



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

**MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS VETAS DE  
Cu-(Ag) DE LA MINA 21 DE MAYO, DISTRITO  
TALCUNA, REGIÓN DE COQUIMBO**

*MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO*  
**JUAN GUILLERMO GONZÁLEZ ESPINOZA**

**PROFESOR GUÍA:**  
FERNANDO BARRA PANTOJA

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**  
MARTIN REICH MORALES  
DIEGO MORATA CÉSPEDES

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FONDECYT – 1140780  
y Núcleo Milenio Trazadores de Metales en Zonas de Subducción NC1300065

**SANTIAGO DE CHILE**  
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo  
**POR:** Juan Guillermo González Espinoza  
**FECHA:** 06/08/2018  
**PROFESOR GUIA:** Fernando Barra Pantoja

**MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LAS VETAS DE Cu-(Ag) DE LA MINA 21  
DE MAYO, DISTRITO TALCUNA, REGIÓN DE COQUIMBO.**

La mina 21 de Mayo, de propiedad de la Compañía Minera San Gerónimo, se encuentra en un yacimiento del tipo estratoligado de Cu-(Ag) ubicado en el distrito minero Talcuna de la franja metalogénica del Cretácico de la Cordillera de la Costa del norte de Chile. El yacimiento, actualmente en explotación, se caracteriza por presentar una mineralización de cobre dominada por bornita y calcosina y con altas leyes de plata.

El objetivo principal de este estudio es determinar los controles mineralógicos de la ocurrencia de la plata en la mina 21 de Mayo con el propósito de refinar el modelo de formación del yacimiento y aportar información relevante para el desarrollo de la mina y el procesamiento mineral. Para cumplir con el objetivo propuesto, se realizaron estudios petrográficos detallados, análisis composicionales semi-cuantitativos de fases de mena de cobre y plata mediante microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS), y análisis composicionales cuantitativos de bornita y calcosina mediante microsonda electrónica.

Los estudios petrográficos combinados con los análisis composicionales permiten identificar cuatro eventos de mineralización/alteración en el depósito. El primer evento está caracterizado por la presencia de escaso bitumen seguido de la precipitación de pirita y abundante calcopirita. Este es seguido por un segundo evento con precipitación de tennantita-tetraedrita, la cual es reemplazada total o parcialmente por bornita y calcopirita. El tercer evento corresponde al evento principal de Cu-Ag y se caracteriza por bornita y calcosina con textura de intercrecimiento mirmequítico, y en menor medida, por galena, sulfuros y arseniuros de Cu-Ag (stromeyerita?, argentodomeikita?), sulfuros de Ni y Cd (niquelina?, greenockita/hawleita?), sulfosales de Cu-Ni-Co y aleaciones del tipo Ag-Hg (arquerita?) y Ag-Au (electrum). El último evento de mineralización es de carácter restringido y corresponde a la formación de djurleita/anilita por procesos supérgenos.

Las elevadas leyes de plata reportadas en el yacimiento se explican por la precipitación de distintas fases minerales de plata y por la elevada concentración de Ag en bornita y calcosina determinadas mediante microsonda electrónica. Los estudios realizados permiten sugerir que la plata se incorpora preferentemente en la calcosina, seguida por la bornita en solución sólida o como nanoinclusiones “invisibles”.

Las altas leyes de Ag en la mina 21 de Mayo y su cercanía al distrito de argentífero de Arqueros sugieren una probable superposición de un sistema epitermal rico en Ag por sobre un evento primario que dio origen a los estratoligados de Cu-(Ag) en el distrito Talcuna.

*“Seamos realistas, pidamos lo  
imposible”*  
Mayo francés de 1968

A Guillermo, Leonila y Clara  
que siempre me impulsaron en  
este caminar.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a los miembros de mi comisión, Dr. Fernando Barra, Dr. Martin Reich y Dr. Diego Morata. Con particular énfasis me gustaría agradecer a mi profesor guía, Dr. Fernando Barra, por apoyarme, enseñarme y guiarme en todo este proceso, una vez más disculpe todos los inconvenientes y de todo corazón muchas gracias por creer en mí.

Este trabajo se realizó gracias al financiamiento del proyecto FONDECYT 1140780, el Núcleo Milenio NC130065 “Trazadores de Metales en Zonas de Subducción” y la Compañía Minera San Gerónimo.

Agradecer a la Compañía Minera San Gerónimo, a Joaquín Lara por conseguir el apoyo de la empresa para realizar este estudio y en particular a Don Raúl Madariaga, muchas gracias por su buena voluntad.

Sin lugar a duda los agradecimientos más importantes son a mis padres, Gustavo y Edith, gracias por su apoyo en cada momento de mi vida. Gracias por el esfuerzo que han realizado durante estos años, tanto por mi hermana y por mí. Gracias por cada una de sus enseñanzas, ya que sin ellas no sería quien soy hoy en día y aunque nunca lo diga, los amo! A mi hermana Estefanía, por ser una compañera de vida y a pesar de las diferencias que tenemos la relación que hemos forjado nos permite sobrellevar los conflictos.

A mis amigos de la vida Kito, Edo, Gon, Katy, Naty, Nico, Elda y Javi. Gracias por la amistad, por comprenderme, por las juntas, por el apoyo y sobre todo por los buenos momentos vividos. A mi madrina Sol, por ser la mejor prima y un ejemplo que seguir, te mereces lo mejor.

A mis compañeros de generación, ya que cada uno apporto en mi proceso formativo, en particular a Loreto y Daniel por los buenos momentos, las conversaciones y la amistad. Además, agradecer a los integrantes del Núcleo Milenio por su amabilidad y disposición, en particular a Gilla y Salo por su buena voluntad y sobre todo a Jorge Crespo su ayuda en los análisis de microsonda electrónica.

Finalmente agradecer a cada una de las personas maravillosas que he conocido en este caminar, cada uno de ustedes ha contribuido a mi crecimiento como persona y me han permitido estar hoy aquí. ¡Muchas gracias!

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	PRESENTACIÓN .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	3
1.2.1	Objetivos generales .....	3
1.2.2	Objetivos específicos .....	3
1.3	HIPÓTESIS .....	3
1.4	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	4
1.4.1	Revisión de antecedentes geológicos disponibles .....	4
1.4.2	Base de datos Cu-Ag-As .....	4
1.4.3	Revisión de sondajes y selección de muestras.....	4
1.4.4	Descripción de cortes .....	5
1.4.5	Microscopio electrónico de barrido (SEM), Microsonda electrónica (EMPA) e Isótopos estables de azufre. ....	5
1.5	ANTECEDENTES .....	7
1.6	MARCO TECTÓNICO.....	9
1.7	UBICACIÓN Y ACCESOS .....	10
2	MARCO GEOLÓGICO .....	11
2.1	GEOLOGÍA REGIONAL.....	11
2.1.1	Unidades Estratificadas .....	11
2.1.1.1	Formación Quebrada Marquesa .....	11
2.1.2	Depósitos No Consolidados .....	11
2.1.3	Rocas Intrusivas.....	12
2.1.4	Estructuras.....	12
2.2	GEOLOGÍA DISTRITAL.....	14
2.2.1	Formación Quebrada Marquesa .....	14
2.2.1.1	Miembro 1 (Kqm1) .....	14
2.2.1.2	Miembro 2 (Kqm2) .....	14
2.2.1.3	Miembro 3 (Kqm3) .....	14
2.2.1.4	Miembro 4 (Kqm4) .....	16
2.2.2	Intrusivos .....	16
2.2.3	Estructuras.....	16
2.2.4	Mineralización y Alteración .....	17
2.3	GEOLOGÍA MINA 21 DE MAYO.....	17
3	RESULTADOS .....	19

3.1	PETROGRAFÍA .....	19
3.1.1	Litología y metamorfismo regional .....	19
3.1.2	Eventos de mineralización y alteración.....	21
3.1.2.1	Evento 1 .....	21
3.1.2.2	Evento 2.....	24
3.1.2.3	Evento 3.....	26
3.1.2.4	Evento 4.....	32
3.2	PARAGÉNESIS MINERAL.....	33
3.3	MICROSONDA ELECTRÓNICA (EMPA).....	34
3.4	DATOS DE LEY DE Cu-Ag-As.....	36
3.5	ISÓTOPOS DE AZUFRE.....	36
4	DISCUSIÓN.....	37
4.1	MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN.....	37
4.2	ROL DEL BITUMEN .....	38
4.3	ISÓTOPOS DE AZUFRE.....	38
4.4	FORMA Y OCURRENCIA DE LA PLATA .....	39
4.5	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS. ....	40
4.6	MINA 21 DE MAYO Y ESTRATOLIGADOS Cu-(Ag) DEL DISTRITO.....	41
4.7	GÉNESIS DE LA MINA 21 DE MAYO .....	42
5	CONCLUSIÓN .....	45
6	BIBLIOGRAFÍA.....	46
	ANEXOS .....	50
	Anexo A: Descripciones petrográficas. ....	50
	Anexo B: Microscopio electrónico de barrido (SEM).....	54
	ANEXO C: Análisis químicos de fases sulfuradas obtenidos mediante microsonda electrónica. ....	67
	Anexo D: Isótopos de azufre. ....	70

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ubicación de yacimientos tipo Estratoligados de Cu±Ag. Modificada de Kojima et al. (2009).....	2
Figura 2 – Marco tectónico durante el Cretácico inferior. Tomada de Scheuber y González (1999).....	9
Figura 3 – Imagen referencial de los accesos al distrito Talcuna. Modificada de Santana (2017).....	10
Figura 4 - Mapa geológico regional y ubicación del distrito Talcuna. Modificado de Romero (2008).....	13
Figura 5 - Columna Estratigráfica esquemática de la Formación Quebrada Marquesa. Tomado de Santana (2017). .....	15
Figura 6 - Túneles y vetas mineralizadas de la mina 21 de Mayo. Se indica el nombre de las vetas estudiadas y las galerías de acceso (en rojo). Coordenadas mina 21 de Mayo...	18
Figura 7 - Fotomicrografía de amígdala rellena con cristales de pumpellyita (Pmp) producto del metamorfismo regional. Se reconocen además óxidos de hierro (Ox. Fe) y plagioclasas (Pl) moderadamente alteradas a arcillas.....	19
Figura 8 – Fotomicrografía prehnita (Prh) y ceolitas (Ceo) del metamorfismo regional. ....	20
Figura 9 - Fotomicrografía de amígdalas de lava andesítica rellenas con clorita (Chl), calcita (Cal) y ceolitas (Ceo).....	20
Figura 10 - Fotomicrografía de calcopirita (Cpy) reemplazando a piritita (Py). Se observa además bitumen (Bit) rodeado por calcopirita.....	22
Figura 11 – Fotomicrografía de piritita anhedral (Py) reemplazada por calcopirita (Cpy). .	22
Figura 12 - Fotomicrografía de veta de calcopirita (Cpy) y piritita (Py) cortada por vetillas de calcita y baritina del Evento 2. ....	23
Figura 13 - Imagen BSE de bitumen (Bit) con calcosina (Cc). La muestra corresponde a bitumen poroso del Miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa. ....	23
Figura 14 – Fotomicrografía de tennantita (Tn) reemplazada por calcopirita (Cpy) y bornita (Bn). Se observa tanto mineralización en veta como diseminada.....	24
Figura 15 - Solución sólida de tennantita – tetraedrita (Tn-Tr) reemplazada por bornita (Bn). Puntualmente se observa galena (Gal) en bornita. ....	25
Figura 16 – Fotomicrografía de vetilla de baritina (Bar) y calcita (Cal) cortando el Evento 1 de calcopirita-piritita (Cpy-Py).....	25
Figura 17 - Imagen BSE de la fase temprana del Evento 3, con presencia de abundante baritina (Bar) intercrecida con probable arquerita (Ag-Hg), galena (Gn), calcita (Cal) y niquelina (NiAs). ....	26
Figura 18 - Fotomicrografía de inclusiones de probable arquerita (Ag-Hg), bornita (Bn) y calcosina (Cc) en baritina.....	27
Figura 19 - Imagen BSE del Evento 3 en donde se reconoce sulfosales de níquel y/o cobalto (SS Ni-Co) y arquerita? (Ag-Hg) en baritina (Bar) y calcita (Cal).....	27
Figura 20 - Imagen BSE de fases tempranas del Evento 3 con presencia de stromeyerita? (Str), calcosina (Cc) y arquerita? (Ag-Hg) en o asociado a baritina (Bar) y calcita (Cal).	28
Figura 21 - Fotomicrografía de la fase tardía del Evento 3 que corresponde a mineralización diseminada y vetas de bornita (Bn) y calcosina (Cc) con intercrecimiento mirmequítico. ....	28
Figura 22 - Fotomicrografía en donde se observa el reemplazo de calcosina (Cc) por bornita (Bn) del Evento 2.....	29

