.
- Pons, J.M., Franchini, M., Giusiano, A., Impiccini, A., y Godeas, M. (2009). Alteración, mineralización de Cu y bitumen en el prospecto Barda González, Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 64(3), 501-513. Recuperado en 22 de enero de 2018, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-48222009000300014&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222009000300014&lng=es&tlng=es).
- Ramos, V. (2010). The tectonic regime along the Andes: Present Day and Mesozoic regimes, *Geological Journal*, V.45, 2-25.
- Reich, M., Palacios, C., Barra, F. y Chryssoulis, S. (2013). “Invisible” silver in chalcopyrite and bornite from the Mantos Blancos Cu deposit, northern Chile. *Eur J Mineral* 25(3).453-460.
- Rieger, A., Schwark, L., Cisternas, M. y Miller, H. (2008). Genesis and Evolution of Bitumen in Lower Cretaceous Lavas and Implications for Strata-bound Cooper Deposits, North Chile, *Economic Geology*, v.103, 387-404.
- Rivano, S., Sepulveda, P., Boric, R. y Espiñeira, D. (1993). Hojas Quillota y Portillo, V Región. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 73, mapa escala 1:250.000.
- Salleh, A.B., F.M. Ghazali, R.N.A. Rahman, y M. Basri., 2003. Bioremediation of petroleum hydrocarbon pollution. *Indian Journal of Biotechnology*, 2, 411-425.
- Sato, T. (1984) Manto type Copper deposits in Chile- a Review. *Bull Geol Surv Jpn* 35. 565-582
- Tavera, J. (1956). Fauna del Cretáceo Inferior de Copiapó. *Universidad de Chile, Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Vol. 13*, 205-216.
- Tissot, B.P. y Welte, D.H., (1984). Petroleum Formation and Occurrence. *SpringerVerlag, Berlin*.
- Villanueva, A. (2010). Estudio de bitúmenes y pirobitúmenes del Neoproterozoico de la Cuenca de Taoudeni, Mauritania. Tesis, Universidad de Barcelona.

- Weininger J.y Stermitz, F. (1988), *Química Orgánica*, Barcelona, España. Ed. Reverté. 1202 p.
- White, M. W., (2005). *Geochemistry*. International Mine Water Association. John-Hopkins University.
- Wilkin, R. T., Barnes, H. L., y Brantley, S. L. (1996). The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions. *Geochimica et cosmochimica acta*, 60(20), 3897-3912.
- Wilkin, R.T. y Barnes H.L. (1997) Formation processes of framboidal pyrite. *Geochim Cosmochim Acta* 61(2), 323-339.
- Wilson, N.S.F. (1998). The role of petroleum in the formation of the El Soldado copper deposit, Chile: hydrothermal replacement of a biodegraded petroleum reservoir, Unpublished Ph.D. thesis, Dalhousie University, 418 p.
- Wilson, N., y Zentilli, M., (1999). The role of organic matter in the genesis of the El Soldado volcanic-hosted manto type Cu Deposit, Chile. *Economic Geology*, v. 94, 1115–1136.
- Wilson, N.S.F. (2000). Organic petrology, chemical composition, and reflectance of pyrobitumen from the El Soldado Cu deposit, Chile. *International Journal of Coal Geology*, 43, 53-82.
- Wilson, N.S.F y Zentilli, M. (2006). Pyrobitumen Associated with Copper Mineralization from the Uchumi and Talcuna districts, Central Chile. *International Journal of Coal Geology*, 65, 158– 169
- Zentilli, M., Boric, R., Munizaga, F. y Graves, M.C. (1994). Petroleum involvement in the genesis of some strata-bound copper deposits of Chile. *Congreso Geológico Chileno VII, Concepción, Chile, V. II*, 1542-1546.
- Zentilli, M., Munizaga, F., Graves, M.C., Boric, R., Wilson, N.S.F., Mukhopadhyay, P.K. y Snowdon, L.R. (1997). Hydrocarbon Involvement in the genesis of Ore Deposits: An Example in Cretaceous Stratabound (Manto-Type) Copper Deposits of Central Chile, *International Geology Review*, V. 39, 1-21.

# **ANEXOS**

## Anexo A: Descripción de Cortes Transparentes-Pulidos

Tabla 1: Tabla descripciones cortes transparentes-pulidos. Sol= El Soldado, MTCUL= La Culebra y MTC= Manto Cobrizo.

Muestra	Mina	Mineralización	Minerales de alteración	Textura	Litología
NW08	Sol	Fpy,bn,ccp,dg,dj,bit	cal,chl	Obliterada	Riolita?
NW24	Sol	Py,Sp,bit	Ser,Ep,Cal,Qz	Obliterada	*
Nw27	Sol	Py,Ccp,Bn,bit	Qz,Cal,Chl,Ep,esc,ser	Amigdaloidal	Andesita
NW29	Sol	py,sp,bit	chl,cal,qz,ser,prh	Porfídica	Andesita
NW39	Sol	py,bn,Dj,Cc,bit	chl,cal,ep,ser	Porfídica	Andesita Verde
NW43	Sol	Bn,Ccp	Cal,chl,ser	Amigdaloidal	Andesita
NW46-1	Sol	Py, Ccp, Cc,Bn,Dj	Cal,chl,ser	Obliterada	*
NW50-2	Sol	Py,Ccp,Dj,	chl,qz,pump,ser	Obliterada	*
NW120	Sol	Bn,bit	Cal,Ser,Qz,Ep	Obliterada	*
NW121	Sol	Sp, bn, py,ccp,bit	Cal,Ser,Chl	Brechoza	Riolita
NW122	Sol	Bn,Ccp,Sp,Bit	Chl-sm,Ser,Qz	Porfídica	Andesita
NW137	Sol	py,sp, bit	chl,cal,qz,alb	Obliterada	*
NW140-3	Sol	Bn,Cc,Bit,Cc,Dj,Hem	Cal, Ep, Chl,pump,Ser,Qz	Porfídica	Andesita Verde
NW152	Sol	Bn,Ccp	Chl-sm,Ser,Cal	Amigdaloidal	Andesita
NW157	Sol	sp, bn, py,ccp	cal,chl,ser	Porfídica	Andesita
MZ-4-91	Sol	Fpy,py,sp,ccp,bit	cal,ser,chl-sm,ep	Porfídica	Andesita
MTCUL1A-d	MTCUL	Py,Ccp,Bit	chl-sm,Qz,prh,pump,ser,cal	Porfídica	Andesita
MTCUL1A-g	MTCUL	Py,Ccp,Dg	Cal,Qz,Chl,phr-pump	Amigdaloidal	Andesita
MTCUL1B-d	MTCUL	Py,Dg-Cov,Ccp, Bit	Cal,Ser,Qz	Obliterada	*
MTCUL1B-g	MTCUL	Ccp,Py,Dg,Cc,Bit	Cal,Chl-sm-Ser	Porfídica	Andesita brechizada
MTCUL1C-d	MTCUL	Py,Ccp,Cc,Cov,Bit	Ser,Chl-sm,Feldk,Cal	Porfídica	Andesita
MTCUL1D-d	MTCUL	Py,Dg-Cov	cal,ser,chl-sm,ep	Porfídica	Andesita
MTCUL1D-g	MTCUL	Py,Dg-Cov-bit	Cal,Ser,Qz	Porfídica	Andesita
MTCUL2A-d	MTCUL	Py,Sp,Bn,Ccp,bit	Cal,pump	Porfídica	Andesita
MTCUL2A-g	MTCUL	Py,Sp,Bit	Cal,Ser,Chl	Porfídica	Andesita
MTCUL2C-d	MTCUL	Py,Ccp,Dg-Cov,bit	Cal,Chl-sm	Amigdaloidal	Andesita
MTCUL2C-g	MTCUL	Bn,Ccp,Cc,Dg,bit	Cal,Chl,Qz	Amigdaloidal	Andesita
MTCUL2D-d	MTCUL	Py,bit	cal,phr	Amigdaloidal	Andesita

MTCUL2D-g	MTCUL	Py,Sp,Bit	Cal,Chl	Porfídica	Andesita
MTCUL3A-d	MTCUL	Py,Dig-Cov,Bit	Cal,Ser,Ep	Porfídica	Andesita
MTCUL3A-g	MTCUL	Py,Ccp,Dig-Cov,Bit	Cal,Ser	Porfídica	Andesita
MTCUL3B-d	MTCUL	Py,Sp,Bit	Cal,Chl	Porfídica	Andesita
MTCUL11D-d	MTCUL	Py,Bn,Cc,Cov,Cri,bit	Cal	Porfídica	Andesita
MTC8-d	MTC	bn,py,bit,Cov	ep,ser,cal	Brechoza	Brecha
MTC1B-d	MTC	bn,ccp,cc,bit	chl,cal	Obliterada	*
MTC1B-g	MTC	bn,ccp,cc,py,bit	chl,cal	Obliterada	*
MTC7A-d	MTC	bn,cc,ccp, bit (oxidado)	plg,chl,(esca),cal	Amigdaloidal	Andesita
MTC7C-g	MTC	py,Sp,bit	plg,cal(mosaico),ep,zeo,chl,ser,qz	Amigdaloidal	Andesita
MTC9-d	MTC	bn,cc,bit,py,dig(anisotropo)	cal,qz,plg	Obliterada	Brecha
MTC10-d	MTC	py,bit	cal, chl-sm, chl2	Porfídica	Andesita
MTC10-g	MTC	Py,bit	cal	Porfídica	Andesita
MTC11B-d	MTC	bn,cc,bit	qz,cal,chl	Obliterada	*
MTC12-d	MTC	ccp,en,py,bn	cal,plg,qz	Obliterada	*
MTC13-d	MTC	bit,bn,cc	chl,esm (MF),plg,esc,cal	Amigdaloidal	Andesita
MTC15C-d	MTC	lo bit,py,bn,ccp,en,cc	cal,qz,chl,esm	Amigdaloidal	Brecha andesítica
MTC16B-d	MTC	py,ccp,bit	plg,qz,cal,ser	Porfídica	Brecha andesítica
MTC17A1-d	MTC	bn,cc,bit,py	chl,ser,cal,ep	Porfídica	Andesita
MTC17A1-g	MTC	bn,cc,bit,py	chl,ser,cal	Porfídica	Andesita
MTC17A2-d	MTC	bn,cc,bit,py,ccp	chl,ser,cal,ep	Porfídica	Andesita
MTC17A2-g	MTC	bn,cc,bit,py,ccp,Dg-Cov	chl,ser,cal,ep	Porfídica	Andesita

**Anexo B Análisis Composicionales semi-cuantitativos de bitumén en Microscopio Electrónico de Barrido.**

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
NW29	1	89,33	10,17					0,5										V
NW29	2	83,95	15,39				0,18	0,48										V
NW29	3,1	84,15	15,39					0,46										VMx
NW29	3,2	79,93	19,48					0,59										VMx
NW29	4	88,14	11,32					0,54										V
NW29	4,1	84,81	14,65					0,54										V
NW29	5	94,83	4,59					0,59										V
MZ-4-91	1,1	88,83	10,37					0,62		0,19								V
MZ-4-91	1,2	92,01	6,96					0,7		0,15				0,18				V
MZ-4-91	1,3	90,87	8,31					0,66		0,16								V
MZ-4-91	1,4	91,31	7,89					0,62		0,18								V
MZ-4-91	1,5	87,47	11,85					0,56		0,12								V
MZ-4-91	2,1	76,3	23,06					0,57		0,08								A
MZ-4-91	2,2	80,6	18,53					0,77		0,1								A
MZ-4-91	2,3	75,87	23,47					0,58		0,09								A
MZ-4-91	2,4	80,09	19					0,79		0,12								A
NW08	1	96,48						1,51					2,01					V
NW08	2	97,09						1,47					1,44					V
NW08	3,1	94,82			0,12	1,48	2,57	0,12	0,28				0,19		0,48			V
NW08	3,11	97,73				0,82	1,21	0,09	0,15									V
NW08	4,1	71,58	22,12			0,52	4,58	0,47		0,73								V
NW08	4,2	69,13	22,42			0,56	5,68	0,38		1,14			0,71					V
NW08	6,2	99,84					0,05	0,11										V

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
NW39	1	48,83	29,3	4,13				1,09	1,98	1,05						2,59	11,03	V
NW39	1,1	95,58	4,09					0,32										V
NW39	1,2	96,31	3,31					0,38										V
NW39	2	94,03	3,48					0,47										V
NW39	3	95,52	4,06					0,42										V
NW39	3,1	90,19	9,81															V
NW39	4,3	96,19	3,49					0,32										V
NW39	4,4	96,64	2,94					0,42										V
NW39	4,5	97,02	2,68					0,31										V
NW39	5	97,13	2,52					0,35										V
NW39	6	97,33	2,28					0,39										V
NW39	7,1	96,82	2,9					0,28										V
NW39	7,2	96,49	3,2					0,31										V
NW39	7,3	96,9	2,74					0,36										V
NW39	7,4	96,03	3,72					0,24										V
NW39	7,5	95,47	4,27					0,26										V
NW39	8	96,34	3,27					0,39										V
NW39	9	95,61	3,76					0,46		0,16								V
NW39	10,1	79,13	16,96		0,51	0,41	0,97	0,3		0,52	0,11	1,08						V
NW39	10,2	78,25	17,92		0,54	0,42	0,89	0,28		0,53	0,12	1,05						V
NW39	10,3	80,72	15,46		0,48	0,37	0,9	0,3		0,8	0,11	0,84						V
NW39	10,4	81,71	15		0,38	0,3	0,91	0,28		0,72		0,69						V
NW39	11	77,74	16,82			0,17	3,29	0,25		1,73								V
NW39	12,1	81,62	14,18	0,1		0,19	2,32	0,23	0,08	1,28								V
NW39	12,2	80,11	15,17	0,1		0,19	2,47	0,22	0,08	1,65								V
NW46	1	89,44	6,01					2,67								1,88		V
NW46	1,1	88,23	7,32					2,45								2		V

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
NW46	2,4	84,13	10,03					2,11								3,72		V
NW46	2,1	84,26	10,39					2,02								3,34		V
NW46	2,2	84,62	9,09					2,28								4,01		V
NW46	2,3	84,24	9					2,37								4,38		V
NW46	2	84,19	9,99					2,11								3,71		V
NW46	3	90,21	7,8				0,2	0,87		0,93								V
NW46	4	89,2	8,66				0,2	0,6		1,33								V
NW46	5	88,07	9,21				0,22	0,88		1,62								V
NW46	24	81,21	12,18			0,56	0,96	1,87		0,73						2,49		V
NW46	25	72,74	16,88	0,9		0,39	0,84	2,97		0,89			2,44			1,95		V
NW46	26	81,57	12,24			0,54	1,04	2,03	0,17							1,68		V
NW120	27	92,56	4,55					1,37								1,52		V
NW121	1	89,2	8,59					1,49										V
NW121	2	90,1	5,8					1,87					1,14			1,08		V
NW121	2,1	91,01	5,11					1,88					1			1		V
NW121	2,2	91,16	5,29					1,64					0,7			1,22		V
NW121	2,3	88,15	9,83					1,76								0,26		V
NW121	3	72,51	16,72					2,19				6,58	1,38			0,61		V
NW121	3,1	86,05	7,99			0,29	0,64	2,15				1,05	1,06			0,76		V
NW121	4	89,34	7,16	0,34				1,49					0,62			1,04		V
NW137	1	91,09	8,57					0,34										A
NW137	2	93,14	6,41					0,45										A
NW140-3	1	93,13	4,48					1,52								0,87		V
NW140-3	2	92,91	4,67					1,36								1,06		V
NW140-3	3	93,04	4,82					1,17								0,97		V
NW140-3	4	86,17	10,24		0,29	0,37	0,77	1,27								0,89		V
NW140-3	5	90,01	7,18					1,72								1,09		V

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
NW140-3	5,1	90,59	6,51					1,9								1		V
NW140-3	6	90,51	6,42	0,3				1,56								1,22		V
NW140-3	7	90,67	6,62					1,36								1,35		V
NW140-3	8	66,64	27,95			0,96	1,49					2,96						V
NW140-3	9	88,86	6,79		0,52	0,6	0,91	1,62								0,7		V
NW140-3	10	91,57	6,09					1,47								0,87		V
NW140-3	11	91,99	5,62					1,44								0,95		V
NW140-3	12	92,76	5,14					1,15								0,94		V
NW140-3	13	93,48	3,97					1,49								1,06		V
MTCUL1A	1	99,5				0,16	0,1	0,25										A
MTCUL1A	1,1	99,23					0,05	0,72										A
MTCUL1A	1,2	99,26				0,06	0,05	0,62										A
MTCUL1A	1,3	91,41				1,17	0,94	6,48										A
MTCUL1A	1,4	91,99		0,56		3,34	1,96	2,15										A
MTCUL1A	1,5	99,6				0,14	0,11	0,15										A
MTCUL1A	1,6	99,69				0,17	0,08	0,07										A
MTCUL1A	1,7	99,73				0,17	0,1											A
MTCUL1A	1,8	98,56		0,09		0,16	0,68	0,41		0,09								A
MTCUL1A	1,9	99,52				0,32	0,16											A
MTCUL1A	1,1	99,72				0,09	0,19											A
MTCUL1A	1,11	99,46				0,12	0,1	0,31										A
MTCUL1A	1,12	99,55				0,06		0,39										A
MTCUL1A	1,13	99,17				0,04	0,09	0,69										A
MTCUL1A	1,14	99,15				0,05	0,09	0,71										A
MTCUL1A	2,1	98,24			0,41		0,08	1,04		0,23								A
MTCUL1A	2,2	98,67						1,33										A
MTCUL1A	2,3	98,96						1,04										A

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
MTCUL1A	2,4	98,8						1,2										A
MTCUL1A	2,5	98,98						1,02										A
MTCUL1A	2,6	98,69						1,31										A
MTCUL1A	2,7	98,75						1,25										A
MTCUL1A	2,8	99,01						0,99										A
MTCUL1A	2,9	99,11						0,89										A
MTCUL1A	2,1	99,12						0,88										A
MTCUL1A	2,11	98,24				0,07	0,12	1,06		0,51								A
MTCUL1A	2,12	98,27						1,73										A
MTCUL1A	3,1	98,62						1,38										A
MTCUL1A	3,2	98,86						1,14										A
MTCUL1A	3,3	98,29				0,07	0,22	1,42										A
MTCUL1A	3,4	98,82						1,18										A
MTCUL1A	3,5	98,71						1,29										A
MTCUL1A	3,6	94,41		0,14	1,37	0,19	0,62	0,32		1,3		1,59						A
MTCUL1A	3,7	98,03					0,12	1,79		0,06								A
MTCUL1A	4	97,53			0,09			1,9		0,48								A
MTCUL1A	4,2	99,39						0,61										A
MTCUL1A	4,3	99,3				0,07	0,07	0,56										A
MTCUL1A	4,4	99,65						0,35										A
MTCUL1A	4,7	99,34					0,09	0,57										A
MTCUL1A	4,8	99,31						0,69										A
MTCUL1A	4,9	98,99						1,01										A
MTCUL1A	4,1	99,43						0,57										A
MTCUL1A	4,11	99,07						0,93										A
MTCUL1A	4,12	99,36						0,64										A
MTCUL1A	5	98,38						1,62										A

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
MTCUL1A	5,1	99,81			0,07		0,12											A
MTCUL1A	6	90,81	7,75			0,13	0,18	1,13										A
MTCUL1A	6,1	90,65	8,2				0,27	0,89										A
MTCUL1A	6,2	91,08	7,92				0,22	0,79										A
MTCUL1A	6,3	87,95	10,39			0,18	0,31	1,17										A
MTCUL1A	6,4	90,6	7,73					1,67										A
MTCUL1A	8,1	94,79	3,13					2,08										A
MTCUL1A	8,2	97,97	1,7					0,32										A
MTCUL1A	8,3	89,84	7,09			0,23	0,25	2,59										A
MTCUL1A	8,4	91,8	5,73					2,47										A
MTCUL2C	1	91,29	6,32				0,17	2,21										A
MTCUL2C	1,1	92,17	6,25				0,1	1,47										A
MTCUL2C	1,2	93,01	4,41					2,57										A
MTCUL2C	2	93,4	4,4					2,2										A
MTCUL2C	2,1	89,27	8,94			0,13	0,25	1,41										A
MTCUL2C	3	93,28	3,31					3,41										A
MTCUL2C	3,1	93,58	3,59					2,83										A
MTCUL2C	4	93,21	4,1					2,57		0,12								A
MTCUL2C	5	93,48	3,21				0,13	3,18										A
MTCUL2C	6	93,11	5,32			0,11		1,1										A
MTCUL2C	6,1	94,51	3,2					2,28										A
MTCUL2C	6,2	90,89	7,65				0,14	1,32										A
MTCUL2C	6,3	90,58	8,52				0,16	0,74										A
MTCUL2C	6,4	80,46	18,1	0,27		0,44	0,74											A
MTCUL2C	6,5	89,8	8,87			0,13	0,21	0,99										A
MTCUL2C	6,6	91,52	6,72			0,13		1,63										A
MTCUL2C	7	94,29	3,37					2,34										A