Figura 23 - Fotomicrografía que ilustra el reemplazo de calcopirita (Cpy) por bornita (Bn) y presencia de hematita (Hm).....	29
Figura 24 - A la izquierda se observa reemplazo de calcosina (Cc) por probable stromeyerita? (Str) y presencia de electrum (El). A la derecha se observa bornita (Bn) y un sulfuro de Cd, posiblemente greenockita (Grk)/hawleita. ....	30
Figura 25 - Imagen BSE de la fase tardía del Evento 3 representada por vetas de calcita (Cal) con bornita (Bn) y calcosina (Cc) reemplazada por stromeyerita? (Str) y galena (Gn) rica en cobre. ....	30
Figura 26 - Fotomicrografía donde se observa bitumen (Bit) con poros ocupados por calcosina (Cc).....	31
Figura 27 - Fotomicrografía de la mineralización metálica de calcosina (Cc), galena (Gn) y posible arquerita (Ag-Hg) en el Miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa. Se aprecia además bitumen (Bit).....	31
Figura 28 - Fotomicrografía del Evento 4 (supérgeno), el cual presenta pequeños cristales de djurleita (Djur)/anilita asociada a bornita (Bn) primaria. ....	32
Figura 29 - Grafico de concentraciones de elementos traza en bornita y calcosina del Evento 3 en escala logaritmica.....	34
Figura 30 - Comparación de los valores de isótopos de azufre entre los yacimientos estratoligados Cu-(Ag) del Cretácico y la mina 21 de Mayo. Bn: Bornita, Cc: Calcosina, Tr: Tetraedrita, Cpy: Calcopirita, Py: Pirita, Cv: Covelina y Dj: Djurleita. ....	39
Figura 31 - Modelo genético esquemático para la formación del depósito de la mina 21 de Mayo. Extensión del Cretácico y deformación de Formación Arqueros y Formación Quebrada Marquesa. ....	43
Figura 32 - Modelo genético esquemático para la formación del depósito de la mina 21 de Mayo. Formación de los estratoligados Cu - (Ag).....	43
Figura 33 - Modelo genético esquemático para la formación del depósito de la mina 21 de Mayo. Formación de las vetas de Ag del distrito Arqueros y precipitación de minerales de Ag en mina 21 de Mayo. ....	44
Figura 34 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para para bitumen del Evento 1. ....	54
Figura 35 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para solución sólida tennantita – tetraedrita. ....	55
Figura 36 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para para galena. ....	56
Figura 37 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para sulfosal de Cu-Ni-Co. ....	57
Figura 38 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para calcosina reemplazada por stromeyerita. ....	58
Figura 39 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para greenockita/hawleita. ....	59
Figura 40 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para electrum. ....	60
Figura 41 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para argentodomeikita. ....	61
Figura 42 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para arquerita. ....	62
Figura 43 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para niquelina. ....	63

Figura 44 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para sulfosal Co-Ni en arquerita.....	64
Figura 45 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para stromeyerita. ....	65
Figura 46 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para galena con Se y Cu.....	66

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Detalle de sondajes revisados para el estudio mineralógico. ....	5
Tabla 2 - Parámetros utilizados en microsonda electrónica para el análisis de sulfuros de Cu. ....	6
Tabla 3 - Secuencia paragenética yacimiento de la mina 21 de Mayo. ....	33
Tabla 4 - Resultados de microsonda electrónica para la muestra 21E-1067-1. ....	35
Tabla 5 - Resumen de las matrices de correlación de la mina 21 de Mayo. ....	36
Tabla 6 - Resultados de los isótopos de azufre de bornita de la mina 21 de Mayo. ....	36
Tabla 7 - Resumen descripciones petrográficas y calcográficas de los cortes con mineralización. ....	50
Tabla 8 - Continuación Tabla 7 con descripción petrográfica y calcográfica de los cortes con mineralización. ....	51
Tabla 9 - Descripciones petrográficas de las rocas hospedantes. ....	52
Tabla 10 - Continuación Tabla 9 descripciones petrográficas de rocas hospedantes. ....	53
Tabla 11 - Condiciones EMPA en calcosina y bornita. ....	67
Tabla 12 - Análisis químicos de calcosina de la muestra 21E-1067-1. Concentraciones en % en peso. ....	68
Tabla 13 - Análisis químicos de bornita de la muestra 21E-1067-1. Concentraciones en % en peso. ....	69
Tabla 14 - Resumen de análisis de isótopos estables en principales depósitos estratoligados del Cretácico. ....	70

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 PRESENTACIÓN

La evolución tectónica del margen continental chileno generó desde el Jurásico una migración hacia el este del arco magmático (Scheuber et al., 1994). Como resultado de esta migración se formaron numerosos yacimientos minerales que se agrupan en distintas franjas metalogénicas longitudinales y paralelas al margen continental. De esta forma, se reconocen franjas metalogénicas del Jurásico, Cretácico, Paleoceno-Eoceno temprano, Eoceno tardío-Oligoceno, y Mioceno-Plioceno. En particular, tanto la franja del Eoceno tardío-Oligoceno como la del Mioceno-Plioceno han sido sujeto de diversos estudios debido a que concentran la mayor cantidad, a nivel mundial, de grandes depósitos del tipo pórfido de Cu-Mo. Por su parte, la franja metalogénica del Cretácico se caracteriza por un dominio de yacimientos de hierro del tipo Kiruna o IOA, yacimientos tipo IOCG, pórfidos de Cu-Mo-Au de tamaño intermedio y depósitos de cobre del tipo estratoligados de Cu-(Ag), también conocidos como “Mantos tipo Chileno” (Maksaev y Zentilli, 2002).

Los depósitos estratoligados de Cu-(Ag) constituyen una fuente importante de Cu en el país, sin embargo, la génesis de este tipo de depósitos no ha sido determinada con claridad. Este tipo de depósitos ha sido reconocido tanto en la franja metalogénica del Jurásico como en la franja del Cretácico (**Figura 1**) presentando características contrastantes dependiendo de su edad. Por ejemplo, la fuente del azufre para los depósitos del Jurásico es de origen magmático, mientras que para los yacimientos del Cretácico el azufre proviene de la reducción bacteriana de sulfato marino (Carrillo-Rosúa et al., 2014). Por otro lado, los depósitos del Cretácico se caracterizan por la presencia de bitumen, compuesto orgánico ausente en los depósitos del Jurásico (Zentilli et al., 1997; Wilson y Zentilli, 1999).

A pesar de su importancia económica, la presencia de Ag en este tipo de yacimientos ha sido pobremente estudiada. Estudios recientes sugieren que la plata puede ser preferentemente incorporada en calcosina, seguido de bornita en solución sólida o como nanoinclusiones “invisibles” (Reich et al., 2013; Maureira, 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se presenta un estudio mineralógico de las vetas de Cu-(Ag) pertenecientes a la mina 21 de Mayo de propiedad de la Compañía Minera San Gerónimo. Este yacimiento forma parte del distrito Talcuna, ubicado a unos 40 km al NE de la ciudad de La Serena en la provincia del Elqui, Región de Coquimbo, Chile. Este distrito alberga varios depósitos estratoligados de Cu-(Ag) incluyendo la mina 21 de Mayo y las minas Coca-Cola I y II, además de depósitos de manganeso, alojados en la Formación Quebrada Marquesa, del Cretácico inferior (Aguirre y Egert, 1965; Boric, 1985). Al noroeste del distrito Talcuna se ubica el histórico distrito argentífero de Arqueros, el cual corresponde a una serie de vetas epitermales de Ag, posiblemente del tipo Ag-Bi-Co-Ni-As (Cucurella et al., 2015).

El propósito de este estudio es establecer la forma y ocurrencia tanto del cobre como de la plata en el yacimiento mina 21 de Mayo. Esta información es de relevancia tanto para entender los procesos geológicos que formaron los depósitos estratoligados del

Cretácico como para la explotación de este yacimiento y de los procesos de la planta de flotación en la empresa. Además, se presenta un modelo genético tentativo para explicar el alto contenido de Ag presente en este depósito.

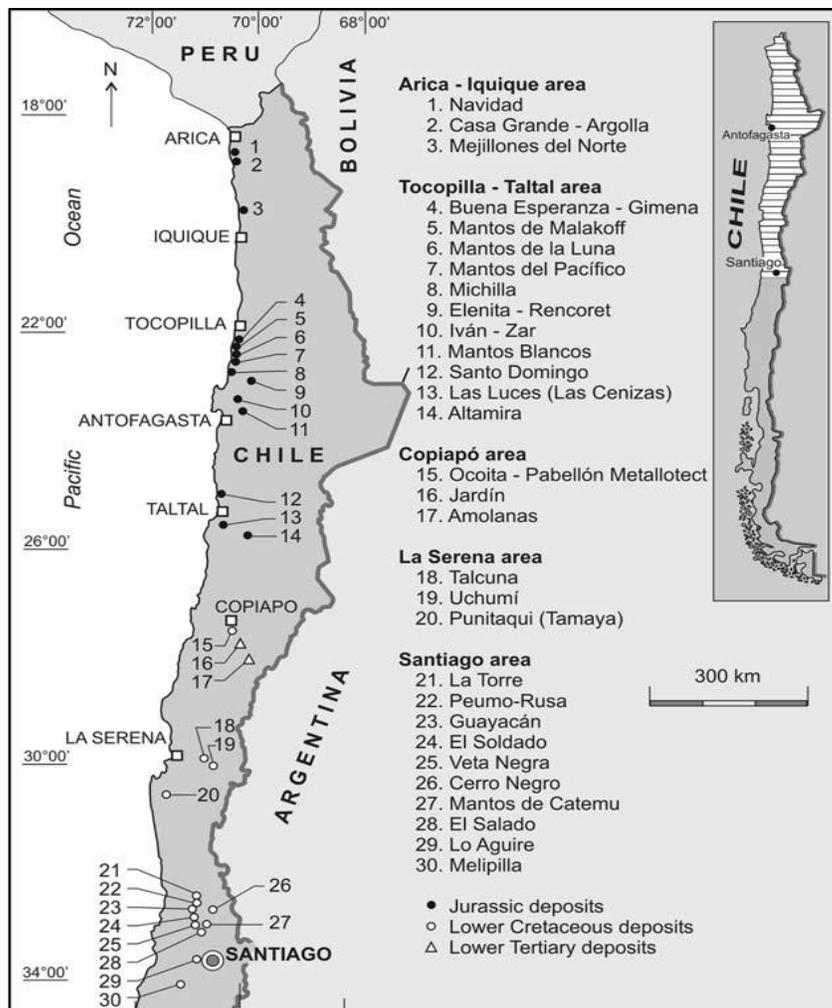


Figura 1 - Ubicación de yacimientos tipo Estratoligados de Cu±Ag. Modificada de Kojima et al. (2009).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos generales**

- I. Determinar los controles mineralógicos de la ocurrencia de la plata en el yacimiento de la mina 21 de Mayo, distrito Talcuna y aportar al refinamiento del modelo de formación del yacimiento.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- I. Caracterizar la litología de la roca huésped, y los eventos de mineralización y alteración de las vetas del yacimiento.
- II. Establecer la secuencia de eventos que dieron origen a la mineralización del depósito.
- III. Determinar la forma y ocurrencia de la plata en el yacimiento.
- IV. Determinar la fuente del azufre de los sulfuros de cobre.
- V. Elaborar un modelo genético tentativo para el yacimiento mina 21 de Mayo.

## **1.3 HIPÓTESIS**

La plata es un sub-producto de la explotación de los depósitos estratoligados de Cu. Este elemento de interés económico puede presentarse incluido en la estructura de sulfuros de cobre como la bornita y la calcosina o en sulfosales de Cu. El aumento de las leyes de Ag en el sector noreste de la mina 21 de Mayo está posiblemente ligado a la presencia de fases minerales de plata, tales como sulfuros o sulfosales. Este evento de mineralización de plata puede estar asociado a un evento hidrotermal tardío que reconcentró la Ag o bien a un evento hidrotermal posterior asociado al distrito argentífero Arqueros, ubicado al noroeste del distrito Talcuna.

## **1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO**

### **1.4.1 Revisión de antecedentes geológicos disponibles**

La primera etapa de este estudio contempló la revisión de información bibliográfica referente a depósitos estratoligados de Cu-(Ag) presentes en la Cordillera de la Costa de Chile. Además, se realizó una compilación de la información existente sobre el distrito Talcuna.

Posteriormente, se realizó un trabajo de terreno durante un periodo de 2 meses en donde se efectuó un reconocimiento de las labores subterráneas de la mina 21 de Mayo perteneciente a la Compañía Minera San Gerónimo, con la finalidad de comprender la geología del yacimiento. Además, se realizó una revisión, descripción y muestreo de sondajes para estudios mineralógicos posteriores.

### **1.4.2 Base de datos Cu-Ag-As**

Utilizando la base de datos de la empresa y el software Vulcan se obtuvo la información de leyes de Cu, Ag y As de los sondajes de la mina 21 de Mayo. Las concentraciones de Cu, Ag y As fueron determinadas mediante espectroscopía de absorción atómica en el laboratorio de la Compañía Minera San Gerónimo.

Con los datos de Cu, Ag y As y utilizando el software ioGAS se calculó la matriz de correlación de Spearman del set de datos y con ello se obtuvo la correlación Cu-Ag, Ag-As y Cu-As del depósito. Además, se obtuvo la correlación Cu-Ag, Ag-As y Cu-As mediante los softwares Vulcan e ioGAS para cada una de las vetas estudiadas.

### **1.4.3 Revisión de sondajes y selección de muestras**

La mina 21 de Mayo se dividió en 4 perfiles generales que cortan a las estructuras mineralizadas (vetas) y se establecieron zonas de interés en base a las descripciones previas de los sondajes y las leyes de Cu y Ag. Posteriormente, se revisaron 29 sondajes (Tabla 1) y se seleccionaron 51 muestras para estudios mineralógicos.

Al estudio se agregó la revisión el sondaje PG-43, con la finalidad de obtener información de algunas litologías que no afloran en el depósito. Producto de esto se agregaron 4 muestras al estudio litológico-mineralógico, obteniendo un total de 55 muestras para el estudio petrográfico y de microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS).

Tabla 1 – Detalle de sondajes revisados para el estudio mineralógico.

<b>Perfil 1</b>			<b>Perfil 3</b>		
Nombre Veta	Sondaje	Metraje revisado	Nombre Veta	Sondaje	Metraje revisado
Daniela	21E-1126	50-58	Daniela	21E-333	130-142
Claudia - Mariela	PG-69	370-395	Fabiola - Viviana	21E-415	60-75
Valeska	PG-65	325-335	Claudia - Mariela	21E-391	125-140
<b>Perfil 2</b>				21E-99	240-255
Nombre Veta	Sondaje	Metraje revisado		21E-392	160-185
Daniela	21E-485	60-80	Jenifer	21E-611	130-145
	21E-486	50-72		21E-612	130-145
	21E-476	55-70	<b>Perfil 4</b>		
Nombre Veta	Sondaje	Metraje revisado	Nombre Veta	Sondaje	Metraje revisado
Fabiola-Viviana	21E-601	120-143	Daniela	21E-340	70-85
	21E-602	120-137		21E-341	70-95
	21E-603	132-143			
Claudia - Mariela	21E-609	115-130	Fabiola - Viviana	21E-455	95-115
	21E-641	45-70		21E-346	150-165
	21E-607	120-135	Claudia - Mariela	21E-375	105-111
Josefina	21E-826	40-70		21E-374	95-120
Valeska	21E-1067	180-195	Dinka	21E-833	80-110
	21E-1068	165-177			

#### 1.4.4 Descripción de cortes

El estudio petrográfico de las muestras seleccionadas se dividió en dos tareas: la primera correspondió al análisis calcográfico de 26 cortes transparente-pulido y la segunda, a la identificación de litología y de fases de alteración en 30 cortes transparentes. Ambas tareas se realizaron utilizando un microscopio óptico, marca Olympus modelo BX51, perteneciente al Laboratorio de Petrografía del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). En base al estudio petrográfico se confeccionó una tabla paragenética (mineralización y alteración) del yacimiento.

#### 1.4.5 Microscopio electrónico de barrido (SEM), Microsonda electrónica (EMPA) e Isótopos estables de azufre.

La composición química de los minerales identificados mediante microscopía óptica se determinó en forma semi-cuantitativa mediante un microscopio electrónico de barrido y espectrometría de absorción de energía de rayos X (SEM-EDX). El SEM utilizado es un microscopio electrónico marca FEI modelo Quanta 250 perteneciente al CEGA, Departamento de Geología, Universidad de Chile. El análisis con detector EDS se realizó con un voltaje de 15 kV y un tiempo de análisis de 50 s en promedio.

Adicionalmente, se realizaron análisis composicionales cuantitativos de calcosina y bornita mediante microsonda electrónica (EPMA), marca JEOL modelo KXA-8230, en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX), perteneciente a la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Los parámetros utilizados en el análisis mediante microsonda se resumen en la Tabla 2 y para mayor detalle ver Anexo C.

Tabla 2 - Parámetros utilizados en microsonda electrónica para el análisis de sulfuros de Cu.

Corriente	10 – 20 nA
Voltaje	20 kV
Cristales utilizados	PETJ, TAP, LIF, PETH, LIFH
Líneas detectadas	K $\alpha$ , M $\alpha$ , L $\alpha$ , M $\beta$
Tiempo analizado en peak	20 s
Tiempo analizado en background	10 s
Elementos analizados	Cu, Fe, S, Se, Te, As, Sb, Bi, Zn, Ni, Co, Ag, Au, Pb, Hg

Por otro lado, se realizaron estudios de isótopos estables de 3 muestras de bornita en el Environmental Isotope Laboratory of the Department of Geosciences de la Universidad de Arizona, Tucson, USA. Para la medición se utilizó un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (CF-IRMS) modelo ThermoQuest Finningan Delta PlusXL acoplado con un analizador de elementos Costech.

## 1.5 ANTECEDENTES

El primer estudio regional de la zona fue realizado por Aguirre y Egert (1965), los cuales confeccionaron la carta geológica 1:50.000 del cuadrángulo Quebrada Marquesa. En este trabajo se describen las estructuras, los recursos minerales de la zona y se definió la Formación Quebrada Marquesa, la cual alberga los depósitos minerales reconocidos en el distrito Talcuna.

Posteriormente, Peebles (1966) estudió algunos yacimientos del sector y los clasificó en depósitos tipo vetas y mantos. Este autor concluyó que los yacimientos se formaron por procesos del tipo singenéticos o epigenéticos o una mezcla de ambos. Por otro lado, Kamono y Boric (1982) proponen que los depósitos del distrito serían del tipo epigenético hidrotermal, formados a bajas temperaturas y cercanos a la superficie. Además, establecen que el cobre del distrito pudo haber sido lixiviado de la secuencia volcánica neocomiana producto del metamorfismo de carga. En cambio, Boric (1985) establece que el cobre pudo tener su origen a partir de fluidos hidrotermales derivados de intrusivos de edad Cretácico superior – Terciario ubicados en las cercanías al distrito. Este último propone que los fluidos hidrotermales habrían sido “retenidos” producto de una capa impermeable de lutitas y fangolitas asociada a los depósitos de manganeso.

Camus (1986, 1990) clasificó a los yacimientos del distrito como estratoligados hospedados en rocas sedimentarias que se enmarcan, geológicamente, en cuencas lacustres. La presencia de rocas sedimentarias y volcánicas en la Formación Quebrada Marquesa indica un volcanismo activo durante el desarrollo de estas cuencas. Finalmente, el autor apoya un modelo epigenético para la génesis de los depósitos, aunque señala que los episodios diagenéticos relacionados al enterramiento no deben ser descartados.

Oyarzún et al. (1998), identificaron dos eventos relacionados a la mineralización del distrito. El primero estaría ligado a los mantos y representado por una alteración de epidota, albita, calcita, clorita, prehnita y zeolitas. El segundo evento estaría relacionado a las vetas con un desarrollo de alteración local de calcita, sericita y clorita. Estos autores realizaron además un estudio de inclusiones fluidas, el cual concluye que los depósitos tipo manto se formaron por fluidos hidrotermales caracterizados por una salinidad moderada (11-19% en peso de NaCl equiv.) de baja temperatura (120 a 205°C). En cambio, las vetas se formaron por fluidos hidrotermales caracterizados por una salinidad variable (3-27% en peso de NaCl equiv.) y baja temperatura (70 a 170°C).