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
MTCUL2C	7,1	90,53	8,19			0,1	0,2	0,97										A
MTCUL2C	7,2	83,43	14,14			0,23	0,39	1,31		0,5								A
MTCUL2C	7,3	92,11	5,23				0,25	2,42										A
MTCUL2C	8	89,34	7,76			0,13	0,32	2,44										A
MTCUL3B	1	92,91	2,71					4,38										A
MTCUL3B	1,2	92,05	3,85					4,1										A
MTCUL3B	1,3	91,73	4,22					4,05										A
MTCUL3B	1,4	91,93	3,94					4,13										A
MTCUL3B	1,5	92,04	3,71					4,25										A
MTCUL3B	1,6	92,01	3,47					4,52										A
MTCUL3B	1,7	92,28	3,41					4,31										A
MTCUL3B	2	54,82	18,84				0,22	3,54		0,5							22,08	A
MTCUL3B	2,2	76,87	19,14			0,26	1,39	1,49	0,16	0,56						0,13		A
MTCUL3B	2,3	91,52	4,11					4,38										A
MTCUL3B	3	92,13	3,61					4,26										A
MTCUL3B	3,1	92,59	3,15					4,14		0,12								A
MTCUL3B	4	92,29	3,1					4,61										V
MTCUL3B	5,1	77,19	22,23													0,57		V
MTCUL3B	6	72,16	27,55													0,29		V
MTCUL3B	7	85,73	11,49					2,78										V
MTCUL3B	7,1	88,95	6,9				0,23	3,92										V
MTCUL3B	7,2	87,17	9,77					3,06										V
MTCUL3B	8	91,24	4,9					3,86										V
MTCUL3B	8,1	88,79	7,46					3,75										V
MTCUL3B	9	90	5,28					4,72										A
MTCUL3B	9,1	90,09	5,32				0,14	4,45										A
MTCUL11D	1	63,32	31		0,56		0,37	1,02		0,41			3,31					A

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
MTCUL11D	1,1	70,36	28,62			0,35	0,67											A
MTCUL11D	1,2	61,92	31,87		0,44	0,36	0,48	0,9		0,54			3,48					A
MTCUL11D	1,3	72,78	26,59				0,63											A
MTCUL11D	1,4	58,65	35,72		0,33	0,32	0,66	0,77		0,57			2,97					A
MTCUL11D	1,5	63,16	31,3		0,49	0,22	0,46	1,03		0,52			2,82					A
MTCUL11D	1,6	64,26	28,87		0,62			1,68		1,11			3,45					A
MTCUL11D	1,7	64,3	30,42		0,49		0,28	1,07		0,47			2,97					A
MTCUL11D	1,8	51,85	39,45	0,53	0,49	0,98	2,74	0,53		0,38			3,05					A
MTCUL11D	1,9	62,76	32,54		0,22	0,37	0,85	0,69		0,41			2,15					A
MTCUL11D	1,1	80,8	18,91				0,29											A
MTCUL11D	3	71,62	26,74	0,25		0,55	0,62									0,21		A
MTCUL11D	3,1	70,18	26,99	0,43		0,89	1,51											A
MTCUL11D	3,2	72,21	26	0,32		0,6	0,86											A
MTCUL11D	3,3	74,53	24,32	0,17		0,34	0,64											A
MTCUL11D	3,4	75,68	23,71	0,13		0,2	0,29											A
MTCUL11D	3,5	73,02	25,49	0,25		0,48	0,77											A
MTCUL11D	3,6	66,2	31,07	0,37	0,16	0,51	1,02			0,08			0,58					A
MTCUL11D	4,4	80,5	18,79			0,21	0,51											A
MTCUL11D	4,5	63,2	31,44	0,49		0,49	0,99						2,36			1,03		A
MTCUL11D	4,6	61,34	36,51			0,62	1,52											A
MTCUL11D	4,7	70,86	28,04	0,22		0,26	0,62											A
MTCUL11D	4,8	64,53	27,19		0,56		0,35	2,62		1,63			3,12					A
MTCUL11D	7	61,05	33,52	0,43	0,42	0,42	0,76	0,6					2,8					A
MTCUL11D	9	62,35	32,92			0,31	0,66	0,62					3,14					V
MTCUL11D	9,1	64,38	32,18		0,4	0,27	0,7	0,37					1,7					V
MTCUL11D	9,2	62,54	26,07			0,4	0,72										10,27	V
MTCUL11D	9,3	56,24	38,18		0,43	0,49	1,11						3,56					V

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
MTC17-A2	1	85,95	12,96			0,43	0,29	0,37										A
MTC17-A2	1,2	85,59	13,33			0,21	0,23	0,64										A
MTC17-A2	1,3	85,93	12,44			0,21	0,5	0,92										A
MTC17-A2	2	91,57	5,37			0,16	0,27	2,57		0,06								V
MTC17-A2	2,1	91,51	5,6			0,1	0,18	2,62										V
MTC17-A2	2,2	92,71	4,36				0,09	2,7					0,14					V
MTC17-A2	2,3	49,27	37,7	0,54	1,82	3	3,92	0,46		0,07		3,23						V
MTC17-A2	3	88,06	7,07	0,13		0,08	3,04	1,56								0,07		A
MTC17-A2	3,1	86,14	12,87			0,22	0,44	0,19		0,15								A
MTC17-A2	3,4	99,17				0,06	0,11	0,66										A
MTC17-A2	3,5	99,36				0,24	0,41											A
MTC17-A2	3,6	96,56		0,28		0,71	1,19	0,26		0,25			0,74					A
MTC17-A2	3,7	99,29				0,28	0,44											A
MTC17-A2	4	85,19				0,21	0,29	2,35				0,29	6,44					V
MTC17-A2	5	98,97				0,08	0,06	0,89										V
MTC17-A2	5,1	97,82			0,11	0,16	0,67	1,11		0,06								V
MTC17-A2	5,2	98,92						1,08										V
MTC17-A2	5,3	99,05						0,95										V
MTC1B	3	96,05						3,94										V
MTC1B	3,1	96,63						3,37										V
MTC1B	3,2	95,5						4,51										V
MTC1B	3,3	96,5						3,51										V
MTC1B	3,4	95,52						4,48										V
MTC1B	3,6	95,77						4,23										V
MTC1B	3,7	96,7						3,3										V
MTC1B	3,8	96,49						3,51										V
MTC1B	3,9	96,88						3,12										V

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
MTC1B	5	96,56						3,44										V
MTC1B	5,1	94,92						5,08										V
MTC1B	5,2	94,81						5,19										V
MTC1B	5,3	95,59						4,41										V
MTC1B	5,4	94,7						5,3										V
MTC1B	7	96,72						3,28										V
MTC1B	7,1	96,77						3,23										V
MTC1B	7,2	97,12						2,88										V
MTC1B	7,3	96,74						3,26										V
MTC1B	7,4	95,78						4,22										V
MTC1B	8	97,25						2,75										V
MTC1B	10	97,09						2,91										V
MTC1B	10,1	97,42						2,58										V
MTC1B	11	96,21						3,79										V
MTC1B	11,1	96,08						3,92										V
MTC1B	11,2	96,95						3,05										V
MTC1B	11,3	96,18						3,82										V
MTC1B	11,4	96,32						3,68										V
MTC1B	11,5	86,94			4,77	2,47	5,82											V
MTC1B	12	96,77						3,23										V
MTC1B	12,1	94,07			2,35		2,58											V
MTC1B	13	97,34						2,66										V
MTC1B	14	98,05						1,95										V
MTC1B	14,1	97,36						2,64										V
MTC1B	14,2	96,79						3,21										V
MTC7A	2	99,23						0,77										V
MTC7A	3	97,86						2,14										V

Muestra	Punto	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N	Ubicación
MTC7A	4	99,77					0,23											V
MTC17A2-G	1	98,61					0,1	1,22										V
MTC17A2-G	1,1	99,46						0,54										V
MTC17A2-G	1,2	98,81				0,3	0,89											V
MTC17A2-G	1,3	98,25		0,19		0,25	0,8						0,51					V
MTC17A2-G	1,4	98,38		0,24		0,31	1,06											V
MTC17A2-G	1,5	99,44				0,1	0,23	0,23										V

Datos en wt%. A=amigdalas y V=vetillas. Muestras NWy MZ son de El Soldado. MTCUL provienen de La Culebra y MTC de Manto Cobrizo.

Tabla 7: Resumen de datos obtenidos en análisis composicional.

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cl	N
Total	274	170	26	28	90	117	241	7	51	3	10	30	1	1	38	3
Min	48,83	1,7	0,09	0,07	0,04	0,05	0,07	0,08	0,06	0,11	0,29	0,14	0,18	0,48	0,07	10,27
Max	99,91	39,45	4,13	4,77	3,34	5,82	6,48	1,98	1,73	0,12	6,58	6,44	0,18	0,48	4,38	22,08
Promedio	89,43	12,38	0,46	0,69	0,411	0,77	1,70	0,41	0,55	0,11	1,936	2,066	0,18	0,48	1,43	14,46
El Soldado	87	81	6	7	18	23	85	6	25	3	7	11	1	1	32	1
La Culebra	126	80	15	17	52	70	103	1	21	0	1	15	0	0	5	2
Manto Cobrizo	61	9	5	4	20	24	53	0	5	0	2	4	0	0	1	0

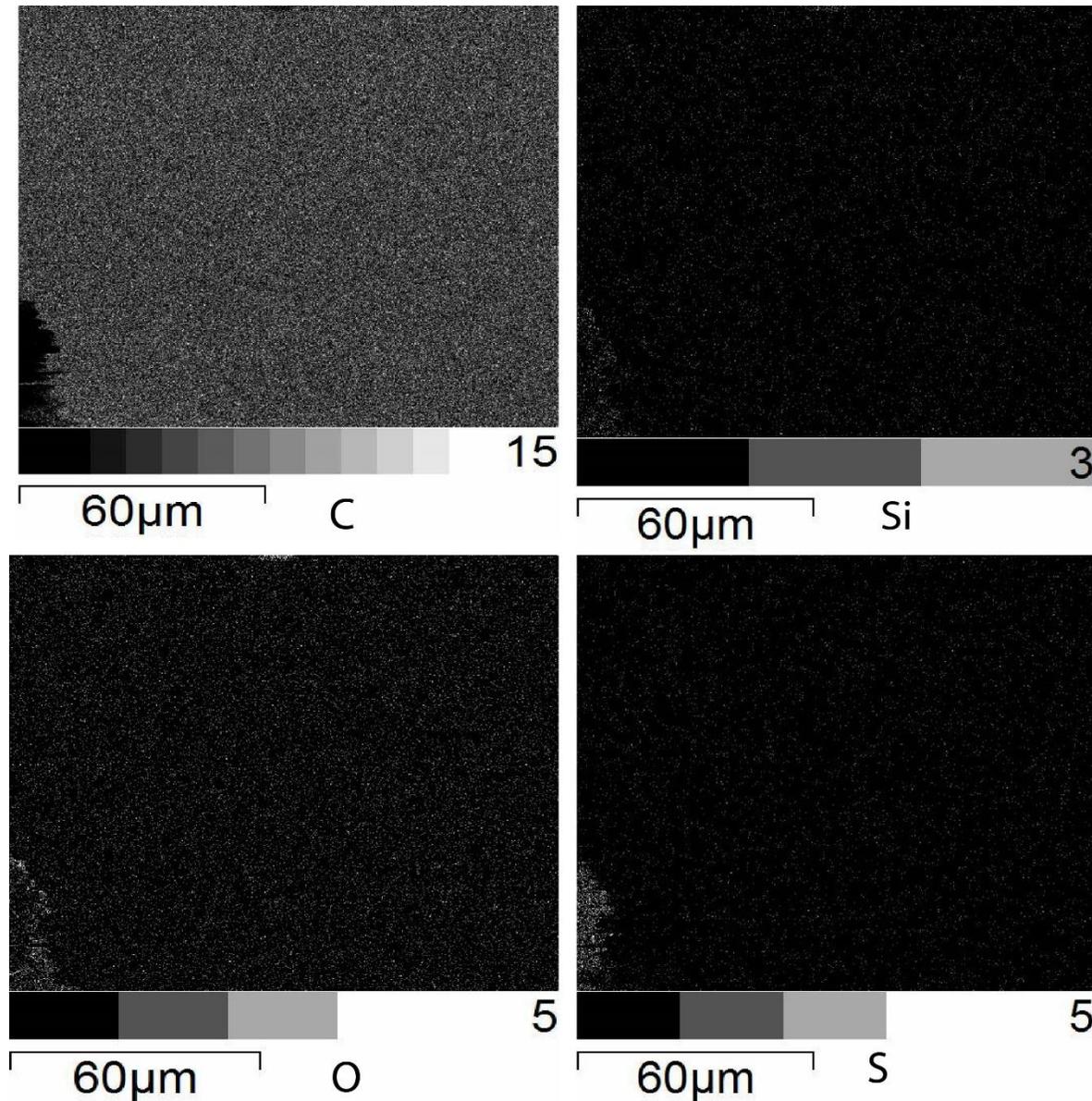
## Anexo C: Mapas de Distribución de elementos

### El Soldado

Muestra: NW08 Mapa 1

Elementos detectados: C, O, S, Si

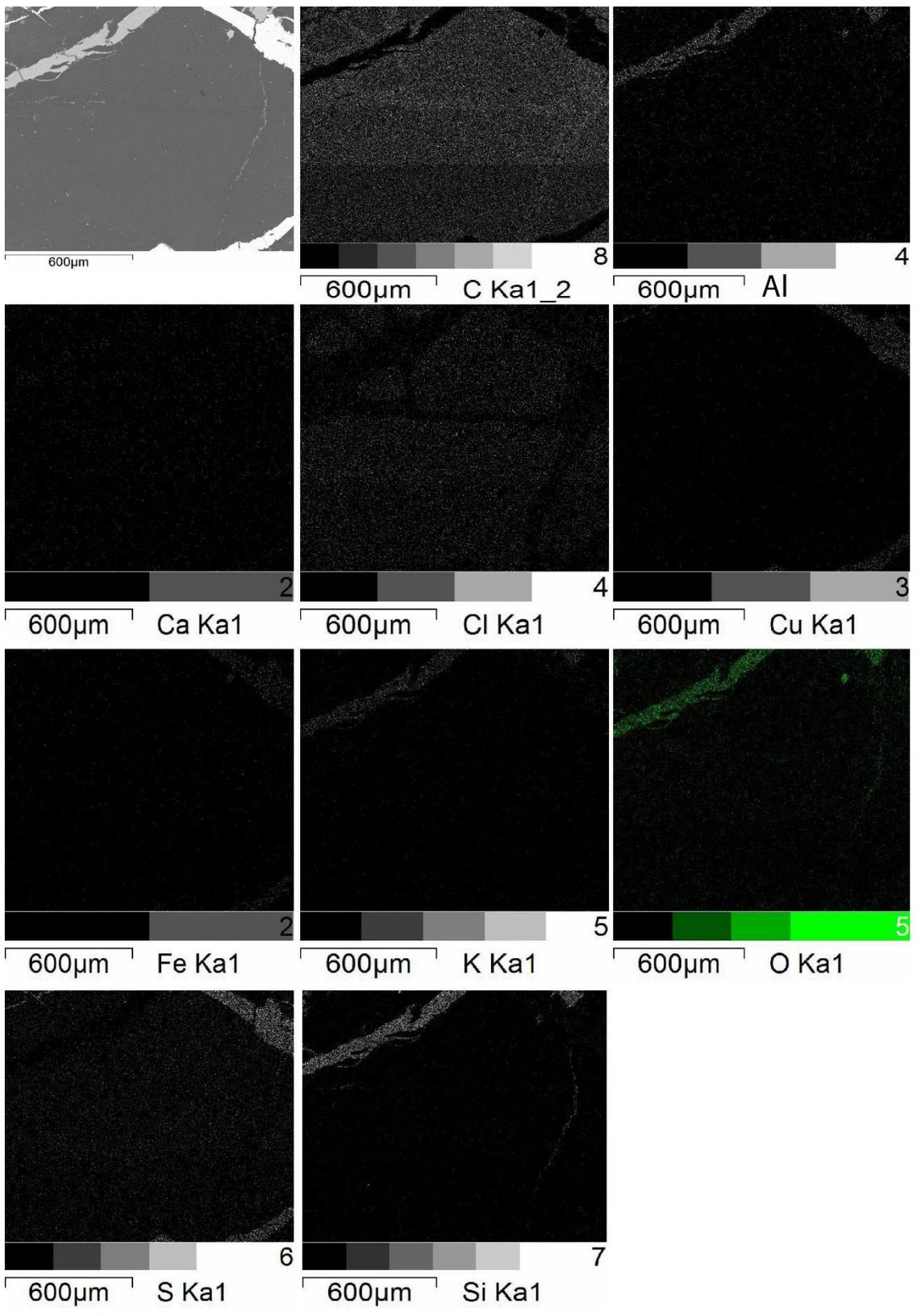
O, Si y a S, en bitumen se distribuyen homogéneos, pero se concentran en zonas externas a este. C muestra un bitumen uniforme.



Muestra: NW46-1 Mapa 1

Elementos detectados: Al, C, Ca, Cl, Cu, Fe, K, O, S, Si

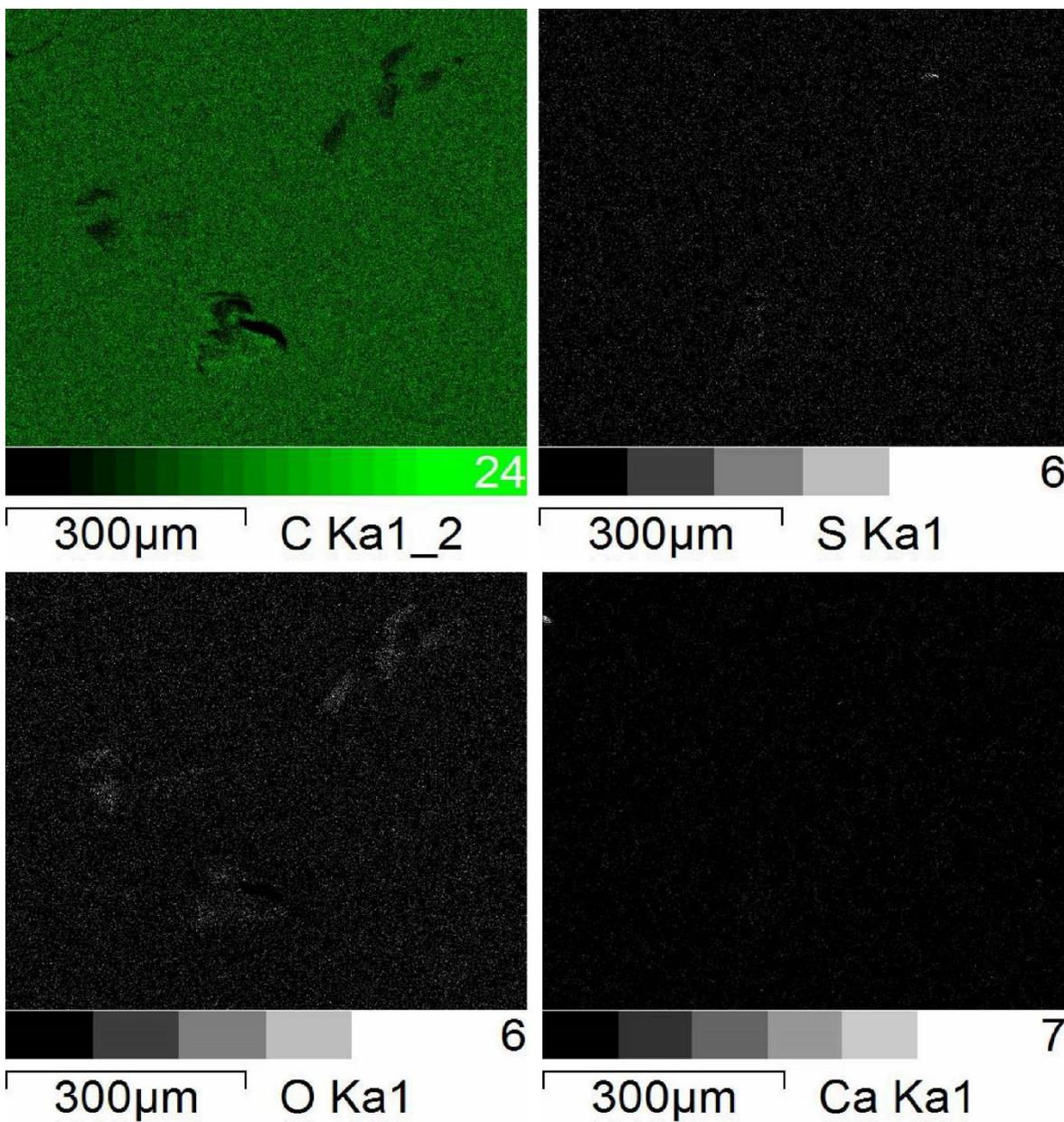
C en bitumen muestra zonaciones, donde los bordes de fracturas presentan mayor concentración de este elemento que el centro, con Cl ocurre algo similar, pero se concentra en las zonas donde C esta en menor cantidad, mientras que S se distribuye homogéneo. En algunas fracturas se concentra Si y se acopla con O, K, Al y Ca, en otras lo hacen Fe, Cu, S.



Muestra: NW137 Mapa 2

Elementos detectados: C, Ca, O, S

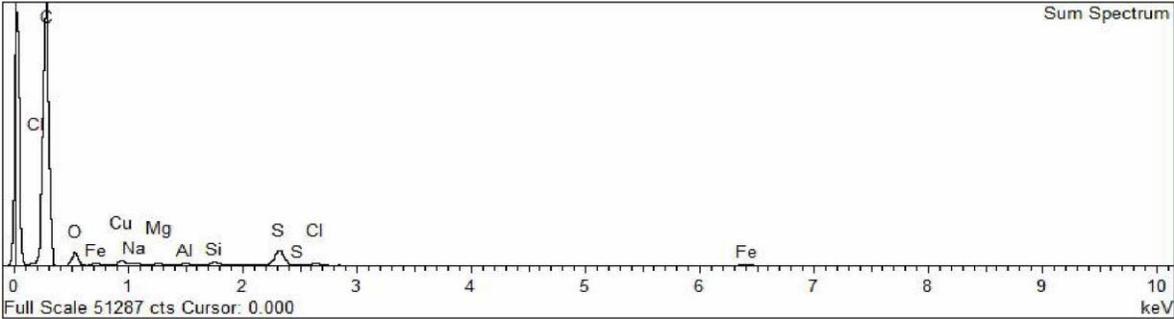
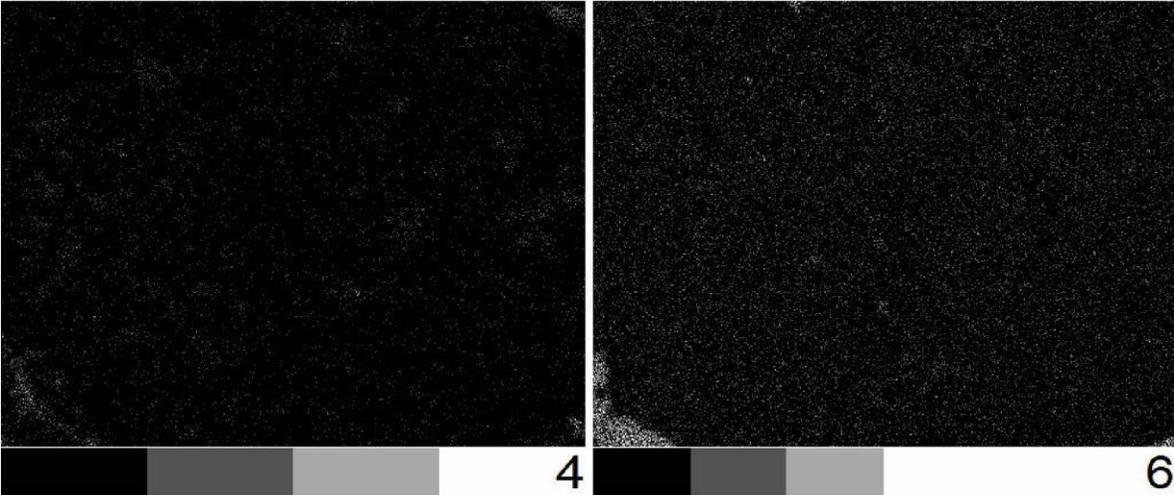
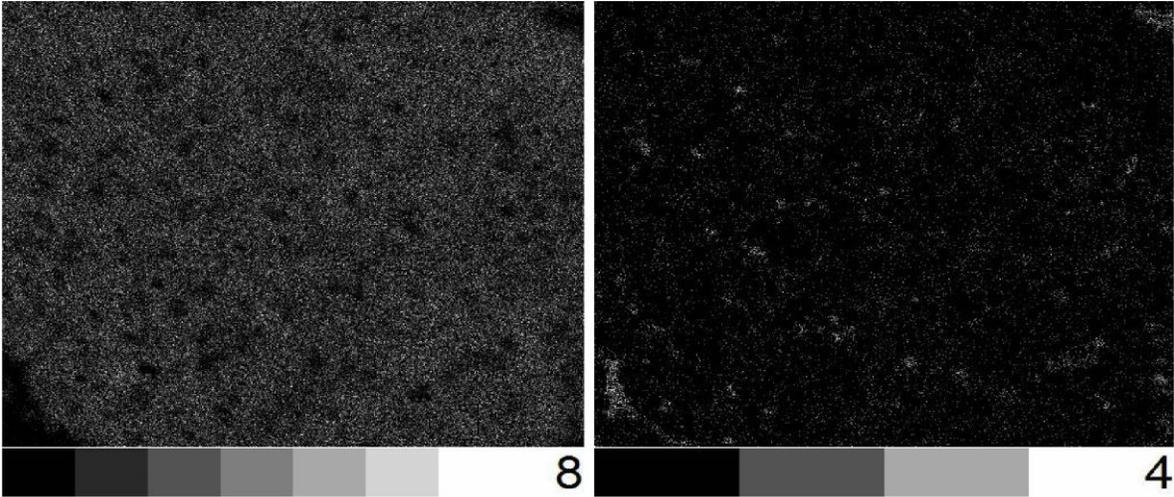
C se muestra bitumen casi uniforme, salvo por algunas zonas de menor concentración. Ca y S se distribuyen homogéneos al igual que O, aunque este se concentra más donde hay menor concentración de C.



Muestra: NW121 Mapa 1

Elementos detectados: C, O, S, Si.

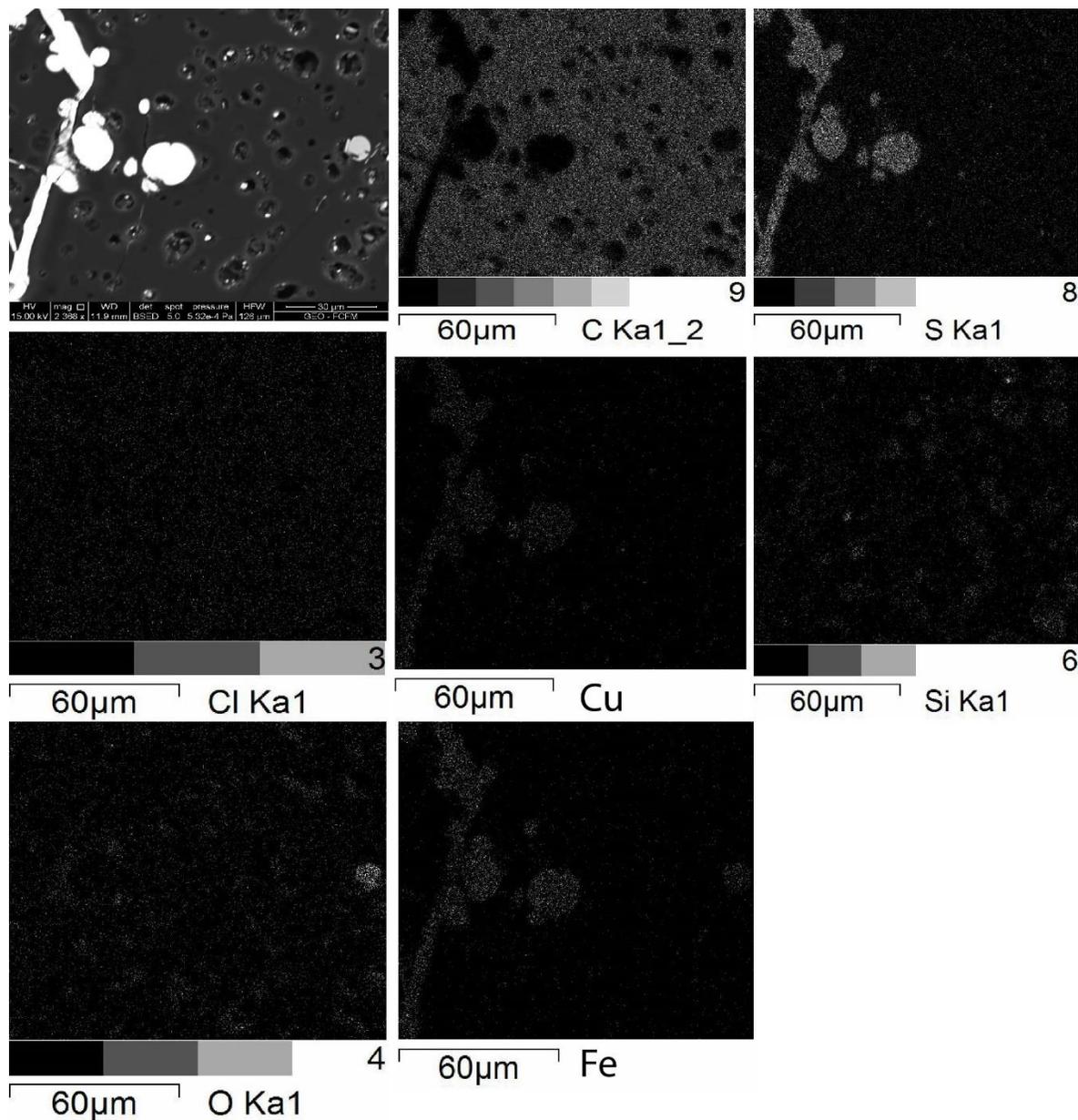
C muestra bitumen con cavidades irregulares, algunas de ellas rellenas con O y Si, otras vacías, en algunas zonas hay menor cantidad de C.S se distribuye homogéneo.



Muestra: NW121 Mapa 2

Elementos detectados: C, Cl, Cu, Fe, O, S, Si.

C muestra bitumen con cavidades redondas. Cl se distribuye homogéneo. Escaso Cu en bitumen se concentra en fracturas o rellenando algunas cavidades, lo mismo sucede con Fe. O se encuentra distribuido en bitumen y concentrado en algunas cavidades, donde se acopla con Si. S se acopla con Fe y Cu en fracturas, o se distribuye homogéneo en bitumen.

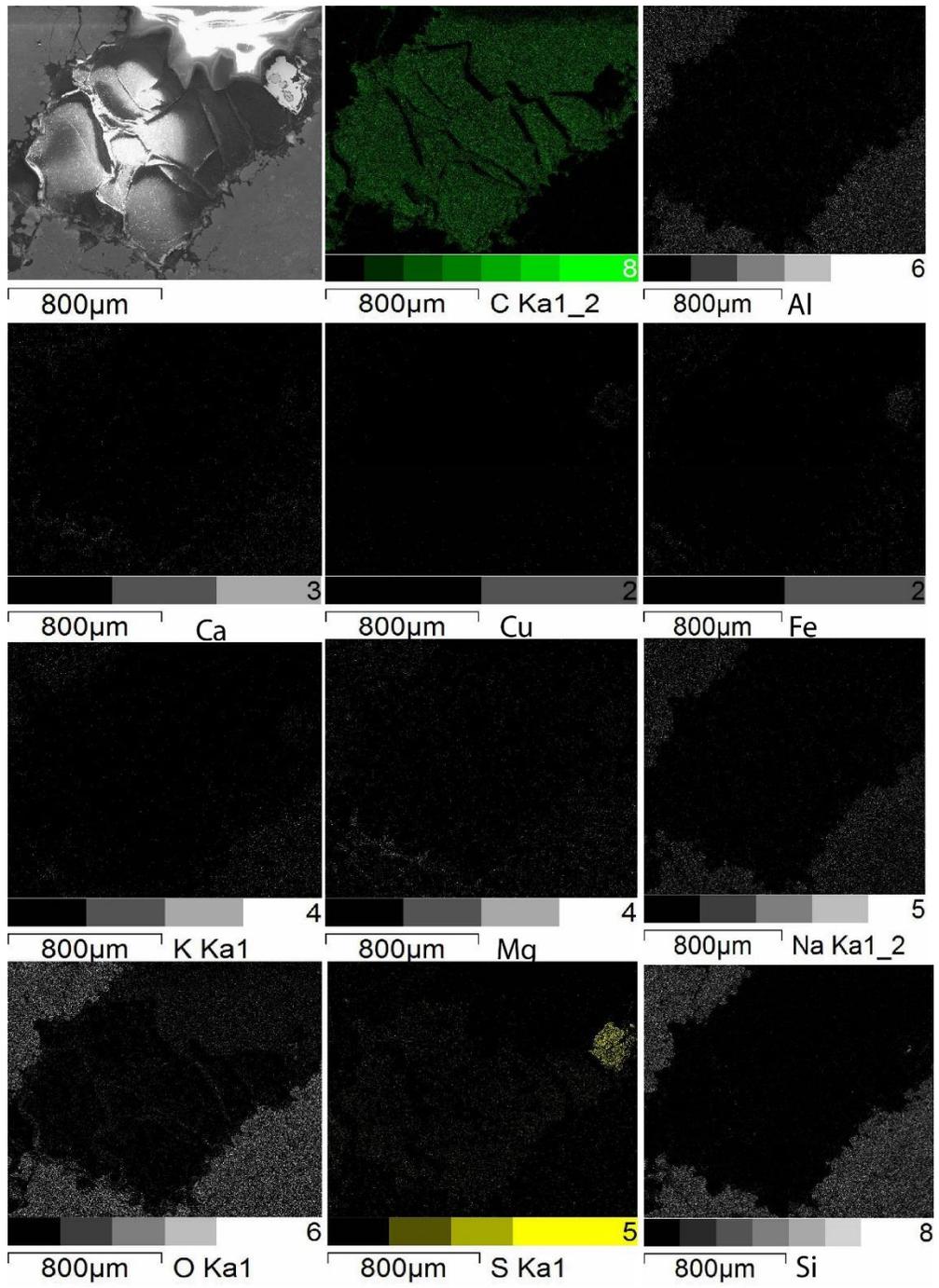


## **La Culebra**

Muestra: MTCUL1A-G Mapa 1

Elementos detectados: Al, C, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Na, O, S, Si, Ti

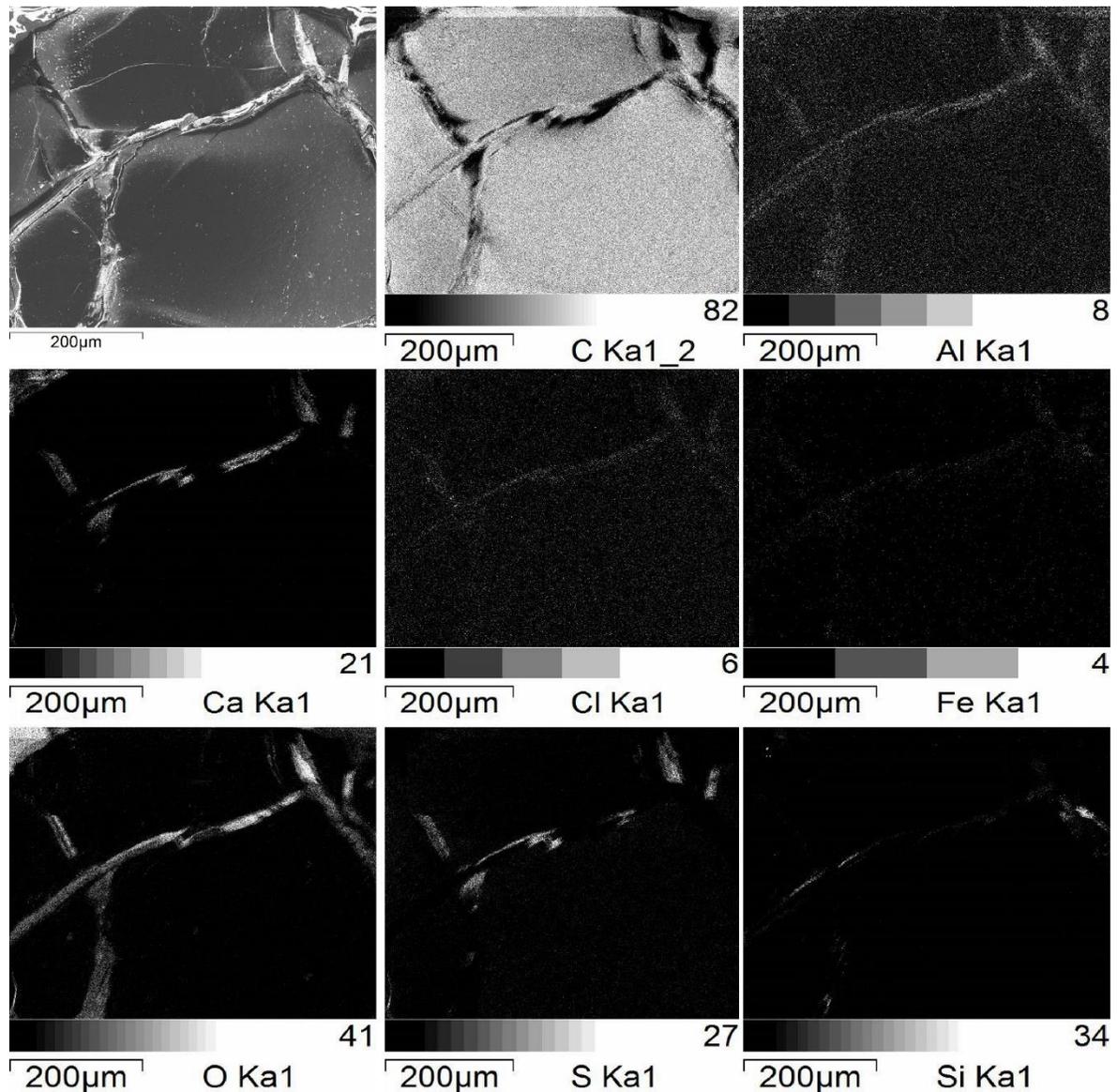
Al mayor concentración rodeando bitumen, al igual que K, Na, Si y O, este último también se concentra en vetillas y en bitumen. Ca también se encuentra acoplado a los elementos anteriores, aunque en menor cantidad y en bitumen. Cu se detecta fuera de bitumen y en un sector acoplado a Fe, S y menor cantidad de Ti, aunque este se distribuye. Mg se distribuye casi homogéneo en la zona. S homogéneo en bitumen.



Muestra: MTCUL2C-G Mapa 1

Elementos detectados: Al, C, Ca, Cl, Fe, O, S, Si.

Si se concentra en fracturas y rodeando bitumen. S se encuentra en fracturas desacoplado de Si, también se encuentra en bitumen distribuido homogéneo. O se concentra en fracturas y en sectores dentro de bitumen, indicando inclusiones. Fe se concentra en fracturas y en menor cantidad en bitumen, se distribuye en ciertos sectores. Cl distribución homogénea en bitumen con mayor concentración en vetillas, lo mismo sucede con Al, aunque está en mayor concentración. Ca se distribuye en fracturas y se acopla con O y no con C. Inclusiones se ven reflejadas por Si y O, los cuales se acoplan, indicando cuarzo.