Regionalmente, Márquez et al. (1996) reconocieron estructuras que corresponden a lineamientos y fallas de orientación W-NW, N-NE y E-NE. Además, identificaron una serie de estructuras subcirculares las cuales se relacionan a paleo-calderas del sector. Por otra parte, Pineda y Emparan (1997) definieron un sistema de fallas de rumbo N-S, cuya estructura principal es la falla La Liga, la cual se interpretó como una falla sinextensional del Cretácico inferior. Posteriormente, Emparan y Pineda (1999) realizaron un mapa regional 1:100.000 de la zona de estudio actualizando la información descrita en el trabajo original de Aguirre y Egert (1965).

La geología estructural del distrito fue estudiada por Salgado (2004), quien reconoció un sistema estructural de 3 etapas para el distrito Talcuna. La primera etapa

correspondería a un fallamiento sinistral normal pre-mineral/sin-mineral, para posteriormente pasar a una segunda etapa caracterizada por fallamiento dextral normal sin-mineral y finalmente, el tercer evento con un fallamiento normal post-mineral. Por otro lado, Toledo (2004) determinó que la geología estructural dentro del distrito deriva de esfuerzos compresivos, los cuales generaron mediante cizalle las fallas principales con dirección N35°W; estructuras que al mantenerse bajo la acción de esfuerzos compresivos generaron grietas de tensión con rumbo N-S (fallas tensionales). Por último, este autor plantea que la geología estructural está estrechamente ligada a la mineralización, ya que la intersección de las fallas principales con las fallas tensionales generó zonas de acumulación mineral (lentes o bolsones).

Cucurella et al. (2005 y 2006) reconocen la presencia de pirobitumen, el cual se encuentra espacialmente relacionado a la mineralización cuprífera en el Miembro 1 de la Formación Quebrada Marquesa. Por otro lado, en el Miembro 2 el pirobitumen se presenta en vetillas y actúa como trampa para la mineralización cuprífera. Esta mineralización traspasa los estratos impermeables generando una nueva discusión relacionada a la extensión vertical del yacimiento.

Romero (2008) realizó una caracterización litológica y geoquímica del distrito Talcuna concluyendo que tanto el Pb como el Zn disminuyen a medida que se asciende en la columna estratigráfica de la Formación Quebrada Marquesa, mientras que el Cu presenta altas concentraciones en niveles inferiores y un comportamiento irregular en niveles superiores.

Carrillo-Rosúa et al. (2014) estudiaron varios depósitos estratoligados de Cu-(Ag) en el norte de Chile, reportando datos isotópicos de S y de inclusiones fluidas. En base a datos de isótopos de azufre con valores negativos, los autores proponen una fuente poligenética con un dominio de azufre de origen bacteriogénico por reducción del ion sulfato. Los datos de inclusiones fluidas determinados para los depósitos del área de La Serena son de 140°C y 21.5% en peso de NaCl equiv. en promedio. Finalmente, el modelo genético propuesto por estos autores para los estratoligados del área de La Serena consta solo de una etapa principal de mena, con ausencia de una etapa diagenética previa.

El último estudio realizado a la fecha en el área corresponde a Santana (2017), el cual sugiere la existencia de al menos 2 eventos de mineralización, uno de carácter hipomesotermal y otro de carácter epitermal. Además, propone la existencia de un tercer evento de carácter meso-epitermal que explicaría la precipitación de baritina y la presencia de plata nativa.

## 1.6 MARCO TECTÓNICO

Los Andes Centrales del norte de Chile han presentado una evolución tectónica determinada por la formación de un arco magmático producto de la subducción de placas, proceso que se ha mantenido activo desde el Jurásico (Charrier et al., 2007). Desde el inicio de la subducción, el arco magmático ha ido migrando hacia el este generando una serie de cadenas montañosas que albergan una diversidad de depósitos minerales (Scheuber et al., 1994).

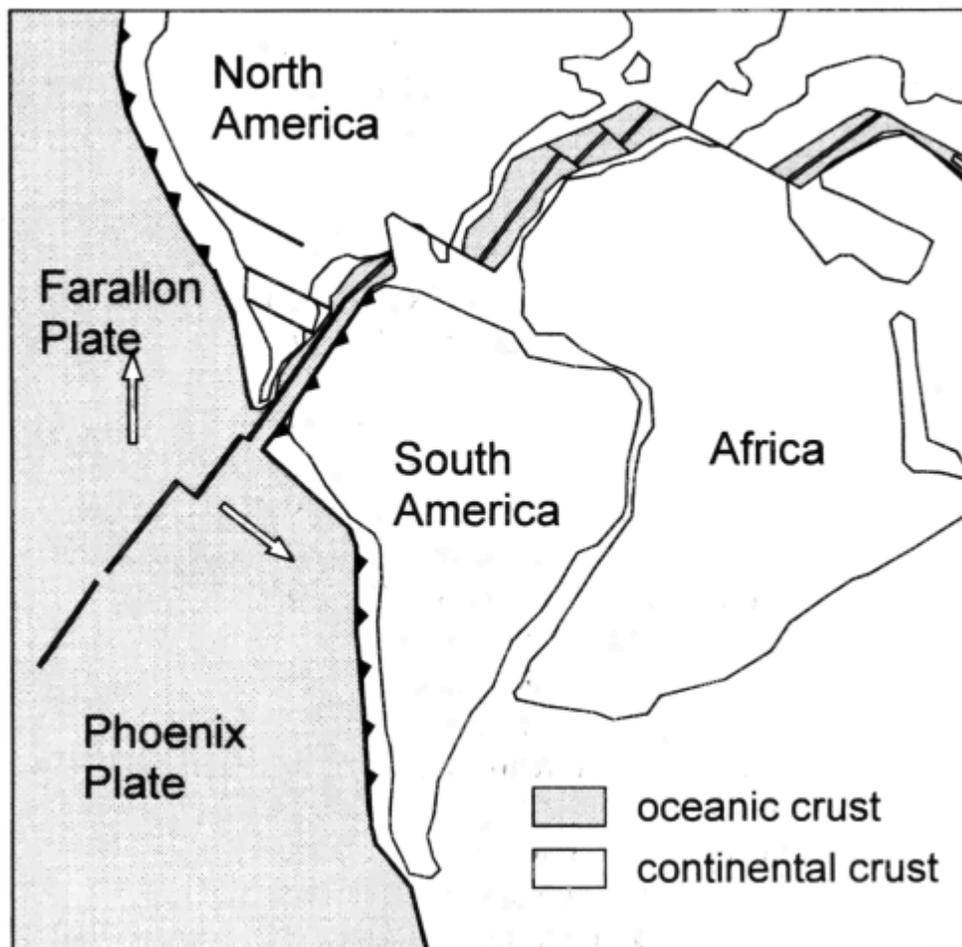


Figura 2 – Marco tectónico durante el Cretácico inferior. Tomada de Scheuber y González (1999).

En la zona de estudio, el régimen tectónico durante el Cretácico inferior (**Figura 2**) era de tipo extensional (Morata y Aguirre, 2003) producto de la subducción con un alto ángulo de convergencia sinistral oblicua entre la placa de Phoenix (Aluk) y la placa Sudamericana (Scheuber y González, 1999). Los depósitos estratoligados de Cu-(Ag) del Cretácico inferior se encuentran en la Cordillera de la Costa entre los 27°S y los 35°S, y se hospedan en rocas volcánicas a volcanoclásticas con intercalación de sedimentos marinos

de las formaciones Pabellón, Arqueros, Quebrada Marquesa, Lo Prado y Veta Negra (Kojima et al., 2009).

## 1.7 UBICACIÓN Y ACCESOS

La mina 21 de Mayo se ubica en el distrito minero Talcuna, en la Cordillera de la Costa de la provincia de Elqui, Región de Coquimbo, a unos 40 km al noreste de La Serena, entre las quebradas Marquesa y Las Cañas (**Figura 3**). Los límites geográficos del distrito son UTM 6.696.000 N – 316.000 E y 6.691.000 N – 323.000 E.

El acceso al distrito es por la carretera pavimentada N° 41, la cual une las ciudades de La Serena y Vicuña, hasta el pueblo de Marquesa. Desde Marquesa se toma un desvío hacia el norte por el camino D-251 el cual se dirige a las localidades de Viñita Alta y Viñita Baja (**Figura 3**).

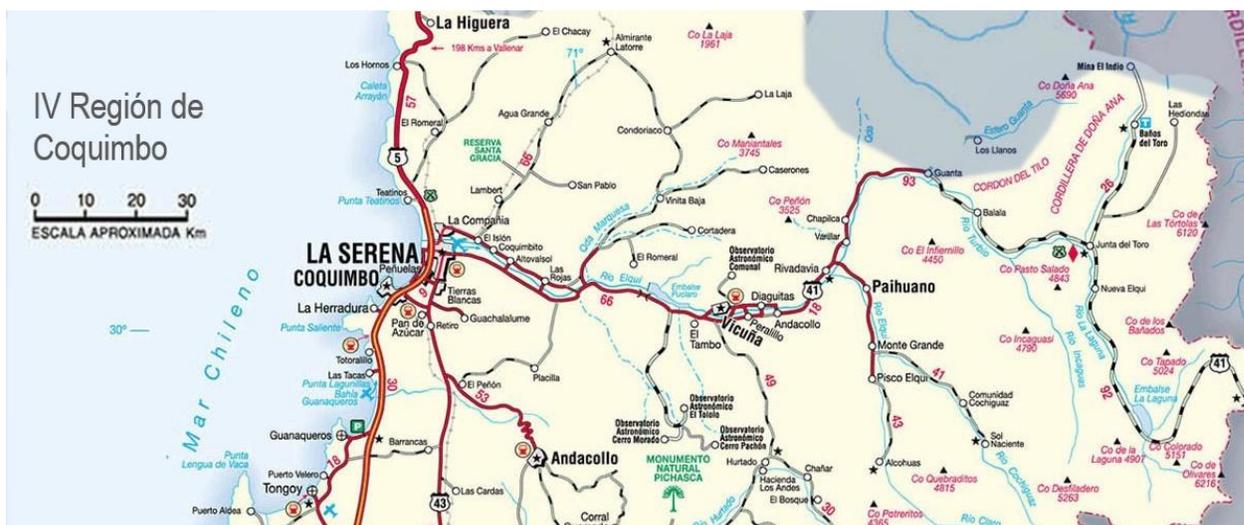


Figura 3 – Imagen referencial de los accesos al distrito Talcuna. Modificada de Santana (2017).

## **2 MARCO GEOLÓGICO**

### **2.1 GEOLOGÍA REGIONAL**

#### **2.1.1 Unidades Estratificadas**

##### **2.1.1.1 Formación Quebrada Marquesa (Aptiano– Albiano)**

La Formación Quebrada Marquesa sobreyace concordantemente a la Formación Arqueros y subyace de forma discordante a la Formación Viñita. En cuanto a su potencia, la Formación Quebrada Marquesa presenta un mínimo de 820 m y un máximo de 1.900 m de espesor (Aguirre y Egert, 1965).

Esta formación consiste principalmente en rocas sedimentarias clásticas de origen continental, además de tobas y lavas andesíticas. En su parte media se encuentran mantos de manganeso y en su base se han descrito lentes de areniscas calcáreas.

La fauna fósil presente en la parte inferior de la formación indica una edad mínima Neocomiano superior. Por otro lado, la edad máxima de esta formación fue definida por Aguirre y Egert (1965) utilizando la discordancia con la Formación Viñita y determinando que ésta corresponde al Albiano superior.

#### **2.1.2 Depósitos No Consolidados**

Estos depósitos se encuentran limitados por los cursos de drenaje y quebradas correspondientes al Río Elqui, la Quebrada Marquesa y la Quebrada Las Cañas. Los depósitos no consolidados han sido clasificados en 4 tipos (Emparan y Pineda, 1999; Salgado, 2004):

- Depósitos coluviales: Son depósitos no consolidados, con mala estratificación, conformados por bloques monomícticos y polimícticos de carácter anguloso y una matriz tamaño limo.
- Depósitos aluviales: Se componen de depósitos macizos no consolidados, matriz soportado, conformados por bloques angulosos y gravas. Los clastos son de carácter polimíctico y la matriz es arena y limo.
- Depósitos fluviales:
  - Depósitos fluviales antiguos: Formados por gravas muy gruesas a gruesas, débilmente consolidadas, con estratificación y buena selección.

- Depósitos fluviales recientes: Constituidos por gravas muy gruesas a gruesas, no consolidadas, polimícticas y con estratificación, pueden presentar orientación y/o imbricación de clastos e intercalaciones de gravas finas y arenas.
- Depósitos de remoción en masa: Corresponde a una serie de depósitos caóticos, poco consolidados, compuestos por bloques polimícticos, mal seleccionados y con una matriz tamaño limo-arcilla.

### 2.1.3 Rocas Intrusivas

Aguirre y Egert (1965) describen una serie de intrusivos que abarcan la sexta parte del área de estudio (**Figura 4**). La composición de estos intrusivos es variable, reconociéndose granodioritas, dioritas, pórfidos graníticos, traquitas y basaltos, además de adamelitas y traquiandesitas en algunos sectores. Dataciones  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  indican que estos intrusivos son de edad Cretácico inferior (108-109 Ma; Emparan y Pineda, 2000).

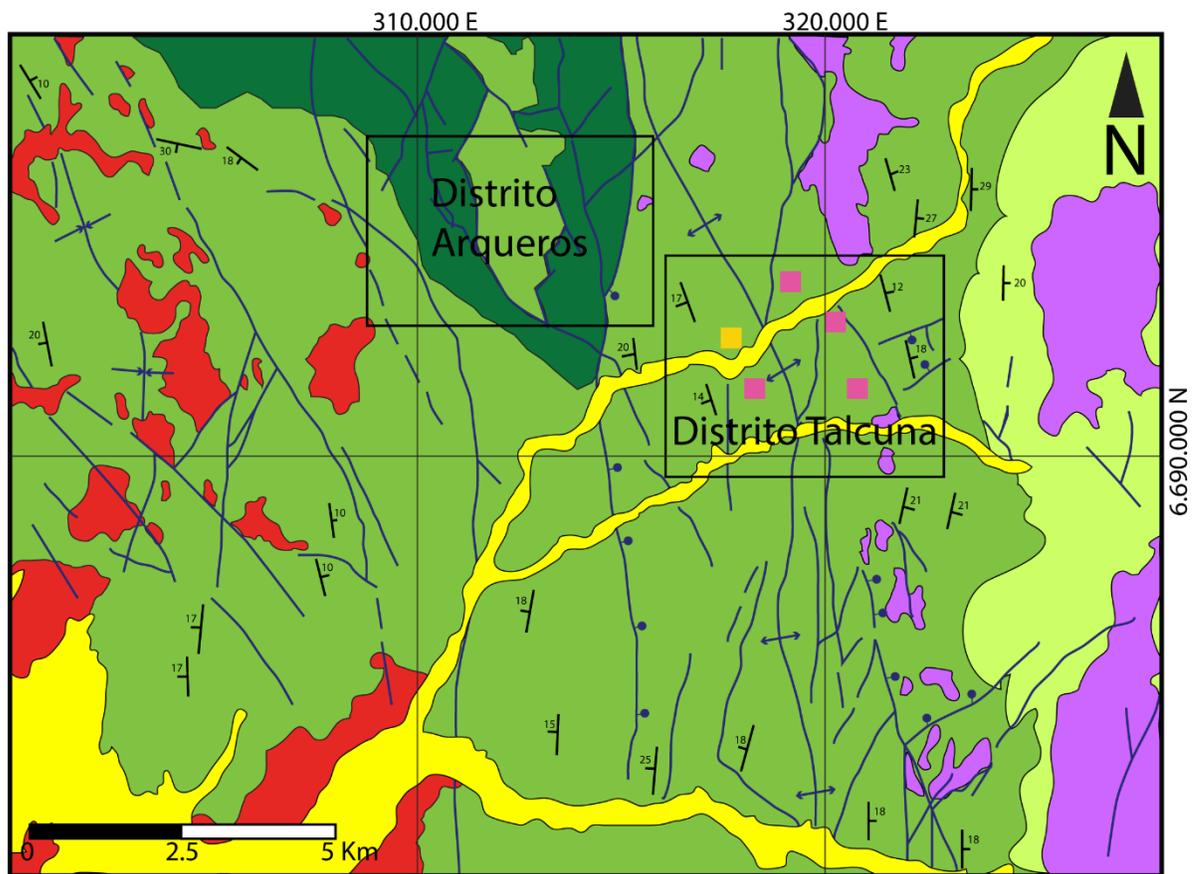
En la zona también es posible encontrar intrusivos filonianos que corresponden a lamprófidos, andesitas, pórfidos dioríticos, basaltos y pórfidos graníticos.

### 2.1.4 Estructuras

La deformación en el sector generó un anticlinal ancho, de eje N-NE y que atraviesa la zona central del área de estudio. Este anticlinal ha sido denominado como “Anticlinal de Talcuna” (Aguirre y Egert, 1965) y sería el resultado de una tectónica compresiva durante el Eoceno (Pineda y Emparan, 1997).

En el distrito Talcuna se han reconocido 3 familias de estructuras: La primera familia corresponde a estructuras de fallamiento normal (Márquez et al., 1996) con orientaciones que van desde N15°E a N15°W, pero mayormente concentradas en la orientación N-S; la segunda familia son fallas con dirección NW a NE, y la tercera familia corresponde a fallas de orientación E-W (Aguirre y Egert, 1965). En conjunto, estas familias de estructuras generaron desplazamientos que alcanzarían los 2 km (Aguirre y Egert, 1965).

Adicionalmente, mediante la aplicación de imágenes SIR-C se reconocieron algunas tendencias estructurales que corresponden a lineamientos y fallas de orientación W-NW, N-NE y E-NE. Estas últimas generarían el desplazamiento del sector denominado “Bloque Talcuna”. Además, se identificaron una serie de estructuras subcirculares asociadas a calderas (Márquez et al., 1996).



### Leyenda

#### Rocas Estratificadas

- Depósitos Cuaternarios
- Formación Viñita (Terciario inferior - Cretácico superior)
- Formación Quebrada Marquesa (Cretácico inferior)
- Formación Arqueros (Cretácico inferior)

#### Rocas Intrusivas

- Franja Oeste (Cretácico inferior)
- Franja Este (Neógeno)

### Simbología

- Mina 21 de Mayo
- Depósitos Cu-(Ag)
- Contacto Litológico
- Fallas Normales
- Eje Anticlinal
- Eje Sinclinal
- Fallas
- Manteos

Figura 4 - Mapa geológico regional y ubicación del distrito Talcuna. Modificado de Romero (2008).

Finalmente, se reconoce en el sector un sistema de fallas de rumbo N-S con manteo al E, el cual genera una rampa de relevo cuya estructura principal es la Falla La Liga, la cual posee una extensión de 25 km. Esta estructura se interpreta como una falla sinextensional del Cretácico inferior (Pineda y Emparan, 1997).

## **2.2 GEOLOGÍA DISTRITAL**

La mineralización en mina 21 de Mayo se emplaza en la Formación Quebrada Marquesa, la cual ha sido dividida por Aguirre y Egert (1965) en cuatro miembros (**Figura 5**).

### **2.2.1 Formación Quebrada Marquesa**

#### **2.2.1.1 Miembro 1 (Kqm1)**

La base de este miembro corresponde al contacto concordante con la Formación Arqueros y su techo corresponde al contacto concordante con el Miembro 2 de esta formación. Respecto a su espesor, este puede alcanzar los 1.200 m como máximo y tiene 700 m como mínimo. Cabe señalar que el espesor máximo reconocido puede ser el resultado de la repetición de estratos producto de fallas.

La litología de este miembro se compone de brechas sedimentarias, lavas andesíticas, areniscas, areniscas calcáreas, calizas, tobas, conglomerados y lutitas. En el techo de esta unidad se pueden encontrar estratos ricos en manganeso. Estas litologías son en su mayoría de carácter continental y en este miembro es posible encontrar fauna fósil pobremente preservada.

#### **2.2.1.2 Miembro 2 (Kqm2)**

La base de este miembro corresponde al contacto concordante con las areniscas manganosíferas del Miembro 1 y el techo corresponde al contacto concordante con el Miembro 3 de esta formación. Su espesor es variable entre los 40 a 100 m.

Este miembro se compone principalmente de arenisca calcárea, calcilutitas, calizas, lentes de yeso, lavas andesíticas y riolíticas. Cabe destacar que este miembro presenta buena estratificación en varios sectores. En base a todo lo anterior, ha sido descrito como un miembro de carácter continental.

#### **2.2.1.3 Miembro 3 (Kqm3)**

Este miembro se encuentra en contacto concordante, tanto en la base y techo, con el Miembro 2 y con el Miembro 4 respectivamente. Alcanza un espesor variable entre 50 y 250 m.