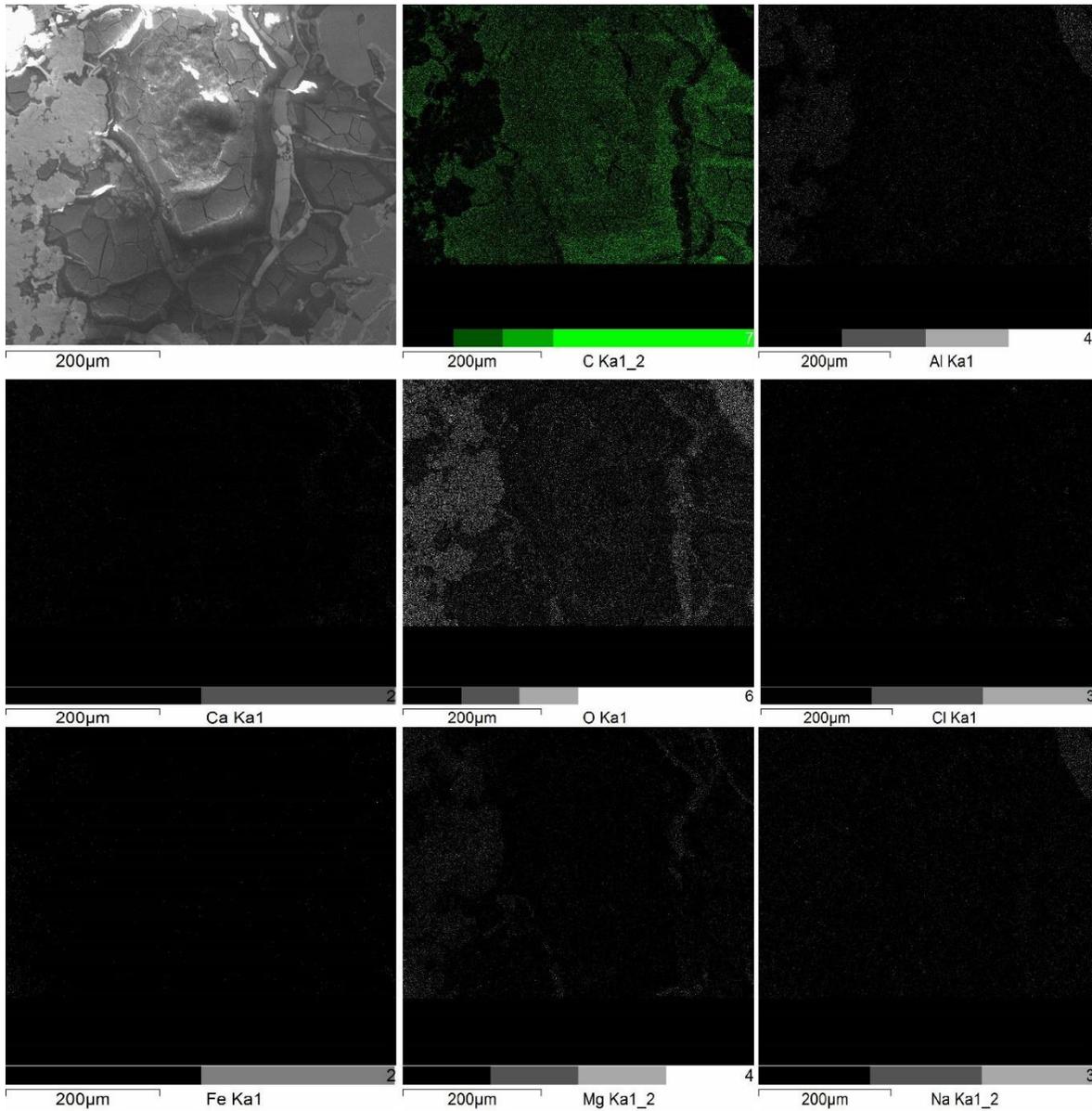


Muestra: MTCUL11D-D Mapa 1

Elementos detectados: Al, C, Ca, Cl, Cu, Fe, Mg, Na, O.

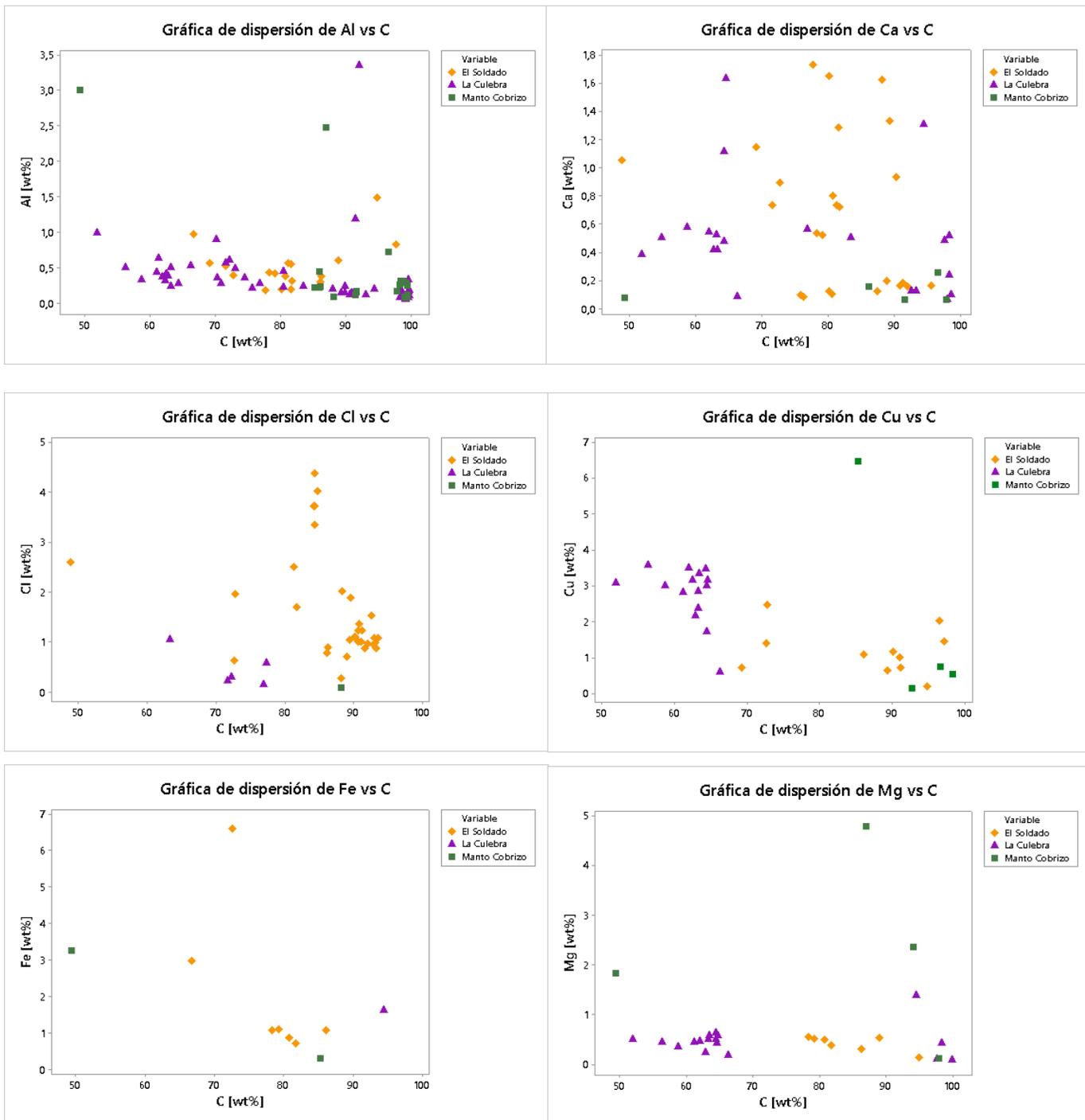
Elementos visibles: C, Al, O, Mg.

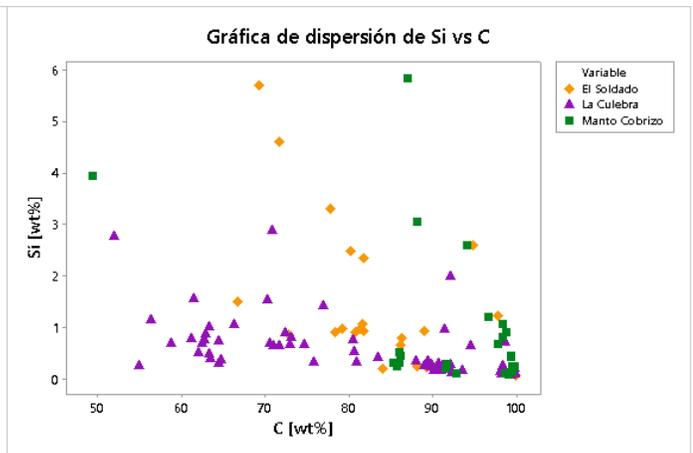
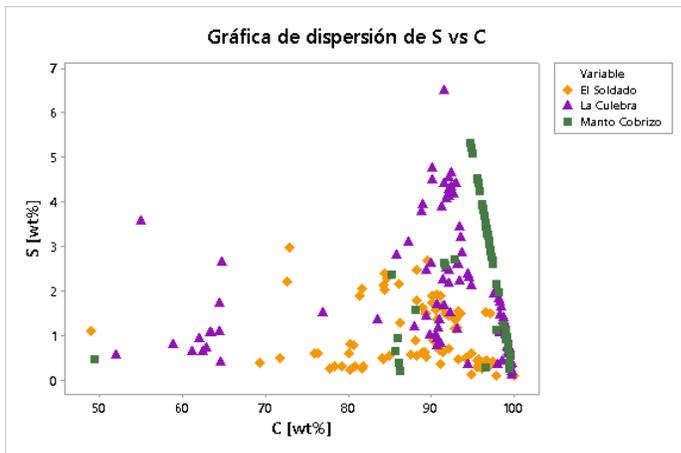
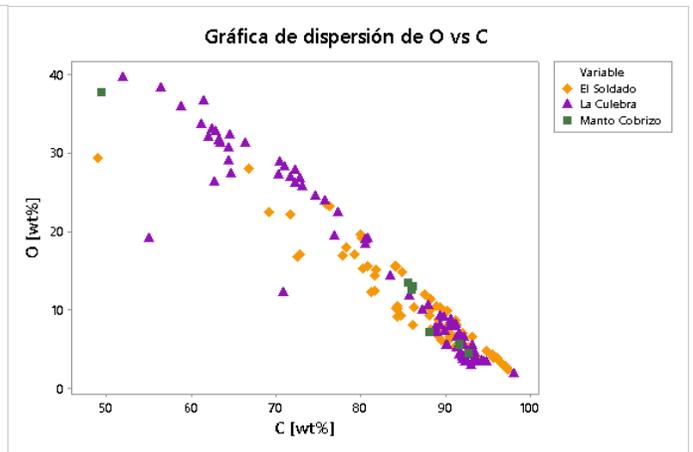
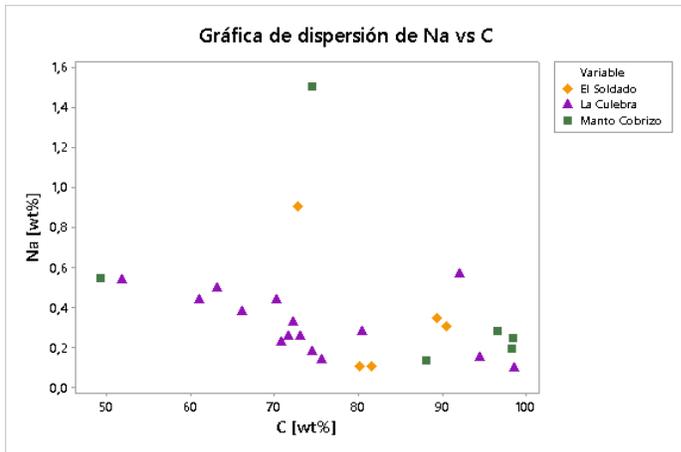
C permite detectar zonación y fisuras irregulares en su interior. Ca se concentra fuera del bitumen, al igual que Mg. Si se distribuye homogéneo en bitumen, pero la mayoría se concentra en rodeándolo, del mismo modo se tiene el Al, Mg y O, este último presenta zonación en bitumen. Se detecta Cu, pero no se visualiza en los mapas. Cl es escaso, pero se distribuye homogéneamente.



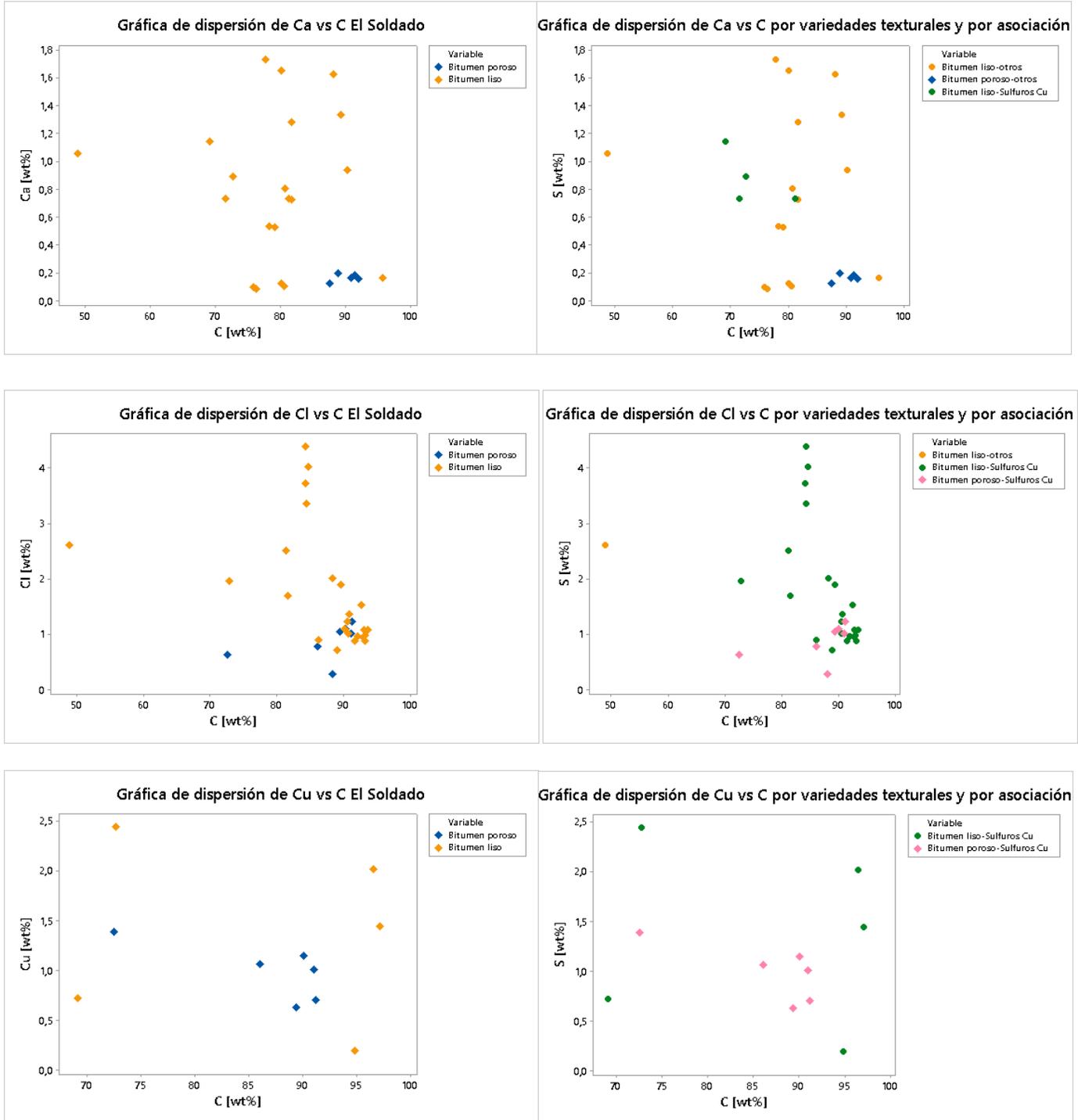
## Anexo D: Gráficos

### Gráficos de correlación Todos los depósitos

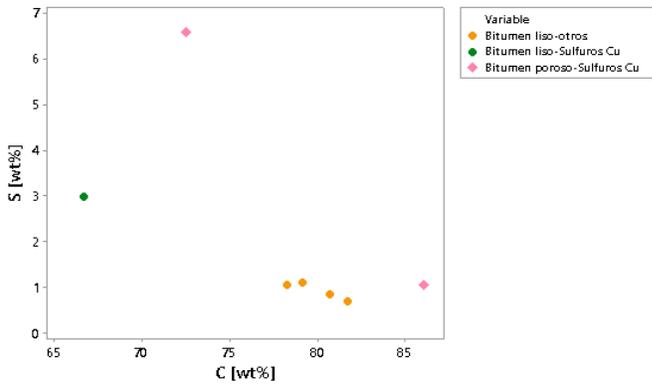




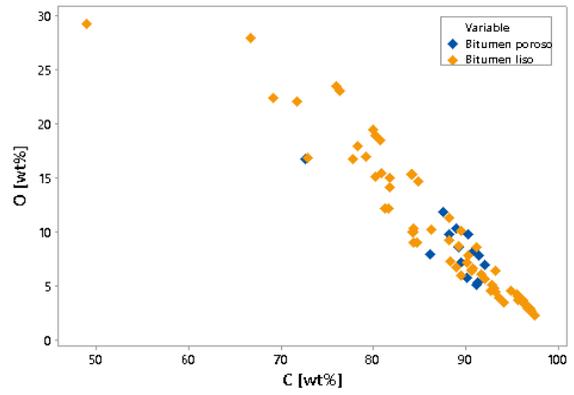
# Gráficos de correlación El Soldado



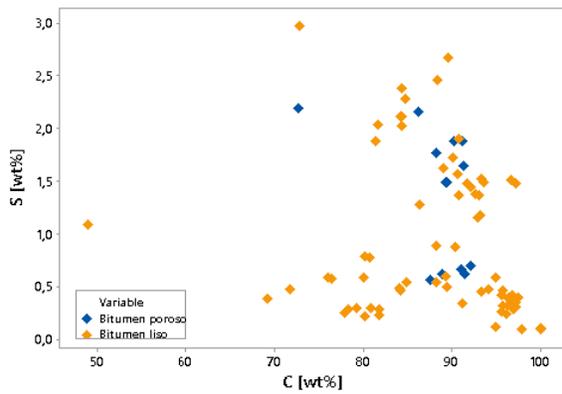
Gráfica de dispersión de Fe vs C por variedades texturales y por asociación



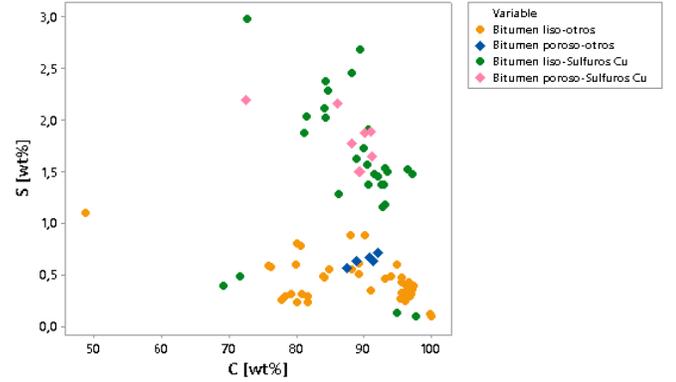
Gráfica de dispersión de O vs C El Soldado