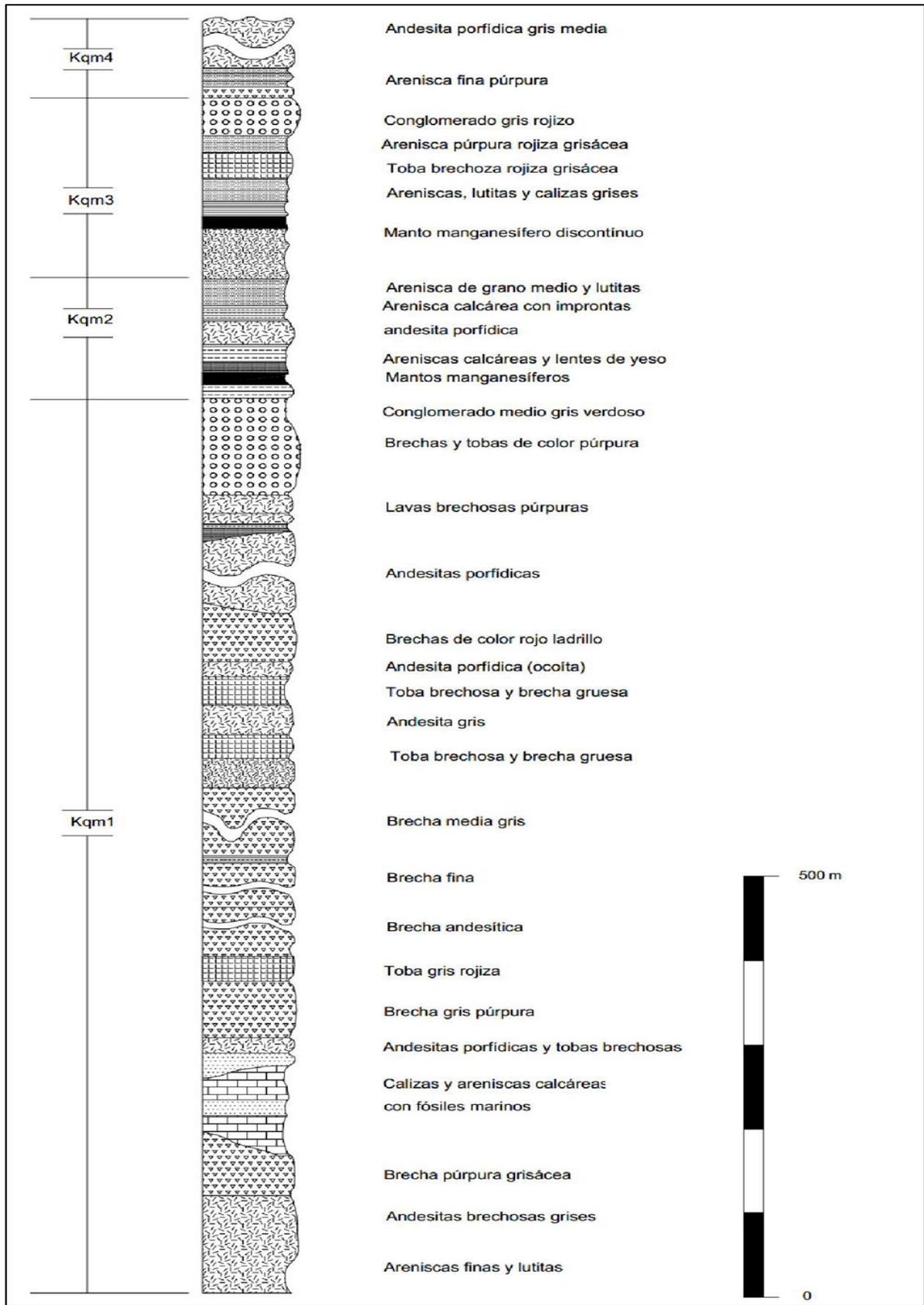


Figura 5 - Columna estratigráfica esquemática de la Formación Quebrada Marquesa. Tomado de Santana (2017).

La litología de este miembro corresponde a conglomerados, brechas, tobas, areniscas, lutitas y calizas, además cerca de la base es posible encontrar un manto discontinuo de manganeso. Al igual que los anteriores miembros, éste también ha sido definido como de origen continental.

#### **2.2.1.4 Miembro 4 (Kqm4)**

El Miembro 4 se dispone concordante con el Miembro 3 de la Formación Quebrada Marquesa y su techo corresponde a un contacto discordante con la Formación Viñita. Su espesor se estima entre los 150 y 200 m.

La litología de este miembro corresponde principalmente a lavas andesíticas o basálticas con delgadas intercalaciones de areniscas finas bien estratificadas y arcillolitas. Ambas intercalaciones se han reconocido en la base del miembro.

#### **2.2.2 Intrusivos**

En el distrito Talcuna solo es posible apreciar una serie de diques con orientaciones de  $N70^{\circ}-80^{\circ}E/75^{\circ}-85^{\circ}NW$  y  $N50^{\circ}-60^{\circ}E/75^{\circ}-85^{\circ}NW$ . Estos diques pueden alcanzar espesores de 0,7 a 12 m y longitudes de hasta 2.500 m.

Los diques de orientación  $N70^{\circ}-80^{\circ}E/75^{\circ}-85^{\circ}NW$  corresponden a diques microdioríticos holocristalinos con textura microfanerítica a microporfírica y en algunos casos intersertal o politaxítica. La mineralogía está conformada principalmente por plagioclasas y algunos cristales de anfíboles reemplazados parcialmente por sericita y clorita, respectivamente (Moreno, 2001; Salgado, 2004).

Los diques de orientación  $N50^{\circ}-60^{\circ}E/75^{\circ}-85^{\circ}NW$  pueden ser de tres tipos: diques microdioríticos similares a los descritos anteriormente, diques andesíticos con textura porfírica y diques ocoíticos con cristales de plagioclasas y clinopiroxenos (Moreno, 2001; Salgado, 2004).

#### **2.2.3 Estructuras**

Las estructuras de mayor interés a nivel distrital son fallas normales con distinto rumbo, i.e.,  $NS$ ,  $N20-30^{\circ}W$ ,  $N55^{\circ}W$ ,  $N5^{\circ}-15^{\circ}E$  y  $N30^{\circ}-40^{\circ}E$ , y manteos en general de alto ángulo hacia el este. Por otro lado, existe una importante falla inversa, denominada Falla Juliana, ubicada en el sector noroeste del distrito, la cual presenta un rumbo general  $N75^{\circ}W$  con manteo de  $60^{\circ}-70^{\circ}$  hacia el sur (Salgado, 2004). Además, Salgado (2004) identifica una serie de fallas post-minerales de rumbo  $N30-40^{\circ}E$ , las cuales han generado distintos bloques.

En resumen, la deformación del distrito está caracterizada por 3 etapas: la primera etapa consiste en un fallamiento transcurrente sinestral normal, el cual tendría un carácter pre-mineral/sin-mineral. A este episodio se le asocia el inicio de la mineralización cuprífera. Posteriormente, ocurre un evento de fallamiento dextral normal, el cual tiene un carácter sin-mineral y sería el causante de la generación de brechas las cuales cortan la mineralización previa. Finalmente, existe un episodio de fallamiento dextral que es post-mineral y es responsable del emplazamiento de diques, generación de fallas de tipo dextral normal y reactivación de las estructuras preexistentes (Salgado, 2004).

#### **2.2.4 Mineralización y Alteración**

En el distrito Talcuna, se ha identificado mineralización tanto de manganeso como de cobre y plata. El manganeso, de probable origen hidrotermal, se depositó en dos eventos diferentes dentro de areniscas volcánicas de la Formación Quebrada Marquesa. La mineralogía de mena de estos depósitos corresponde principalmente a psilomelano, braunita, pirolusita y manganita (Boric, 1985). Por otro lado, la mineralización de cobre se presenta en forma de vetas asociadas a fallas menores de orientación NS a N40°W, o en mantos alojados en areniscas tobáceas y tobas de lapilli. Estos mantos pueden alcanzar 3.000 m de largo y 1.500 m de ancho (Boric, 1985).

La mineralización metálica en el distrito consiste en calcopirita, bornita y en menor cantidad calcosina, galena, esfalerita, covelina y tennantita-tetraedrita. Además, es posible encontrar algunos minerales secundarios en los miembros superiores de la Formación Quebrada Marquesa producto de la oxidación de los sulfuros primarios, entre los cuales se encuentran crisocola, malaquita, azurita y linarita (Boric, 1985; Cucurella et al., 2006). La edad de la mineralización fue determinada indirectamente mediante una datación  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$  de celadonita asociada a sulfuros primarios, obteniéndose una edad de  $93 \pm 2$  Ma (Morata et al., 2006).

Respecto a la plata, ésta se encuentra asociada a los depósitos de cobre de tipo vetiforme como mantiforme y se presenta como plata nativa (Cucurella et al., 2006), aunque también se le ha descrito asociada a pirargirita-tetraedrita (Moreno, 2001).

La alteración hidrotermal a nivel distrital es restringida y se caracteriza por la presencia de clorita, calcita y en menor medida baritina, hematita, albita, zeolitas, sericita, epidota y arcillas (Moreno, 2001; Toledo, 2004; Salgado, 2004).

### **2.3 GEOLOGÍA MINA 21 DE MAYO**

La mina 21 de Mayo está ubicada en el distrito minero Talcuna, el cual también incluye las minas Socavón 2001, Coca-Cola I y Coca-Cola II. La mineralización en este distrito se hospeda en la Formación Quebrada Marquesa (Cretácico inferior).

La Mina 21 de Mayo corresponde a un yacimiento estratoligado de Cu-(Ag) ubicado en las coordenadas 6.693.143m N y 318.327m E. Este depósito presenta un control litológico y estructural donde la mineralización se concentra en el Miembro 1 de dicha formación (Toledo, 2004).

El yacimiento lo componen una serie de estructuras mineralizadas, las cuales poseen orientación variable desde N10°W a N40°W con manteos entre 65° y 85° al NE (**Figura 6**). Adicionalmente, y según la porosidad y permeabilidad del estrato, la mineralización puede conformar cuerpos mantiformes de 2,5 a 8 m de potencia (Moreno, 2001).

Las rocas que hospedan la mineralización corresponden a brechas, tobas, lavas y areniscas. Por otro lado, la alteración hidrotermal del yacimiento corresponde a una cloritización y albitización, siendo la primera más abundante en las cercanías de las estructuras mineralizadas (Moreno, 2001). Se reconoce además una fuerte presencia de calcita. Otros minerales de alteración descritos en el yacimiento son la epidota, las zeolitas, hematita y, localmente cercano al contacto con los diques, granates.

La mineralización metálica corresponde a sulfuros de cobre, principalmente calcopirita y bornita, además de calcosina, covelina y tenantita-tetraedrita. Por otro lado, es posible encontrar galena, esfalerita y minerales de plata asociados a sulfuros de cobre. La mineralización metálica puede estar en vetas, vetillas, brechas, diseminada o en amígdalas (Moreno, 2001).

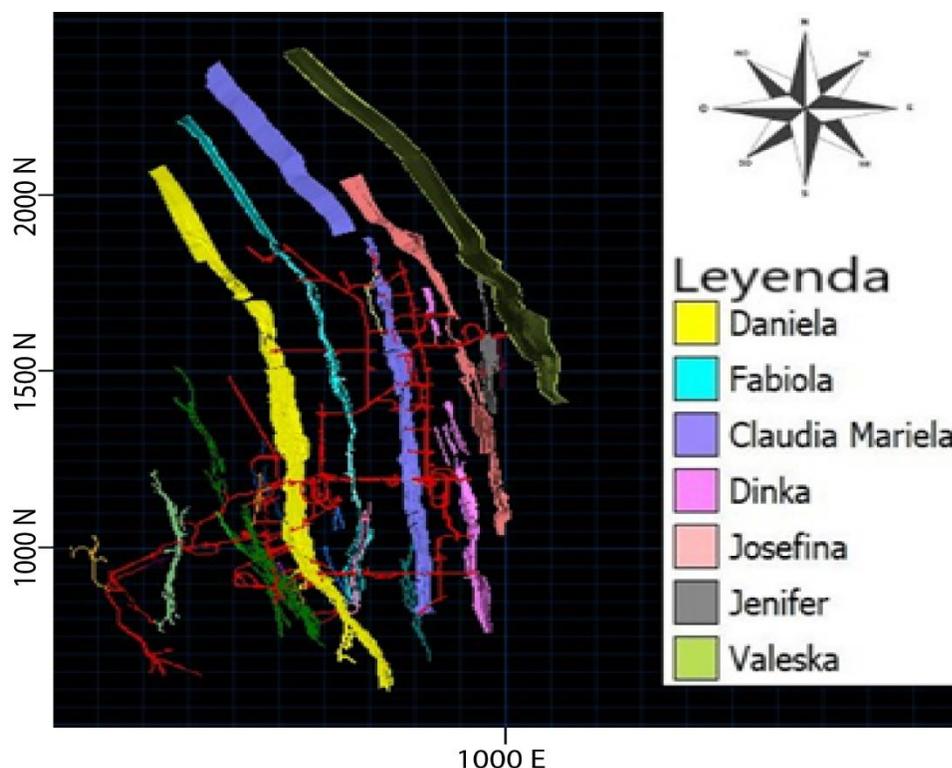


Figura 6 - Túneles y vetas mineralizadas de la mina 21 de Mayo. Se indica el nombre de las vetas estudiadas y las galerías de acceso (en rojo). Coordenadas mina 21 de Mayo.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 PETROGRAFÍA

##### 3.1.1 Litología y metamorfismo regional

Los estudios petrográficos de muestras de sondaje indican que la litología de las rocas hospedantes de la mineralización en el Miembro 1 de la Formación Quebrada Marquesa corresponde a grauvacas feldespáticas y andesitas amigdaloidales alteradas. Por otro lado, el Miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa corresponde a grauvacas feldespáticas y areniscas. Estas rocas son cortadas por diques de diorita de piroxeno.