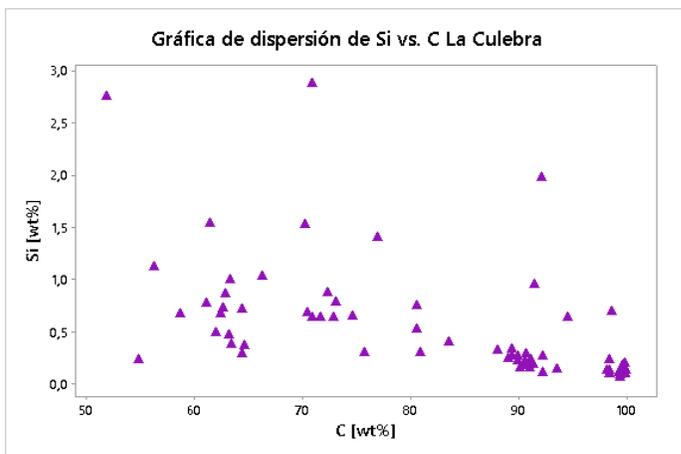
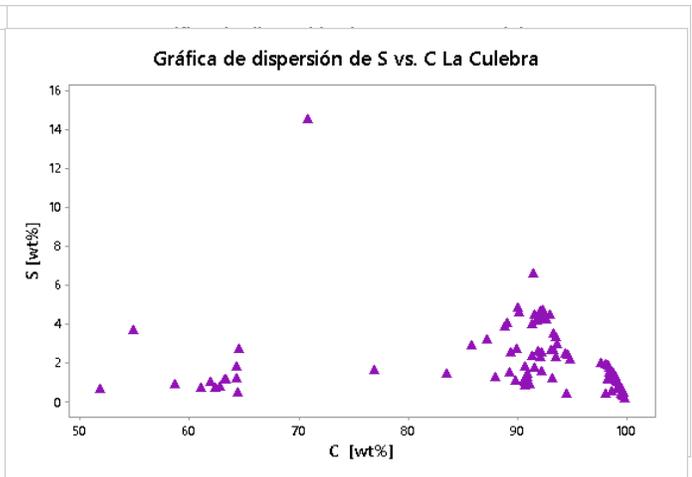
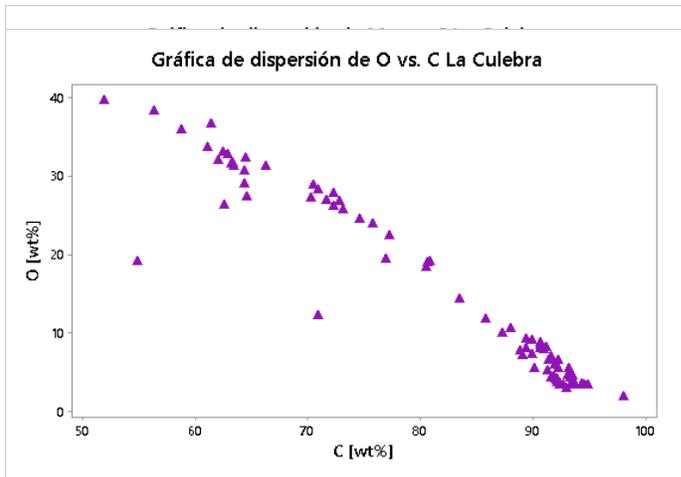
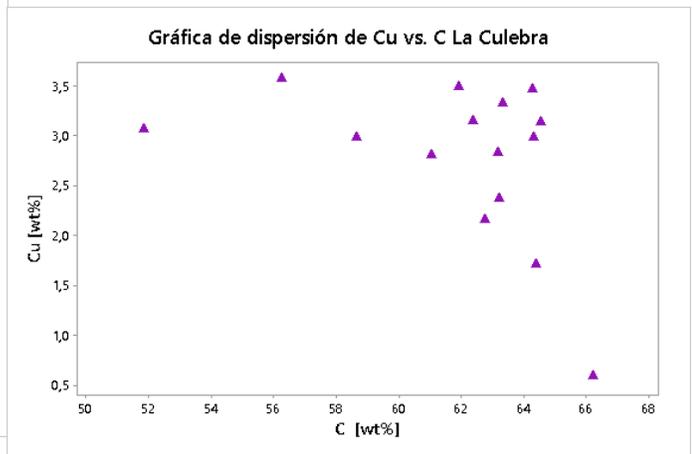
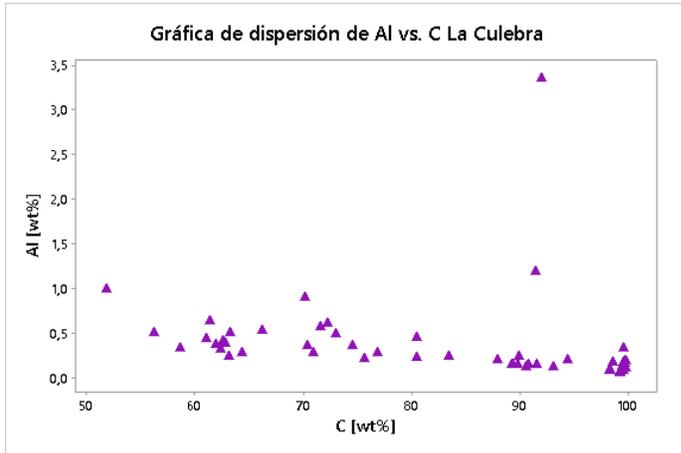
Gráfica de dispersión de S vs C El Soldado



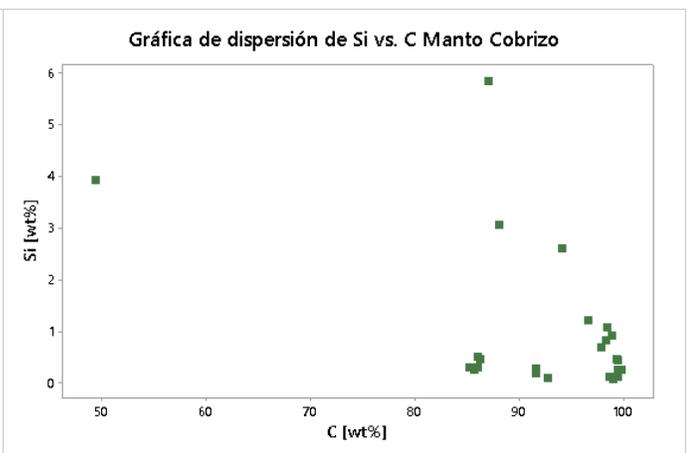
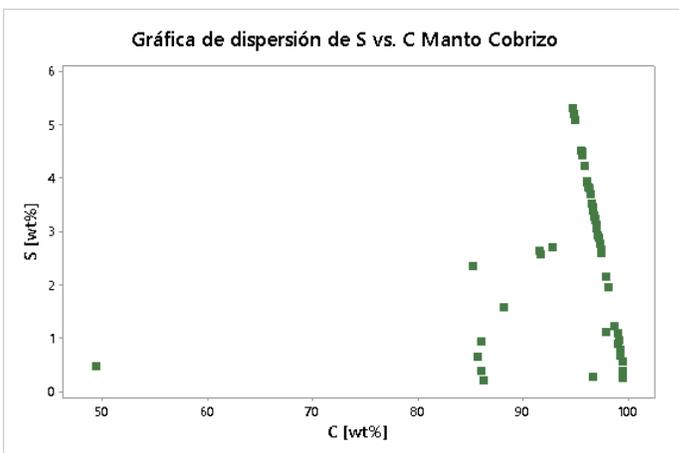
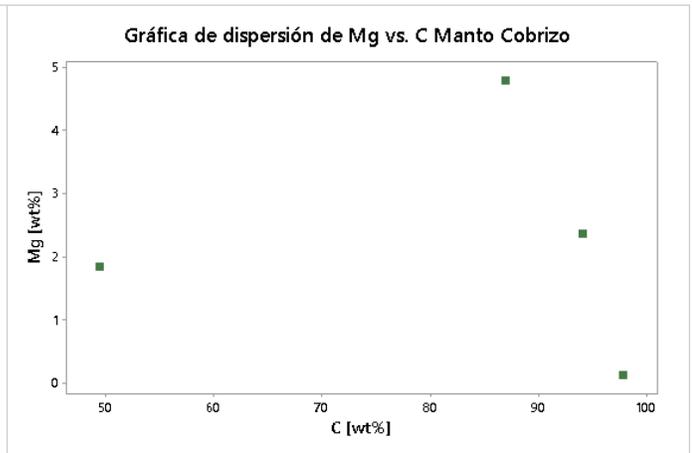
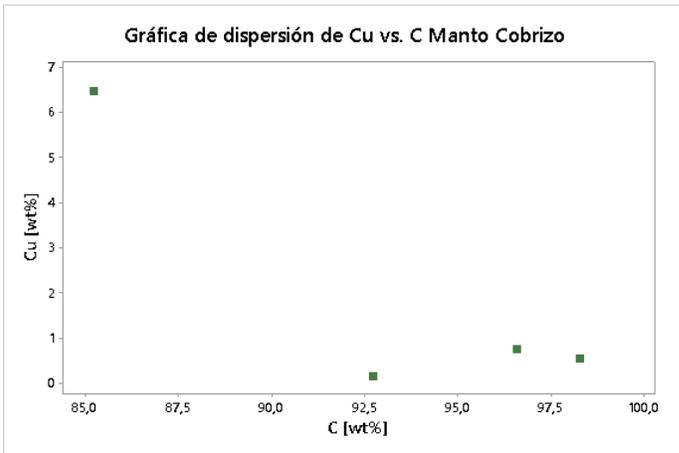
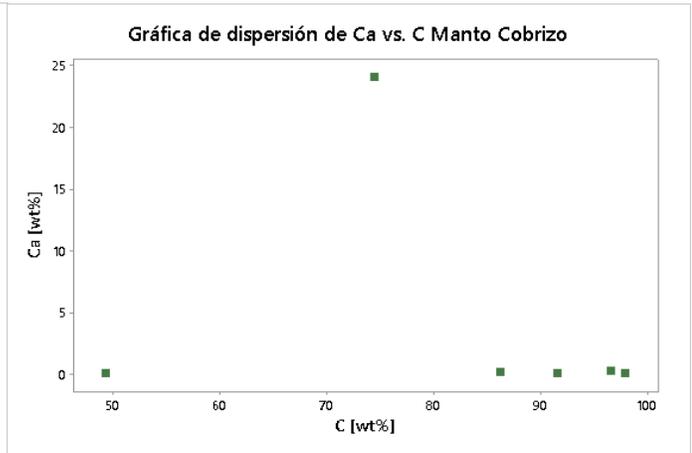
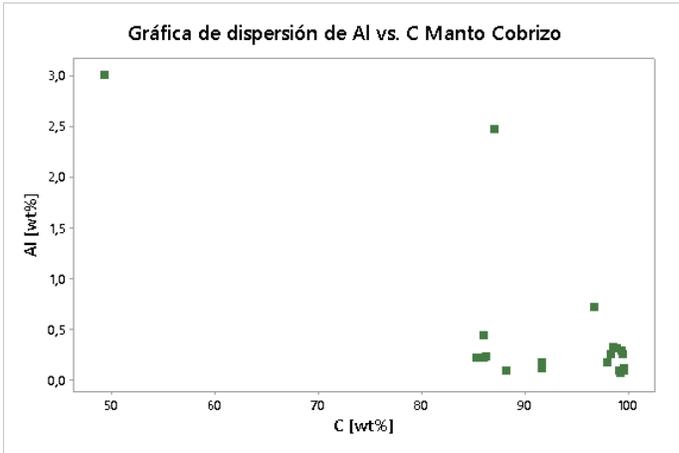
Gráfica de dispersión de S vs C por variedades texturales y por asociación



## Gráficos de correlación La Culebra



## Gráficos de correlación Manto Cobrizo



## Anexo E: Análisis SEM-EDS en minerales

### El Soldado -NW29

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

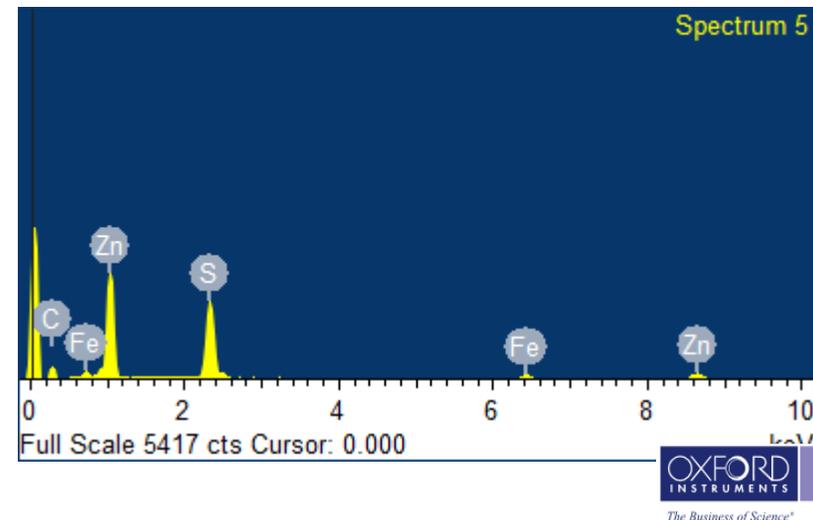
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	31.48	65.02
S K	21.81	16.87
Fe K	5.95	2.64
Zn L	40.76	15.47
Totals	100.00	

Comment: Esfalerita



Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

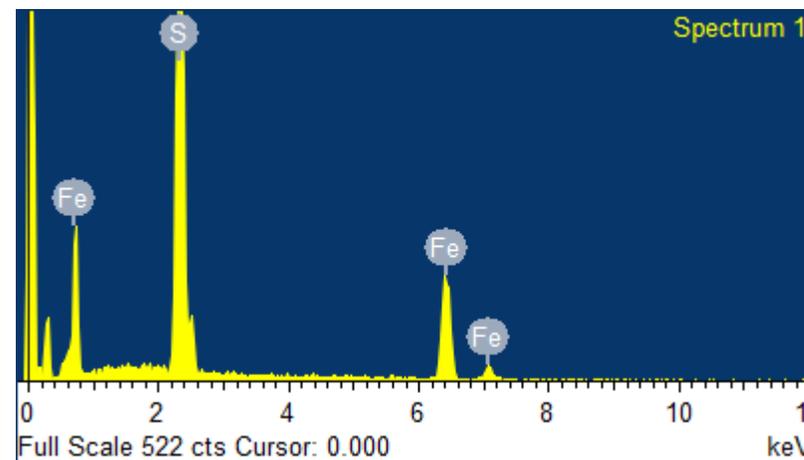
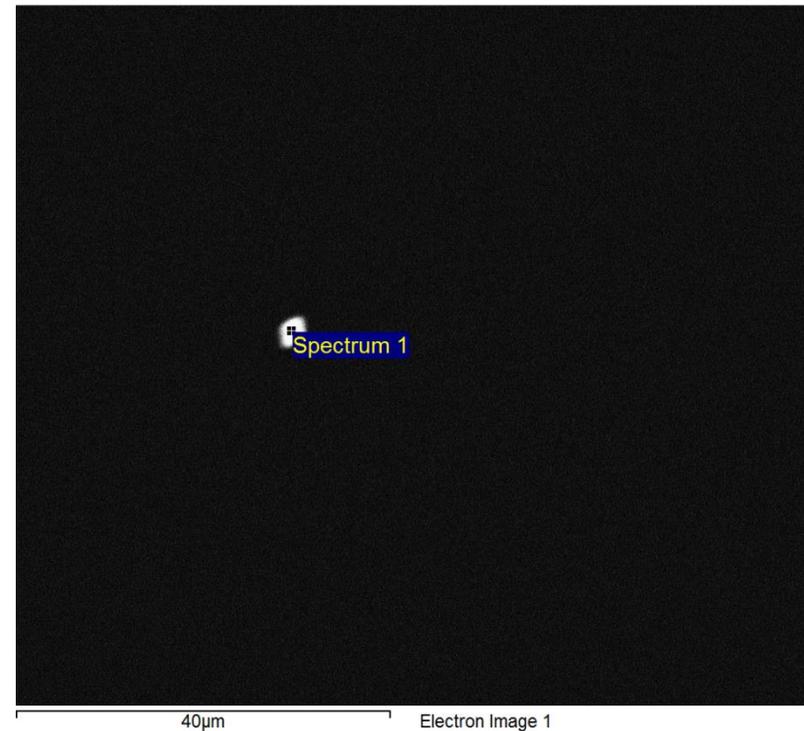
Number of iterations = 2

Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
S K	28.31	20.31	70.68	SO3
Fe K	22.79	9.39	29.32	FeO
O	48.90	70.31		
Totals	100.00			



Comment: Pirita

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.522, 1.491, 3.698 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

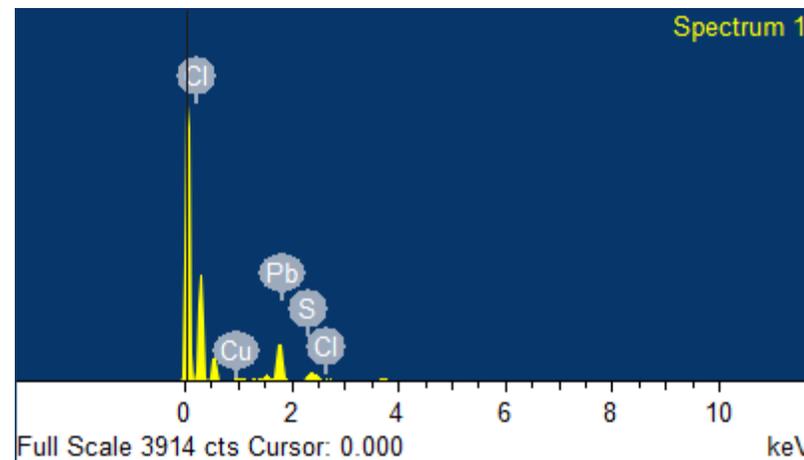
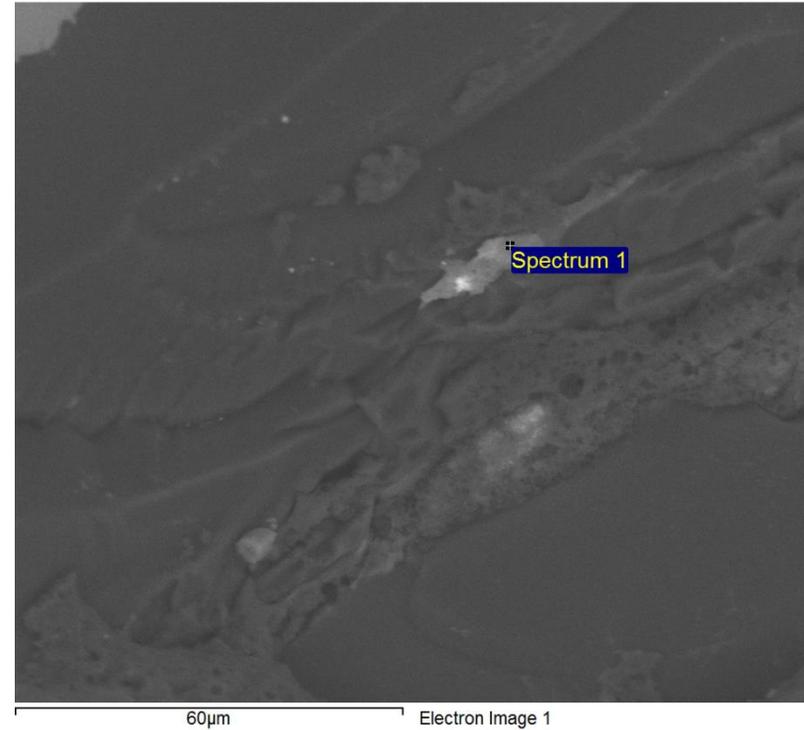
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Cl KCl 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Pb PbF2 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	12.29	33.59
Cl K	5.84	14.44
Cu L	18.12	25.00
Pb M	63.75	26.97
Totals	100.00	



Comment: galena (Pb,S)

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of iterations = 4

Standard :

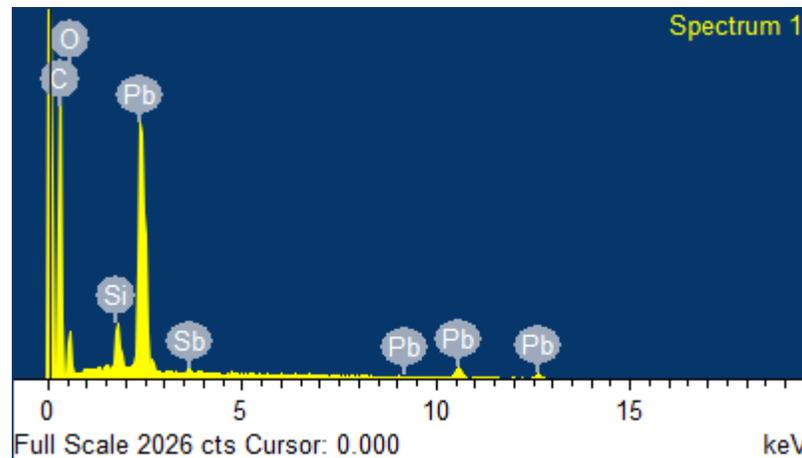
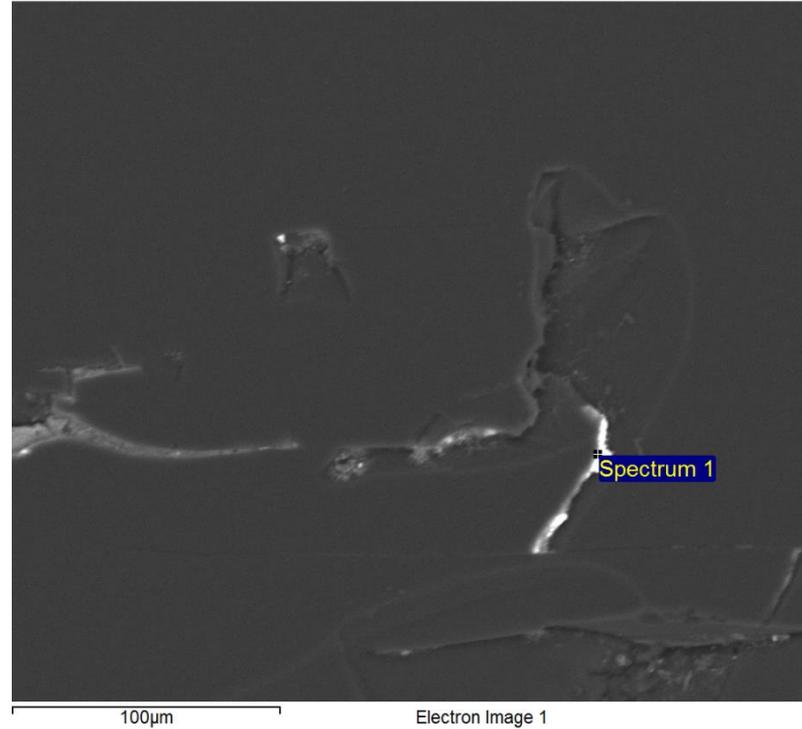
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Sb Sb 1-Jun-1999 12:00 AM