En general, las rocas de la formación Quebrada Marquesa se encuentran afectadas por un metamorfismo regional de bajo grado de la facies prehnita-pumpellyita y la facies zeolitas. Los minerales metamórficos observados son: zeolitas, prehnita, pumpellyita, clorita y calcita (**Figuras 7, 8 y 9**).

Esta mineralogía es similar a la formada por la alteración propilítica asociada a la mineralización de cobre, sin embargo, los productos del metamorfismo regional se encuentran principalmente rellenando amígdalas de las rocas volcánicas.

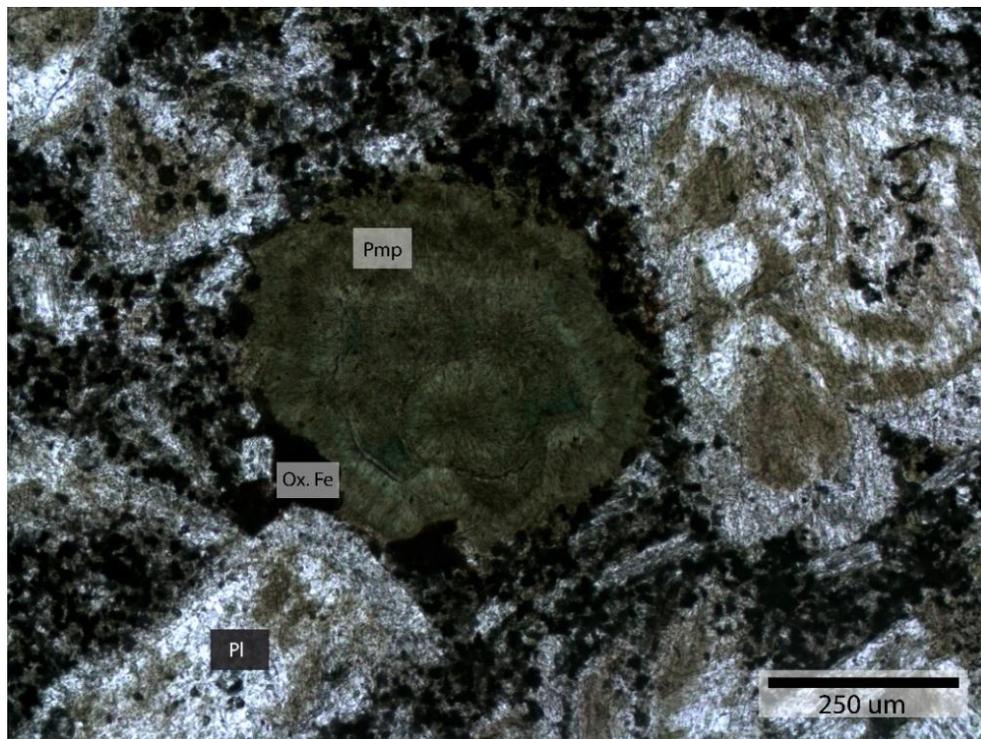


Figura 7 - Fotomicrografía de amígdala rellena con cristales de pumpellyita (Pmp) producto del metamorfismo regional. Se reconocen además óxidos de hierro (Ox. Fe) y plagioclasas (Pl) moderadamente alteradas a arcillas.

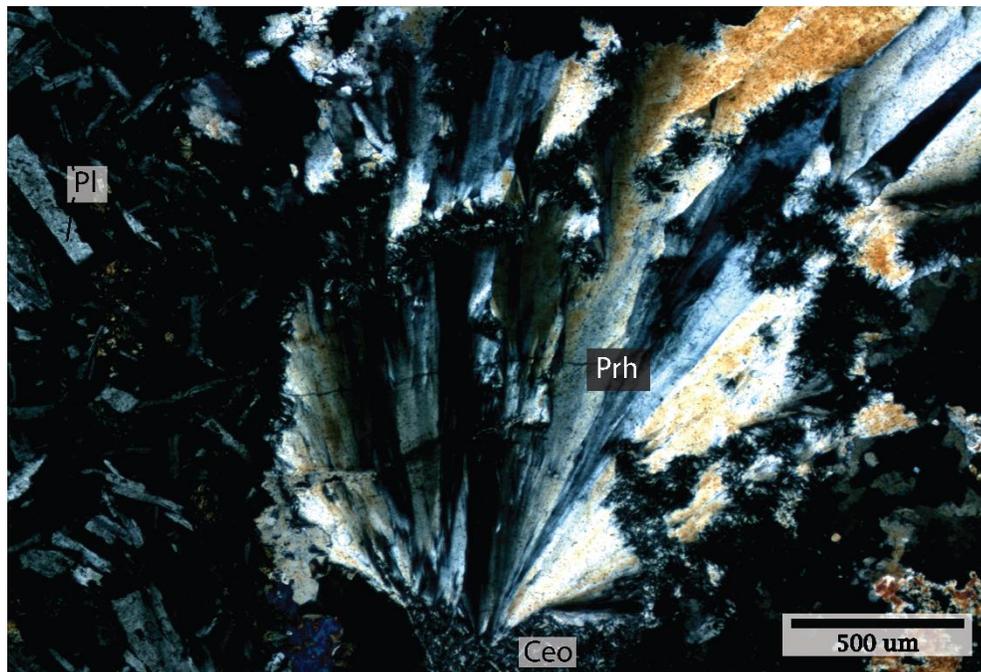


Figura 8 – Fotomicrografía prehnita (Prh) y ceolitas (Ceo) del metamorfismo regional.

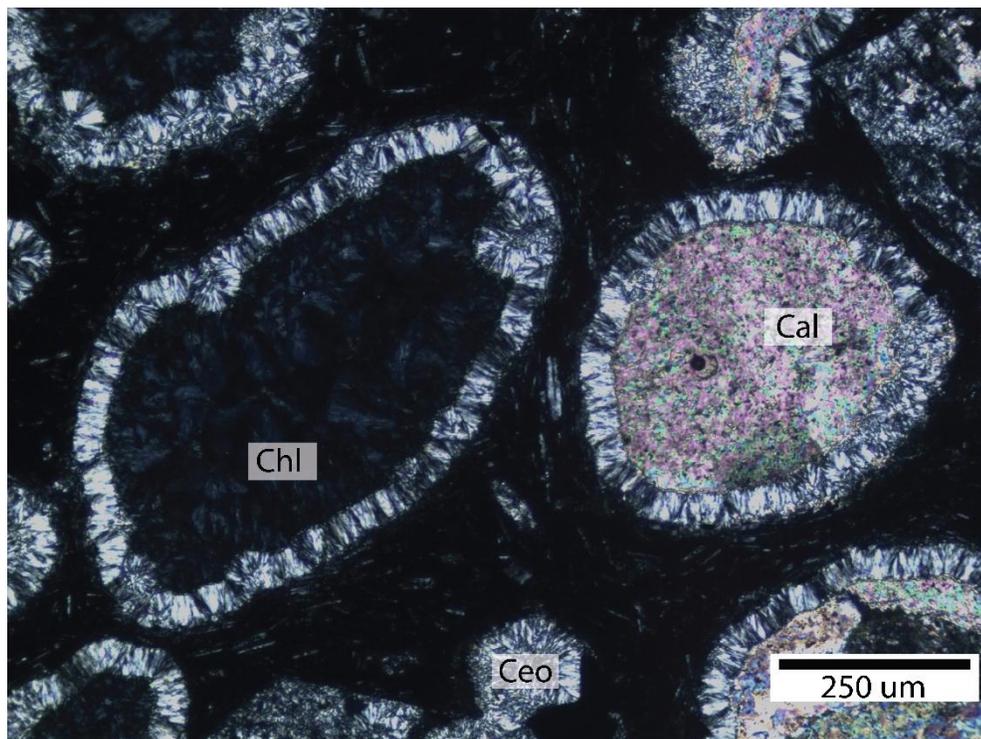


Figura 9 - Fotomicrografía de amígdalas de lava andesítica rellenas con clorita (Chl), calcita (Cal) y ceolitas (Ceo).

### 3.1.2 Eventos de mineralización y alteración.

En relación con la alteración en el depósito, se reconocen 4 eventos principales. Los eventos de alteración hidrotermal son: propilítica, carbonática, hematización y sericitización. La alteración propilítica se reconoce por la presencia de clorita, calcita y en menor medida epidota. Esta alteración está asociada a las vetas, vetillas o brechas mineralizadas. La alteración carbonática y la hematización son de menor desarrollo. La sericitización por su parte es de carácter selectiva afectando plagioclasas de las grauvacas feldespáticas y las andesitas.

La mineralización de cobre está representada, principalmente por calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) y en menor medida por calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), soluciones sólidas de tennantita ( $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ )–tetraedrita ( $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ ) y djurleita ( $\text{Cu}_{31}\text{S}_{16}$ )/anilita ( $\text{Cu}_7\text{S}_4$ ).

El estudio mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) permitió identificar la presencia de diferentes fases de plata. El análisis semi-cuantitativo de estas fases indican que éstas podrían corresponder a stromeyerita ( $\text{CuAgS}$ ), argentodomeykita ( $(\text{Cu}, \text{Ag})_3\text{As}$ ) y arquerita ( $(\text{Ag}, \text{Hg})$ ). Se reconoce además la presencia de un arseniuro de níquel (níquelina?) y un sulfuro de cadmio (greenockita/hawleita?). Otras fases metálicas identificadas son piritita ( $\text{FeS}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), y a nivel de trazas electrum ( $(\text{Au}, \text{Ag})$ ).

A continuación, se presenta una descripción detallada de las distintas etapas de mineralización metálica en el yacimiento.

#### 3.1.2.1 Evento 1

El primer evento de mineralización se caracteriza por la presencia de bitumen (premena), piritita y calcopirita. El origen del bitumen está probablemente asociado al episodio de metamorfismo regional que afectó a las rocas hospedantes. El bitumen se ha descrito en los miembros 1 y 2 de la Formación Quebrada Marquesa. En el Miembro 1, el bitumen presenta una textura homogénea, no porosa, mientras que en el Miembro 2 se observa con textura no homogénea o porosa (**Figuras 10 y 13**).