Pb PbF2 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	23.11	32.21	84.66	CO2
Si K	0.68	0.41	1.46	SiO2
Sb L	0.32	0.04	0.38	Sb2O3
Pb M	12.53	1.01	13.49	PbO
O	63.37	66.32		
Totals	100.00			



Comment: Cerusita

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 0.269 keV

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Co Co 1-Jun-1999 12:00 AM

Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM

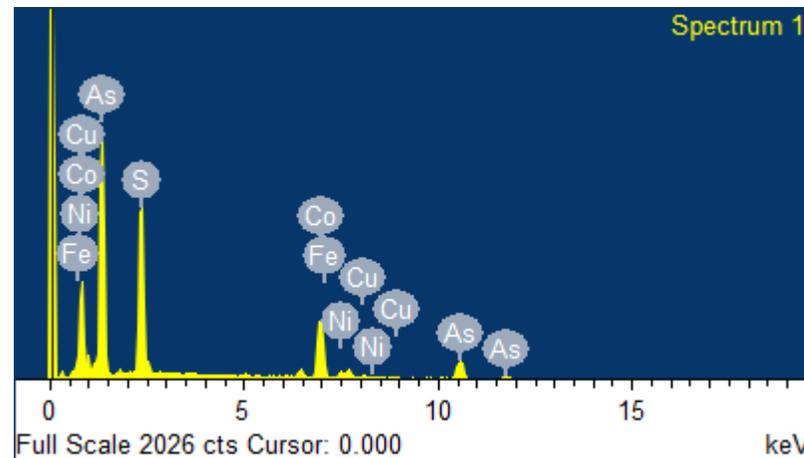
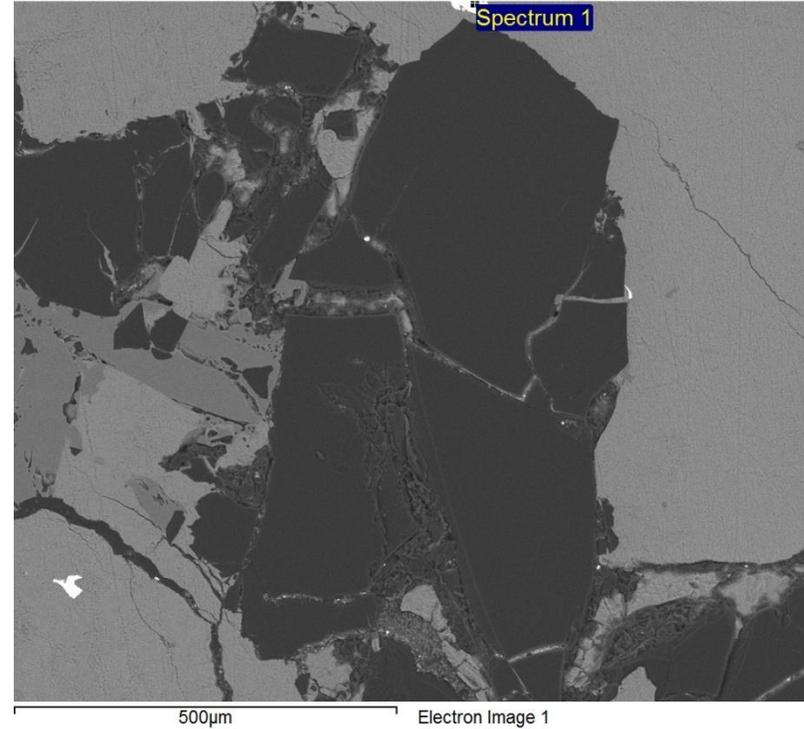
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

As InAs 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
S K	12.99	12.03	32.44	SO3
Fe K	1.65	0.88	2.12	FeO
Co K	17.01	8.57	21.62	CoO
Ni K	1.70	0.86	2.17	NiO
Cu K	1.26	0.59	1.58	CuO
As L	30.34	12.03	40.06	As2O3
O	35.04	65.04		

Comment: Cobaltita?

5



---

Totals	100.00
--------	--------

---

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.488, 1.745, 3.145, 3.712 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

Standard :

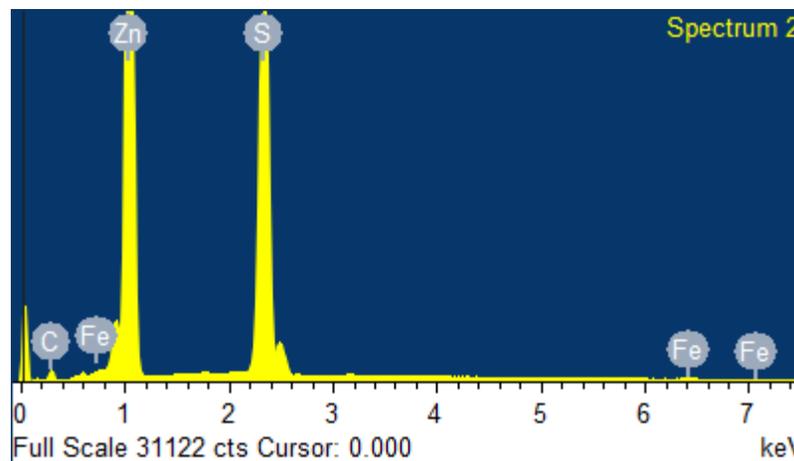
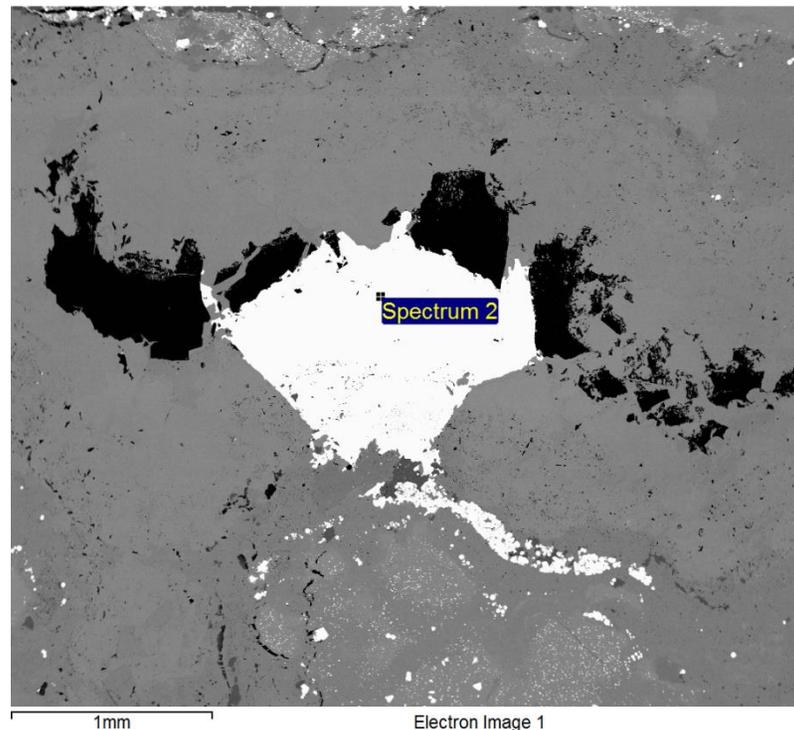
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	14.32	39.61
S K	31.87	33.01
Fe K	0.44	0.26
Zn K	53.36	27.11
Totals	100.00	



Comment: Esfalerita

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.741, 1.960, 12.910 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

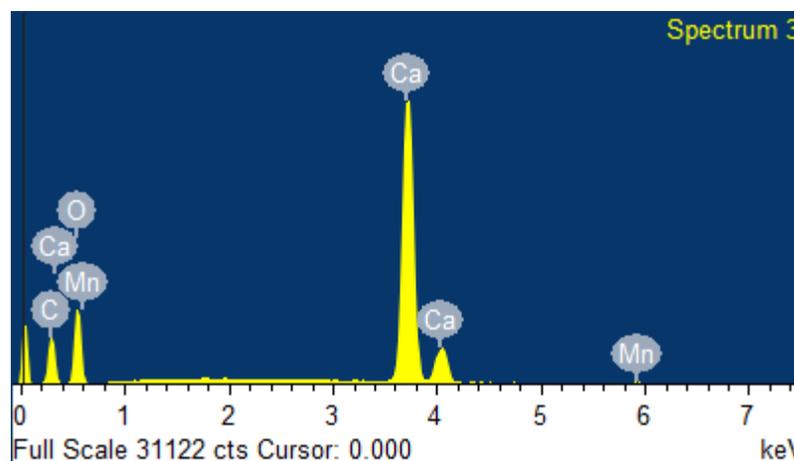
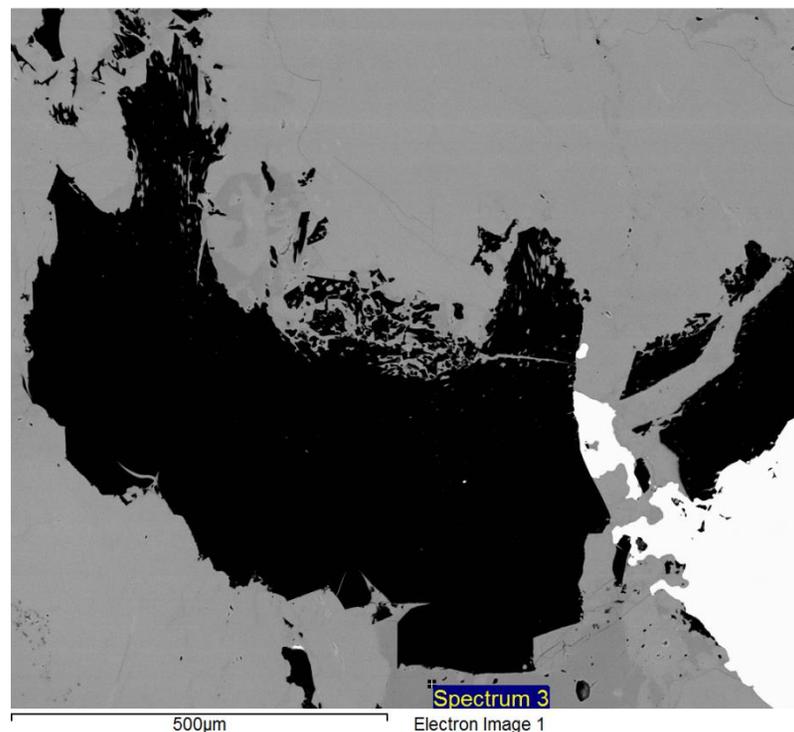
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	13.99	22.39
O K	50.39	60.55
Ca K	35.40	16.98
Mn K	0.22	0.08
Totals	100.00	



Comment: Calcitacon Mn

# El Soldado MZ0491

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 0.268 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

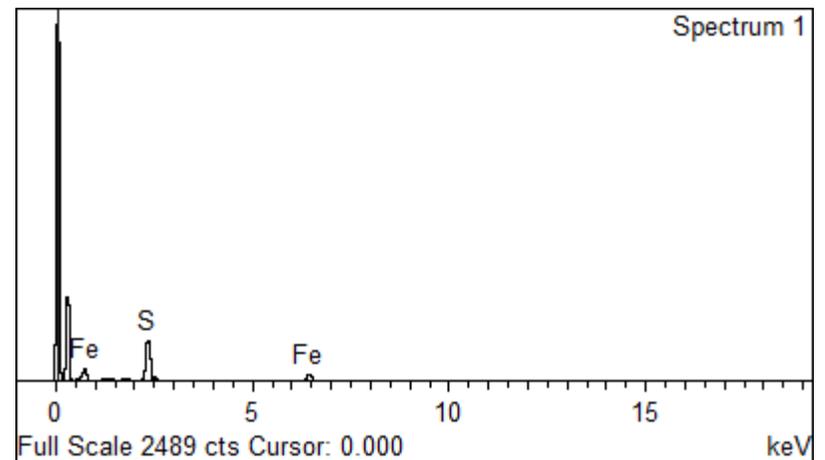
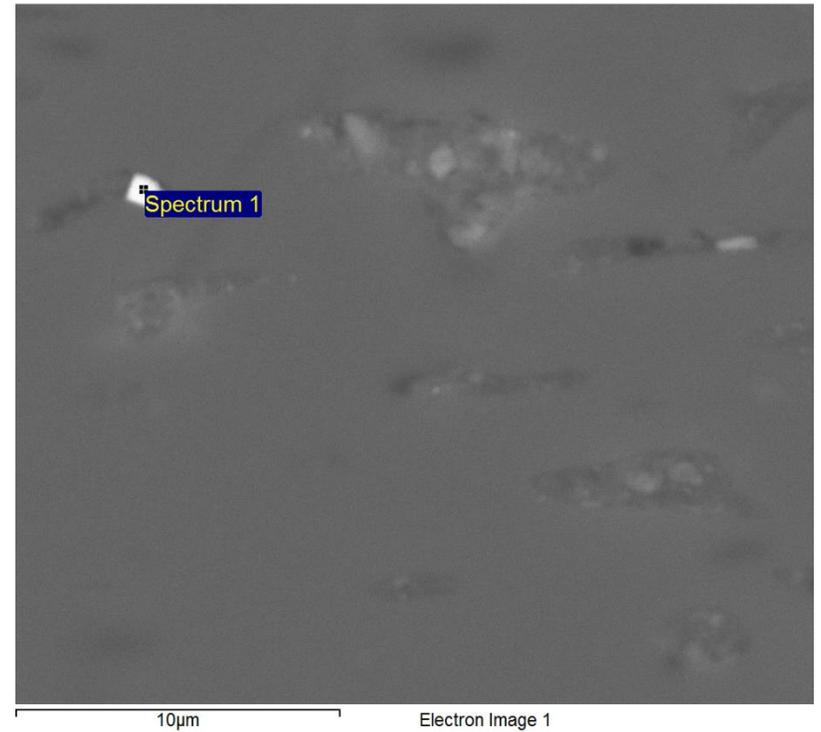
Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	53.74	66.92
Fe K	46.26	33.08
Totals	100.00	

Comment:Pirita



Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 0.275 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

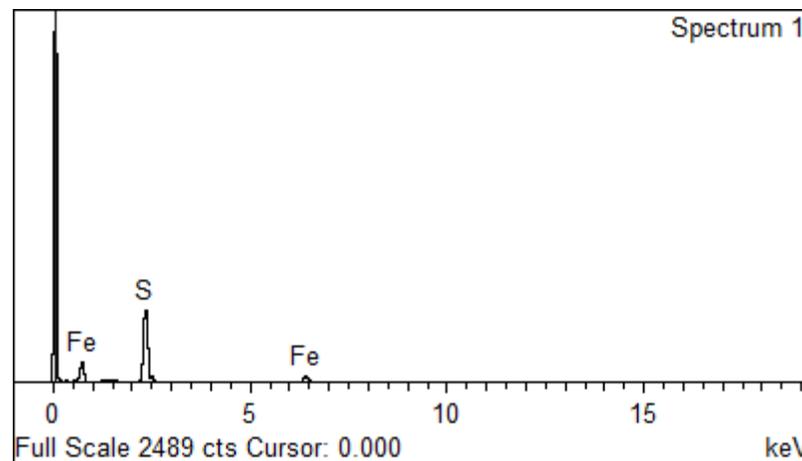
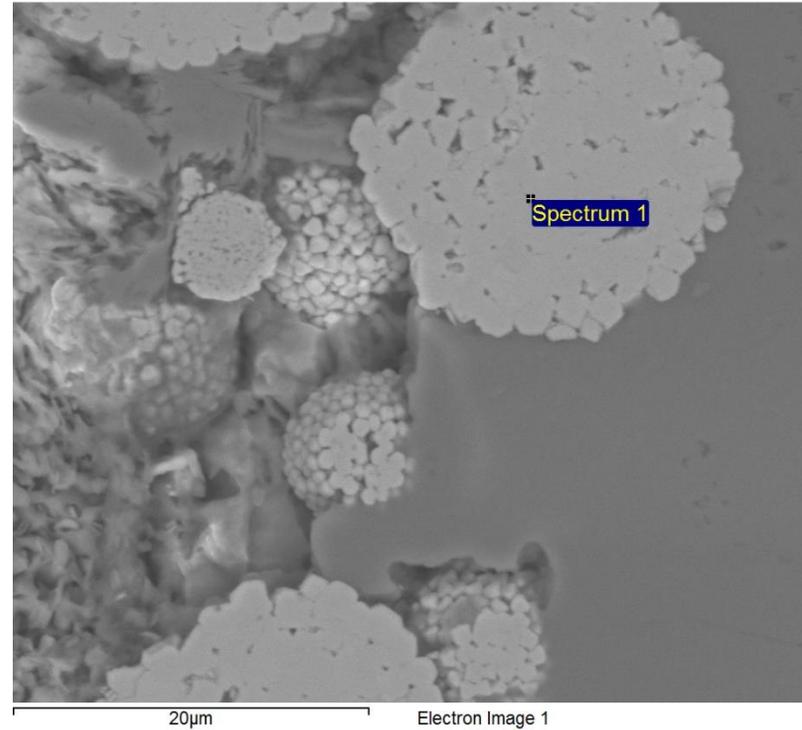
Number of iterations = 2

Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	64.83	76.25
Fe K	35.17	23.75
Totals	100.00	



Comment:

10

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 0.269 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

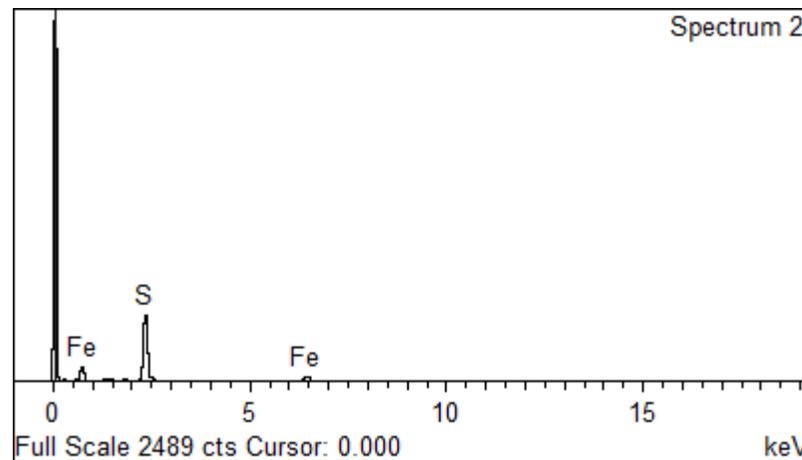
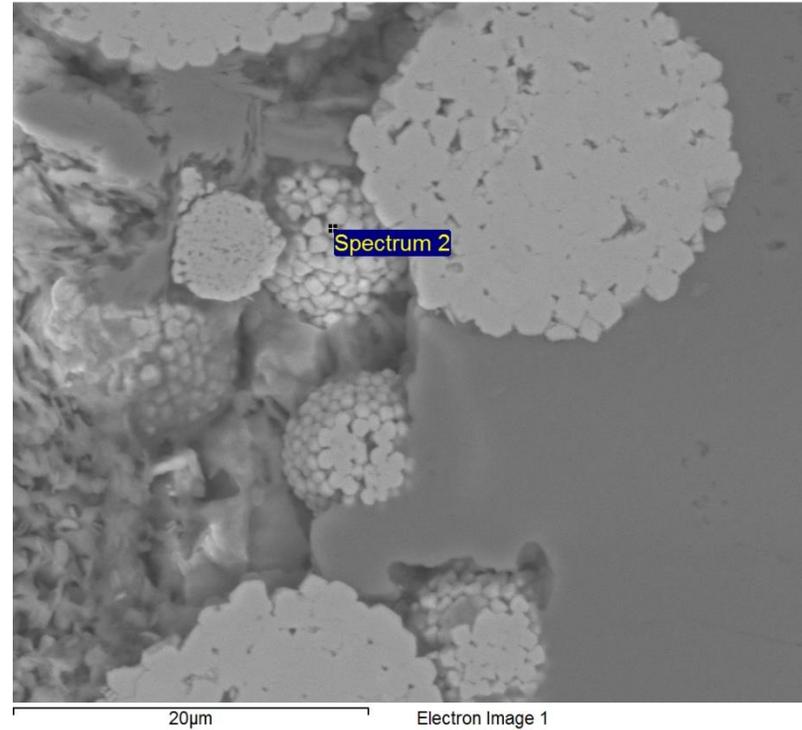
Number of iterations = 2

Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	66.22	77.34
Fe K	33.78	22.66
Totals	100.00	



Comment:

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 0.269 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

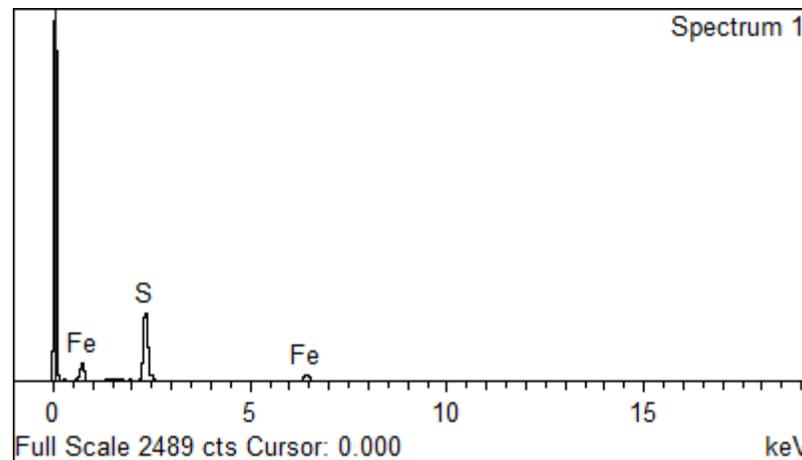
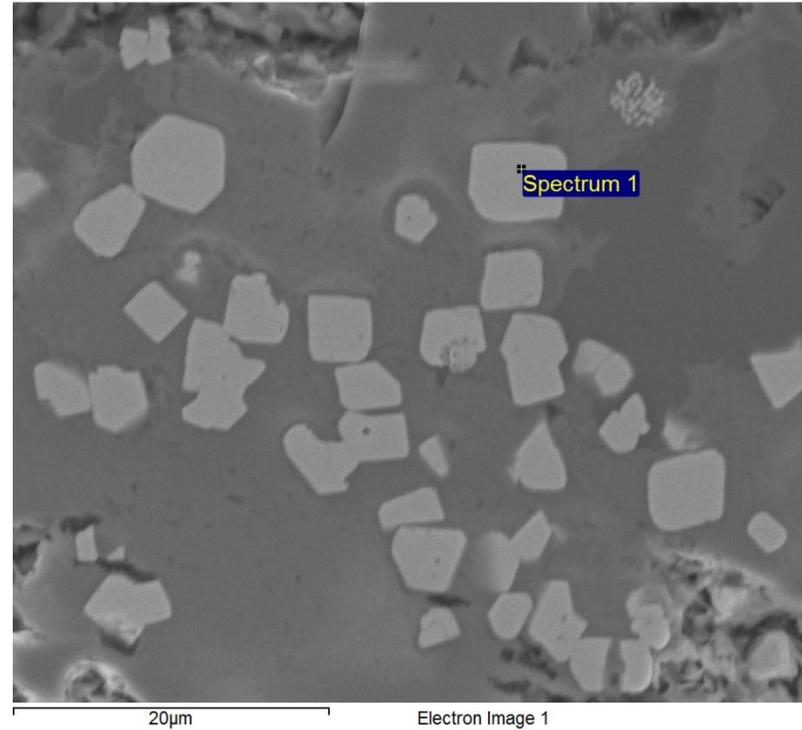
Number of iterations = 2

Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	65.90	77.10
Fe K	34.10	22.90
Totals	100.00	



Comment:

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 0.269 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

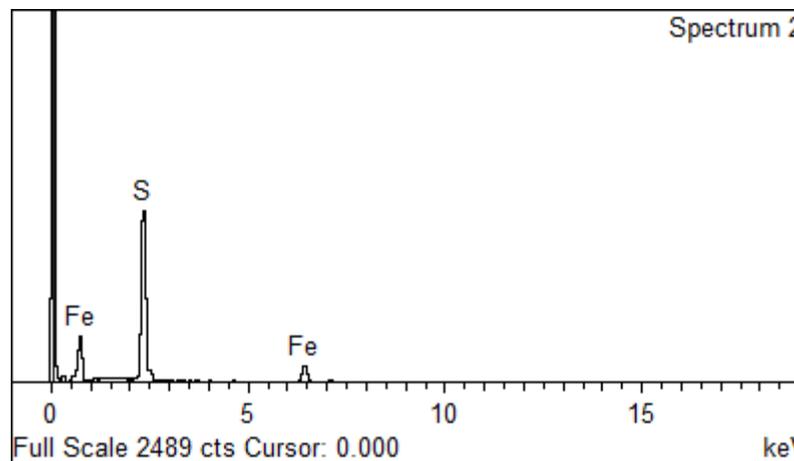
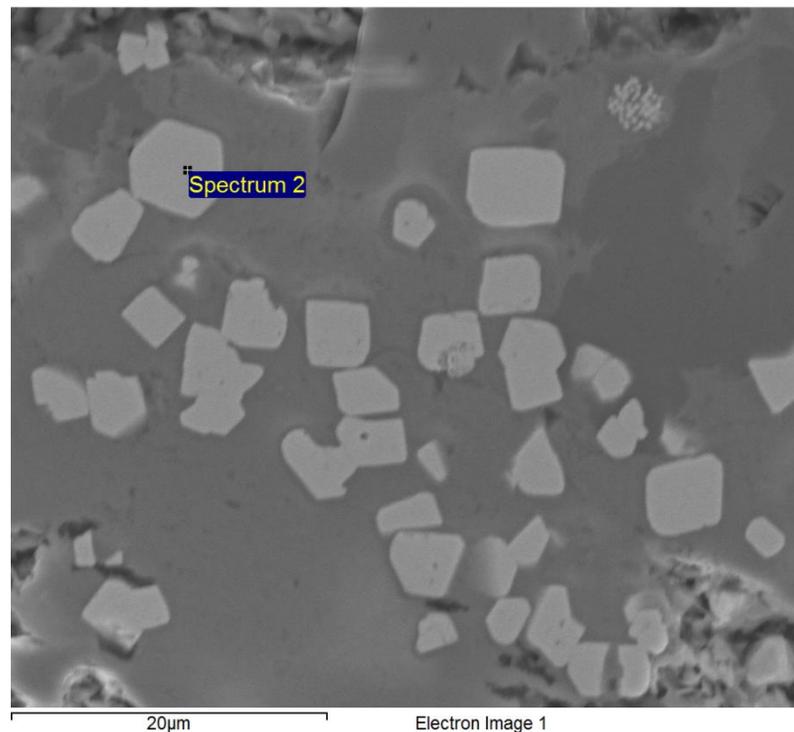
Number of iterations = 2

Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	66.59	77.64
Fe K	33.41	22.36
Totals	100.00	



Comment:

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.758, 3.135 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM

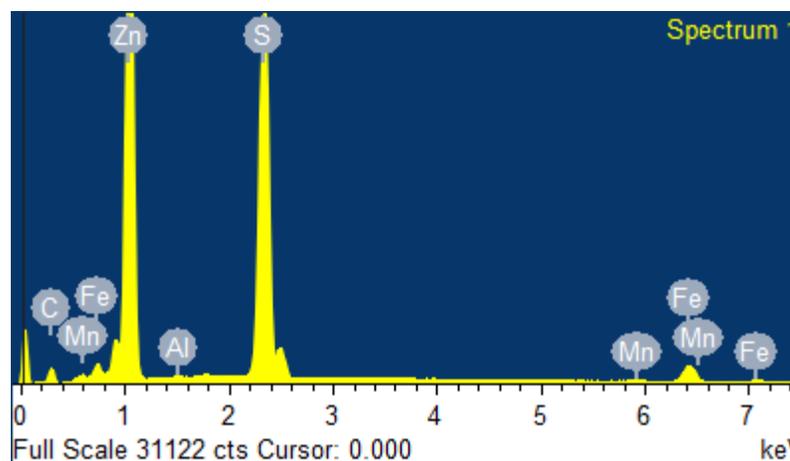
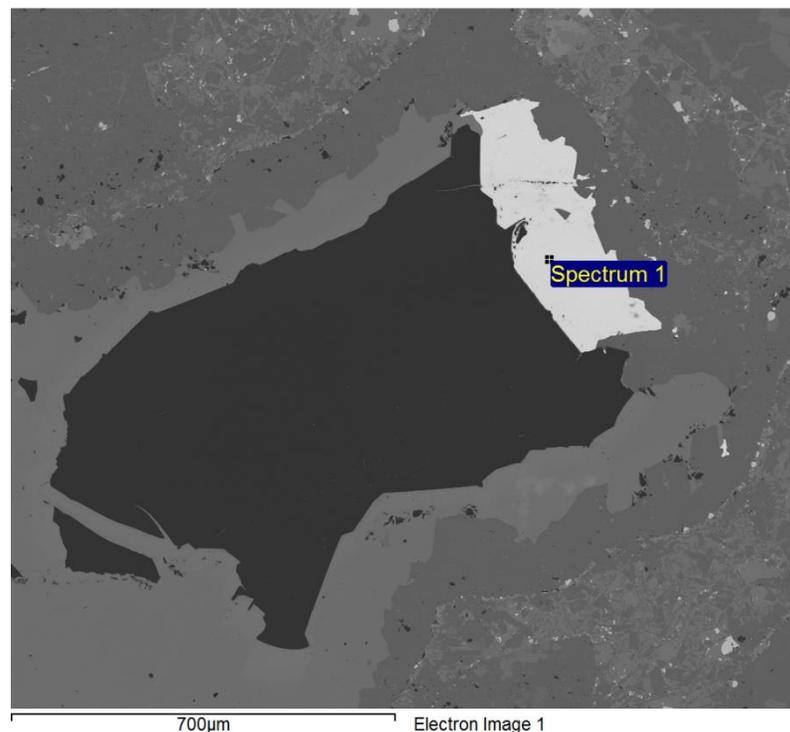
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	21.21	51.16
Al K	0.19	0.20
S K	29.27	26.45
Mn K	0.29	0.15
Fe K	3.92	2.03
Zn K	45.12	20.00
Totals	100.00	



Comment:

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.264, 1.745, 1.963, 12.520 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

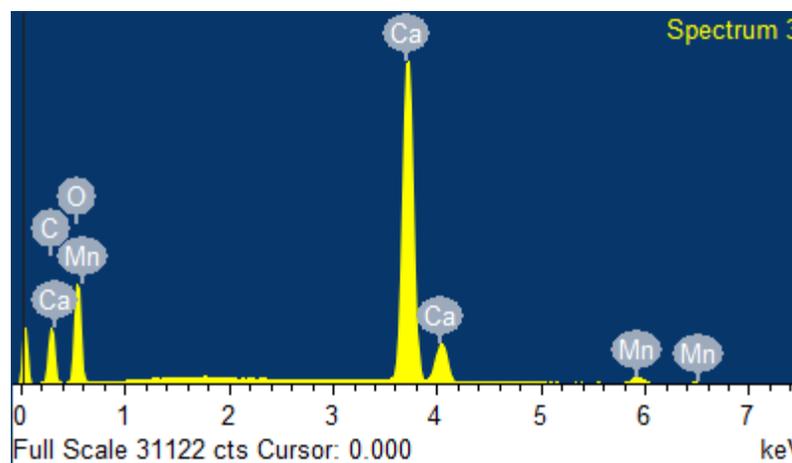
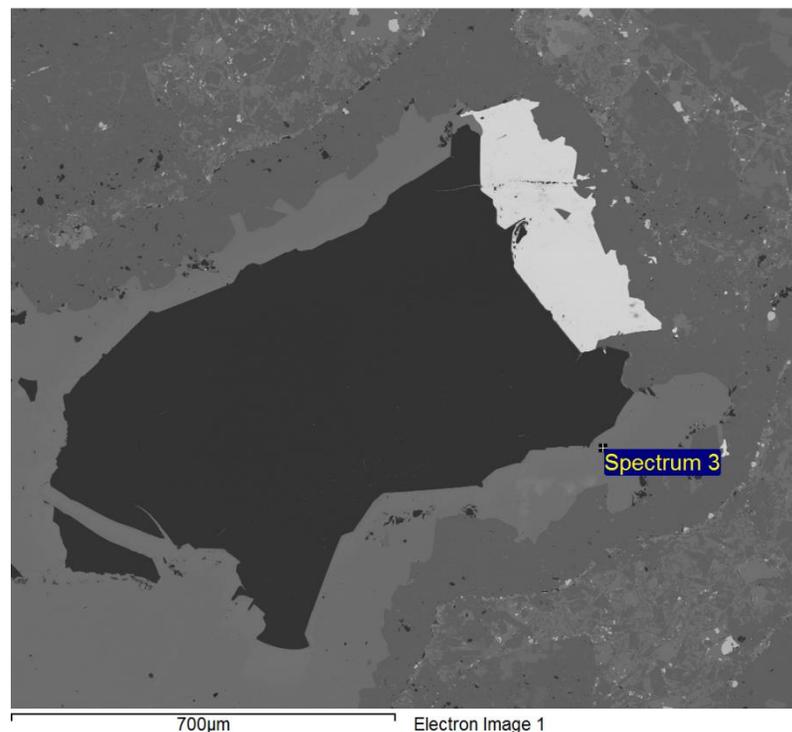
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	13.88	21.97
O K	52.30	62.16
Ca K	32.41	15.38
Mn K	1.41	0.49
Totals	100.00	



Comment: Calcita

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 6

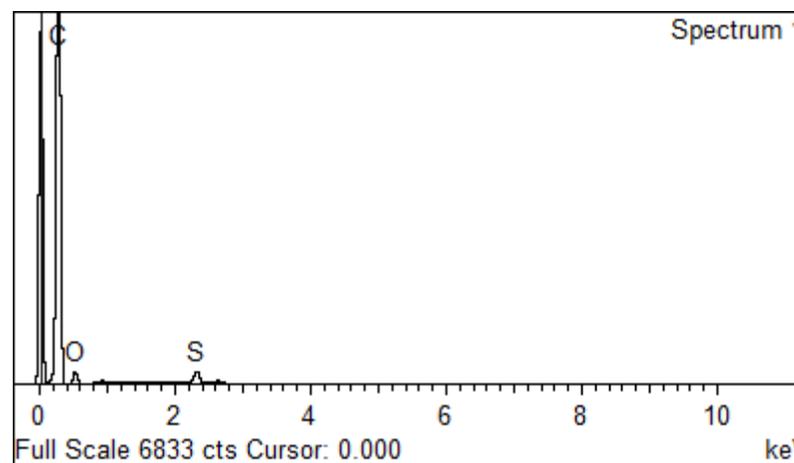
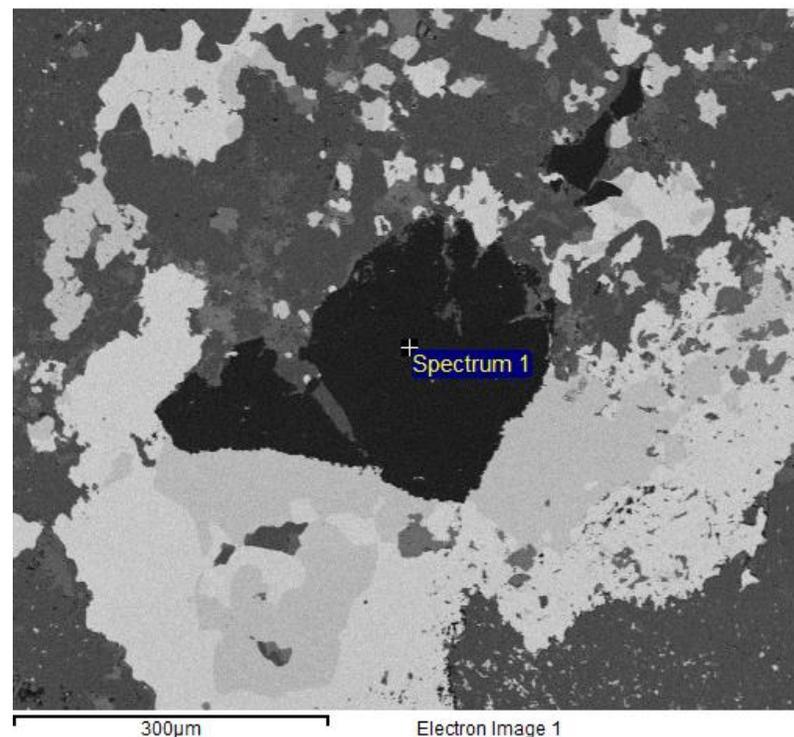
Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	89.92	92.77
O K	8.59	6.65
S K	1.49	0.57
Totals	100.00	



Comment:1

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.268, 1.492, 1.741 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

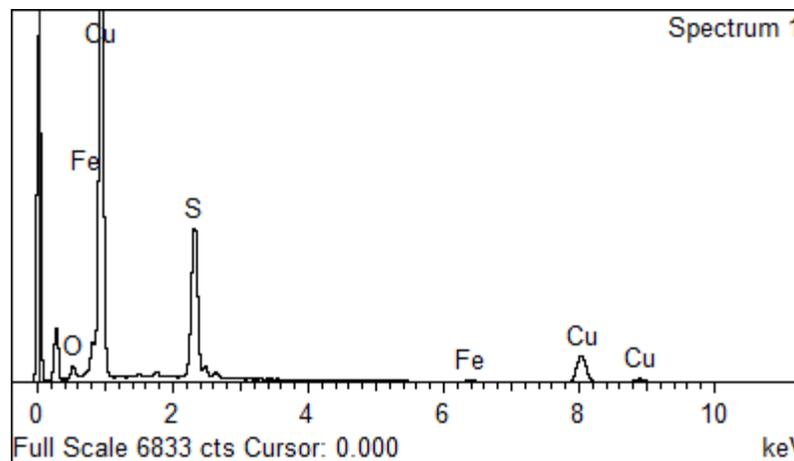
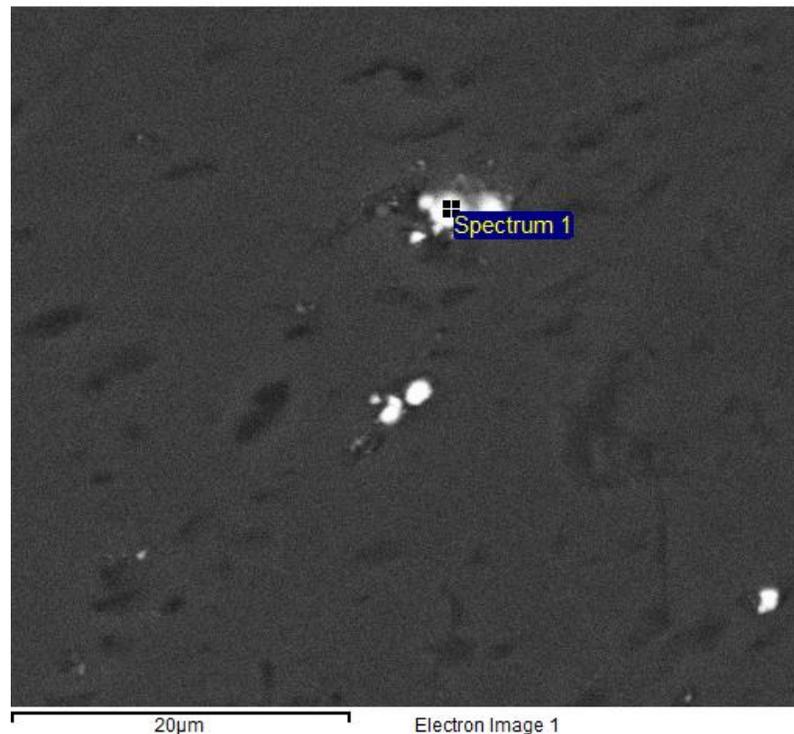
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	3.42	10.29
S K	21.99	33.05
Fe K	0.67	0.58
Cu L	73.92	56.08
Totals	100.00	



Comment:calcosina

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 0.268, 1.492, 1.741 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

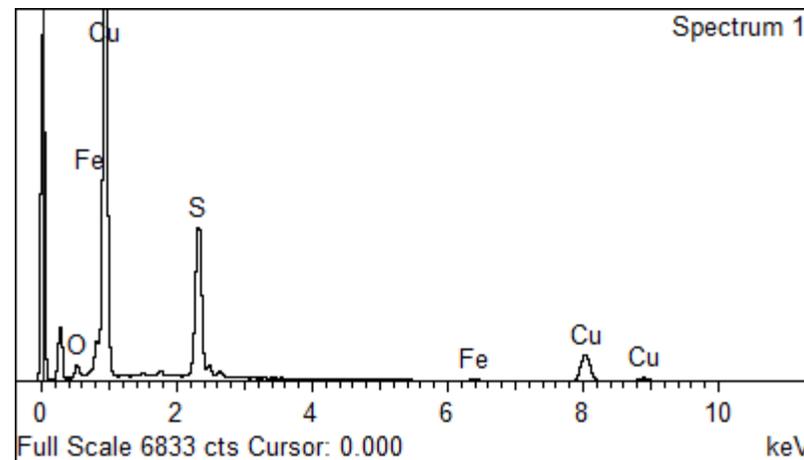
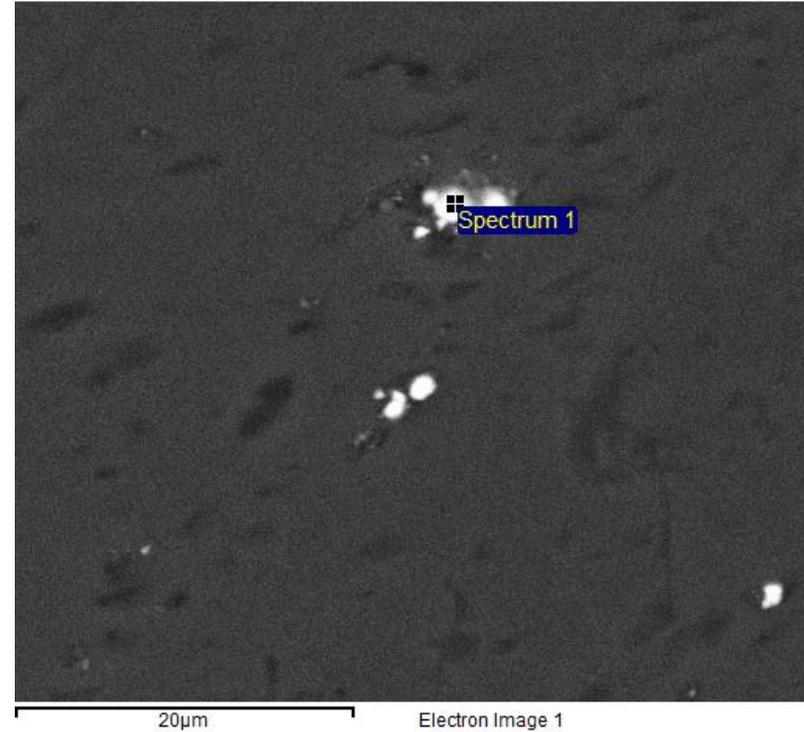
O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	3.42	10.29
S K	21.99	33.05
Fe K	0.67	0.58
Cu L	73.92	56.08
Totals	100.00	



Comment:Calcosina

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.490, 1.741 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

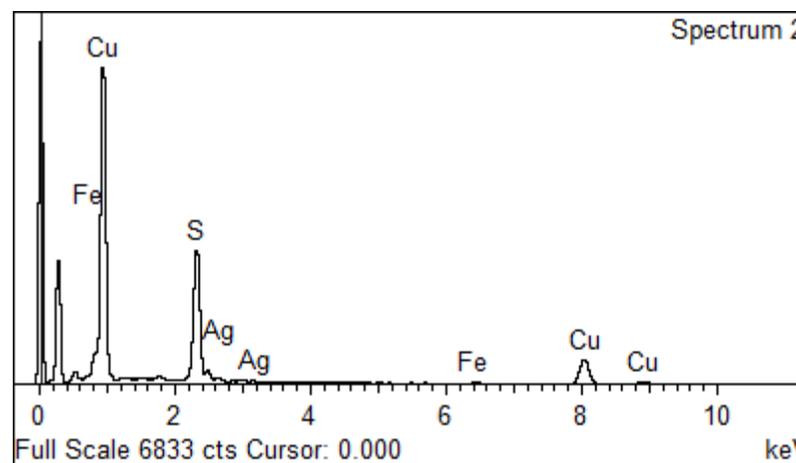
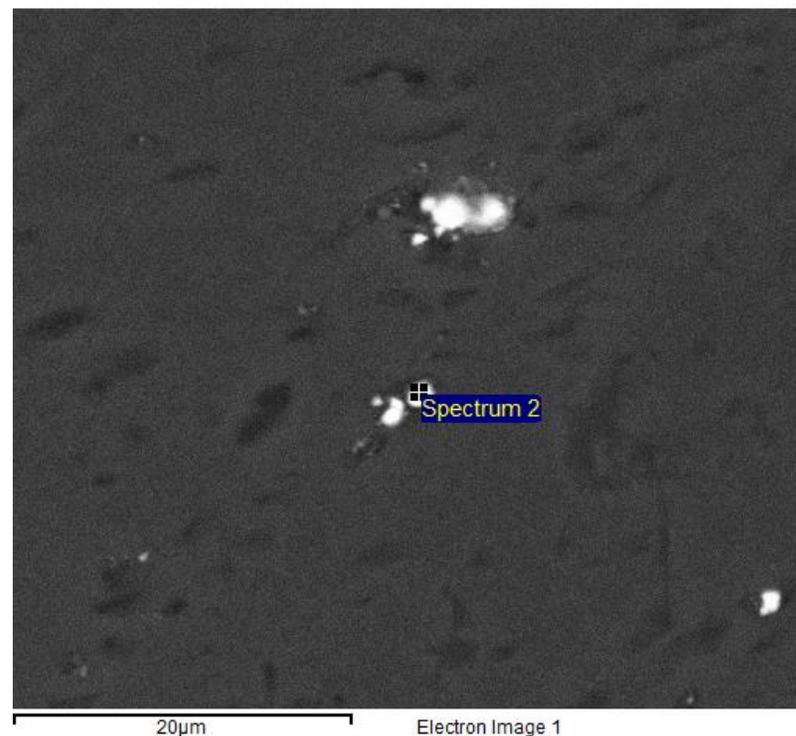
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	23.48	37.89
Fe K	0.78	0.72
Cu L	74.85	60.96
Ag L	0.90	0.43
Totals	100.00	



Comment: Calcosina con Ag

Spectrum processing :

Peaks possibly omitted : 1.493, 1.742 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 2

Standard :

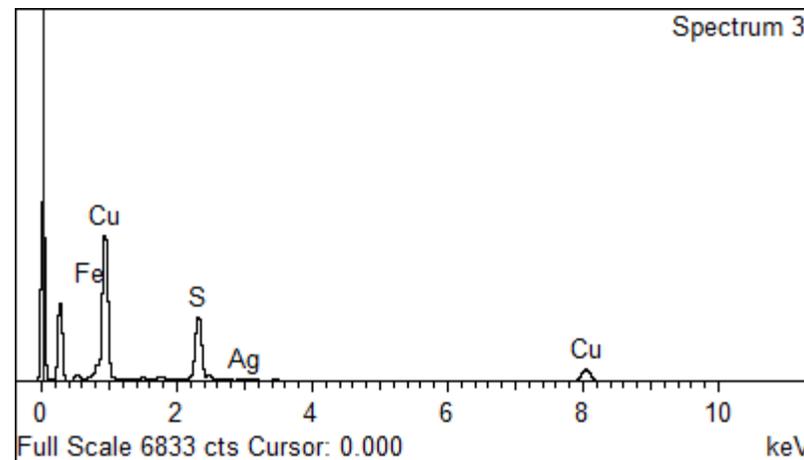
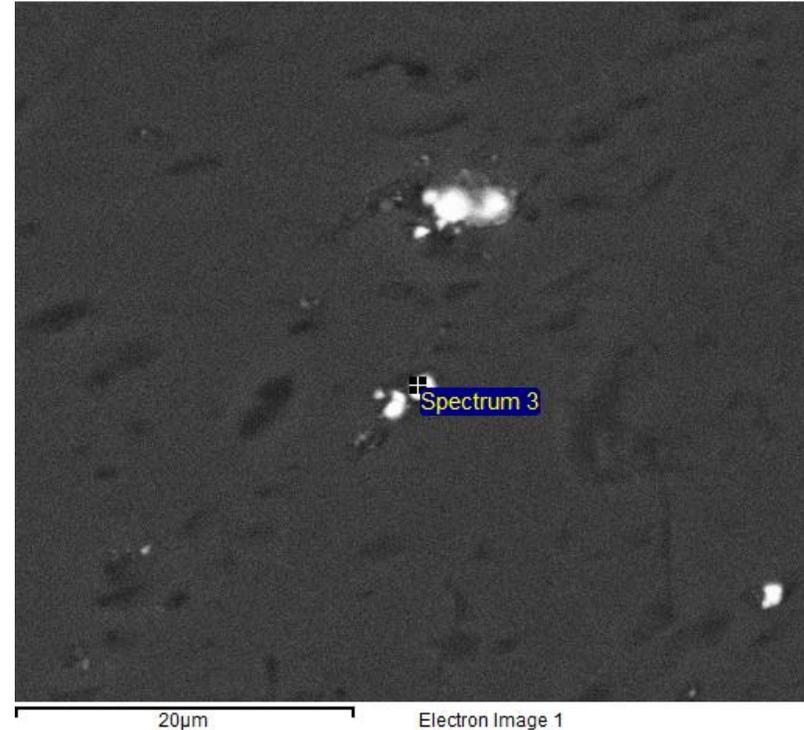
S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Ag Ag 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	24.11	38.73
Fe K	0.99	0.92
Cu L	73.88	59.88
Ag L	1.01	0.48
Totals	100.00	



Comment:Calcosina con Ag

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

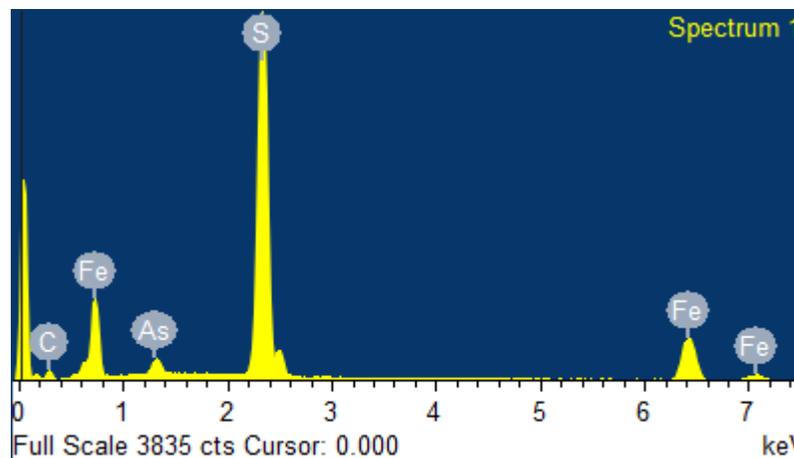
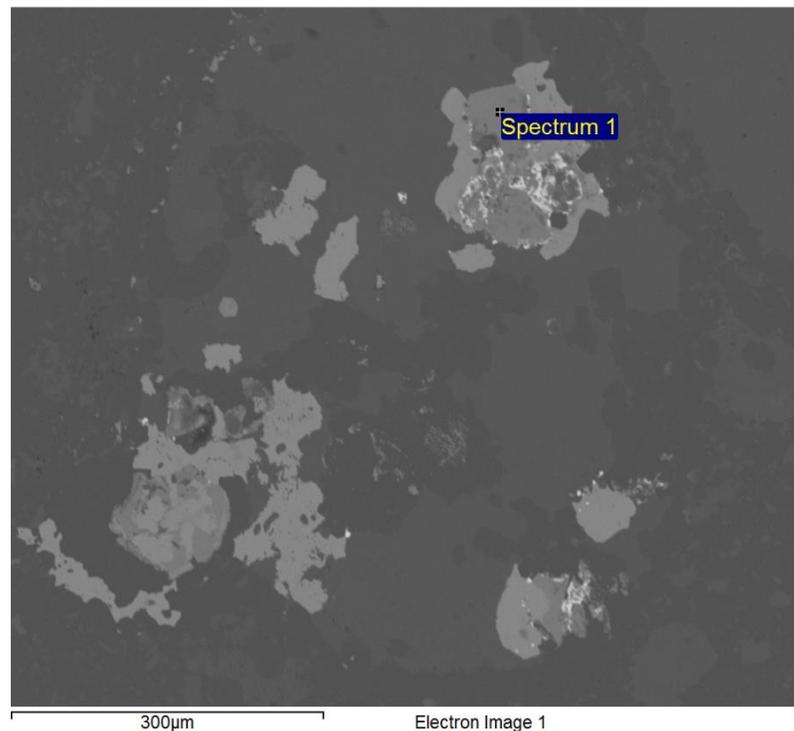
C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

As InAs 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	17.38	40.95
S K	46.65	41.18
Fe K	33.14	16.80
As L	2.84	1.07
Totals	100.00	



Comment:Pirita con As

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 3.682 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

Standard :

C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM

O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

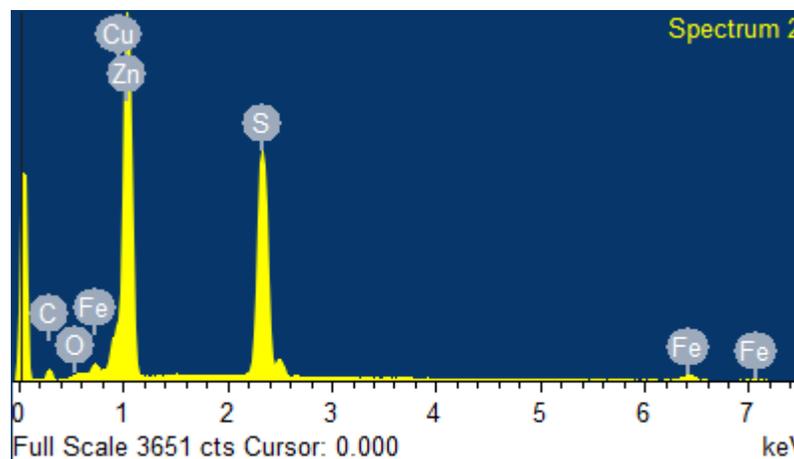
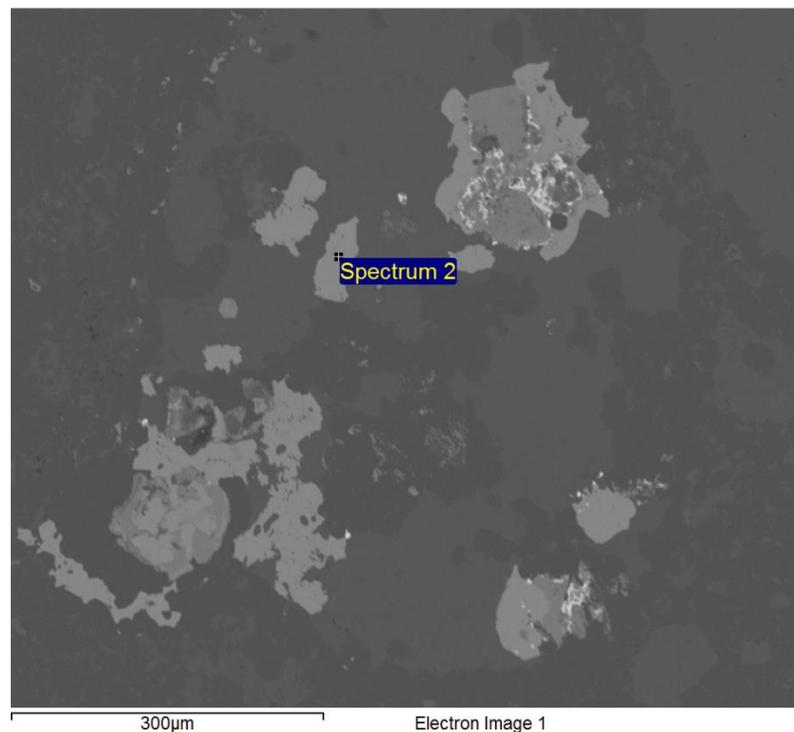
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Zn Zn 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	11.90	35.29
O K	1.01	2.25
S K	25.91	28.78
Fe K	2.91	1.85
Cu L	4.94	2.77
Zn L	53.33	29.05
Totals	100.00	

Comment: Esfalerita



Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 0.267 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

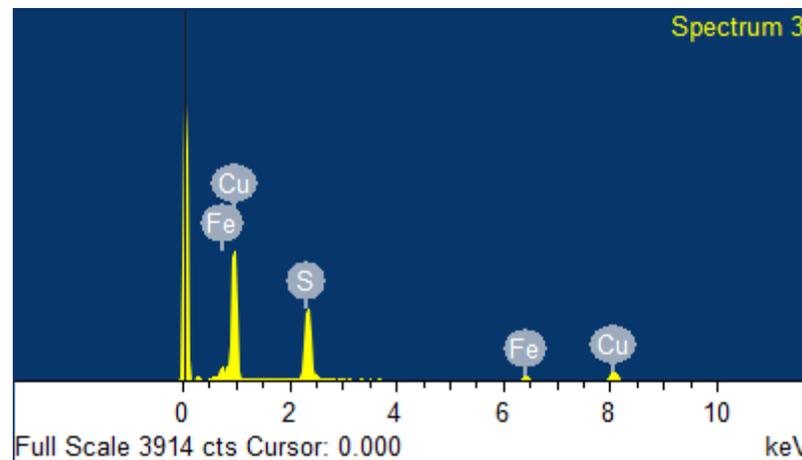
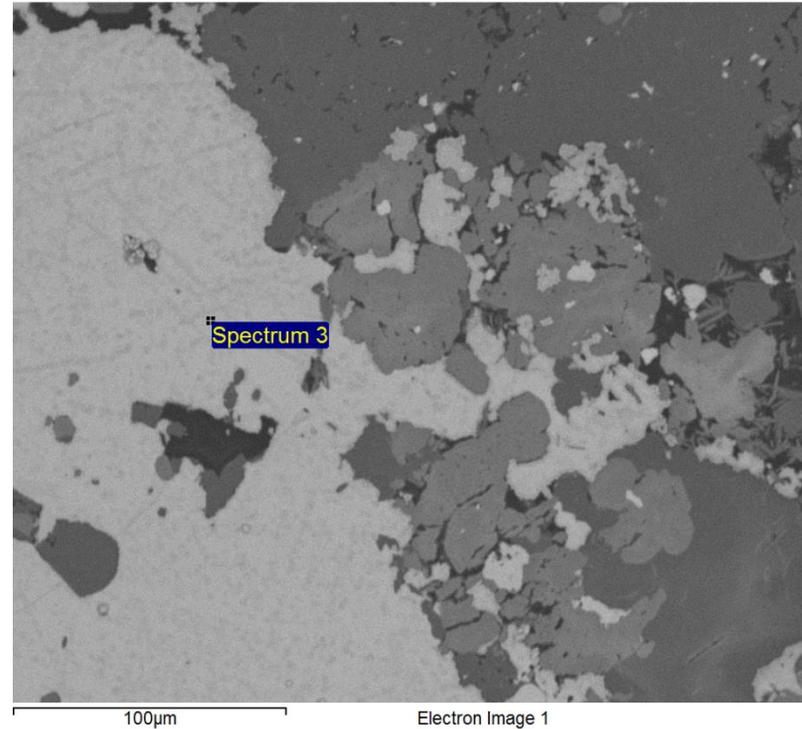
Standard :

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
S K	23.83	37.93
Fe K	7.98	7.29
Cu L	68.19	54.77
Totals	100.00	



Comment:bornita