La piritita se observa como cristales euhedrales a anhedrales mientras que la calcopirita se encuentra rodeando a los cristales de piritita y en algunos casos reemplazando a esta última (**Figuras 10, 11 y 12**).

La mineralización metálica de este evento se presenta en vetillas o diseminada y es acompañada únicamente por calcita.

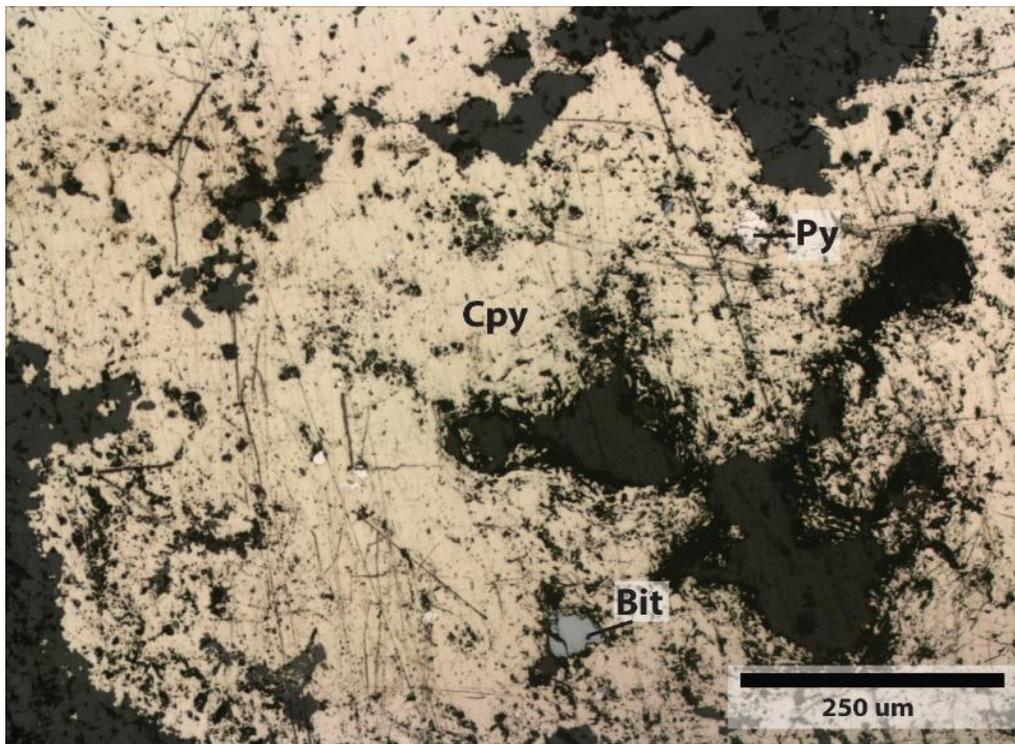


Figura 10 - Fotomicrografía de calcopirita (Cpy) reemplazando a pirita (Py). Se observa además bitumen (Bit) rodeado por calcopirita.

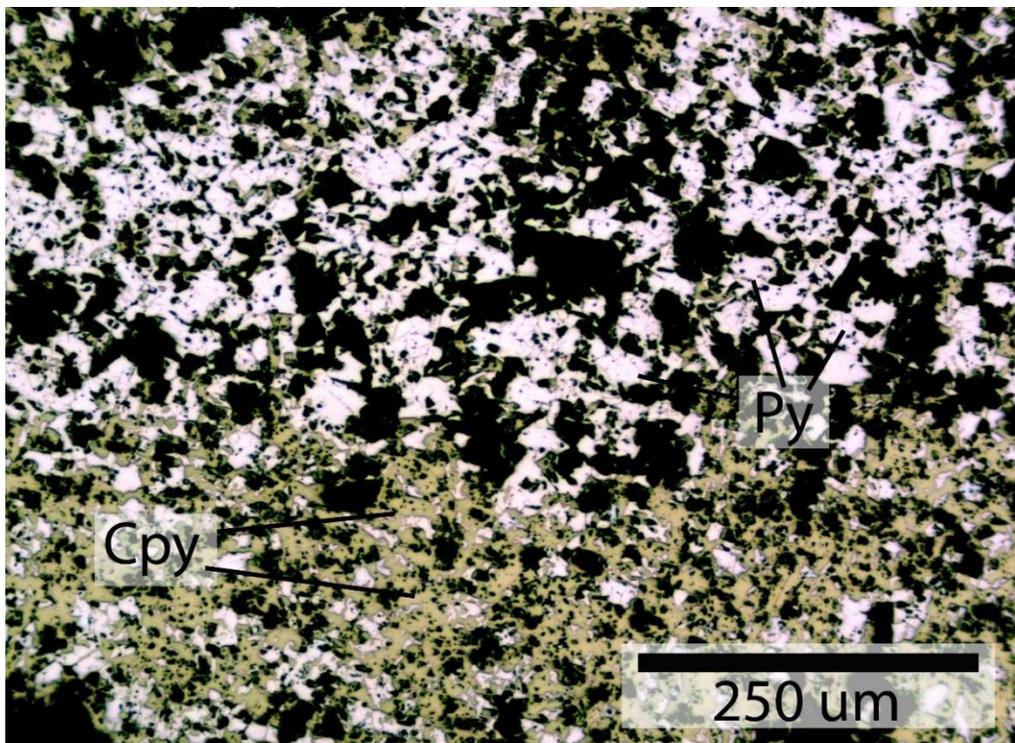


Figura 11 – Fotomicrografía de pirita anhedral (Py) remplazada por calcopirita (Cpy).

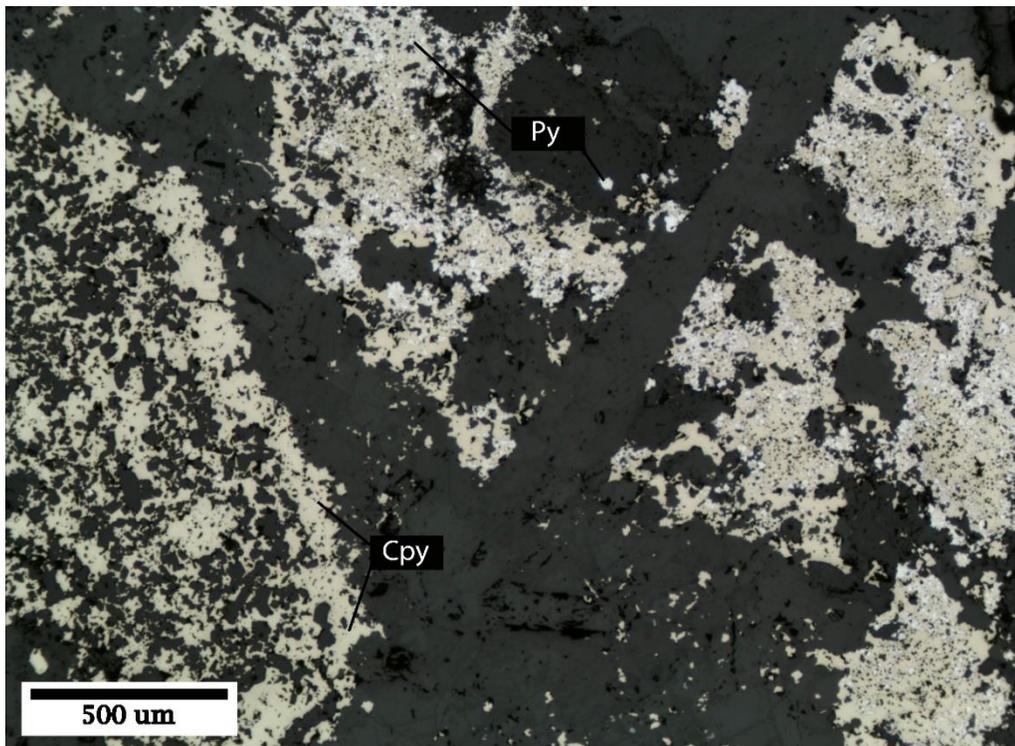


Figura 12 - Fotomicrografía de veta de calcopirita (Cpy) y pirita (Py) cortada por vetillas de calcita y baritina del Evento 2.

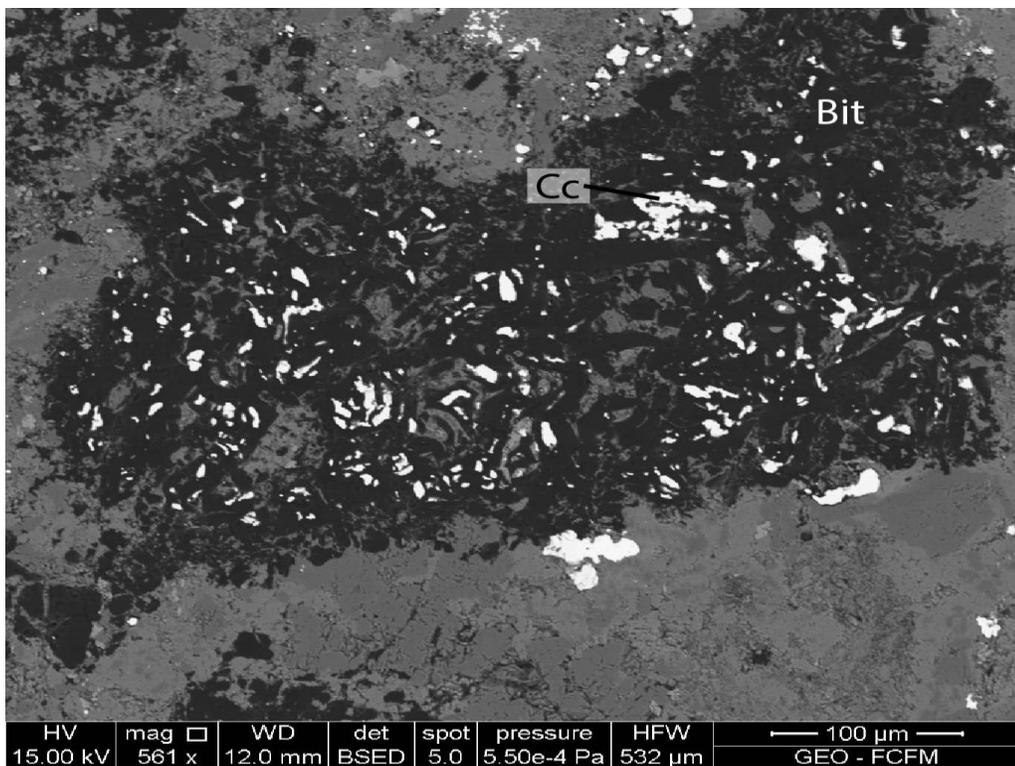


Figura 13 - Imagen BSE de bitumen (Bit) con calcosina (Cc). La muestra corresponde a bitumen poroso del Miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa.

### 3.1.2.2 Evento 2

Este es el principal evento de precipitación de cobre y consiste en formación de sulfosales de cobre (solución sólida tennantita-tetrahedrita) y pequeños cristales de galena. Posteriormente, estas sulfosales son reemplazadas por abundante calcopirita y bornita. Este evento se presenta en vetillas y diseminada (**Figuras 14 y 15**).

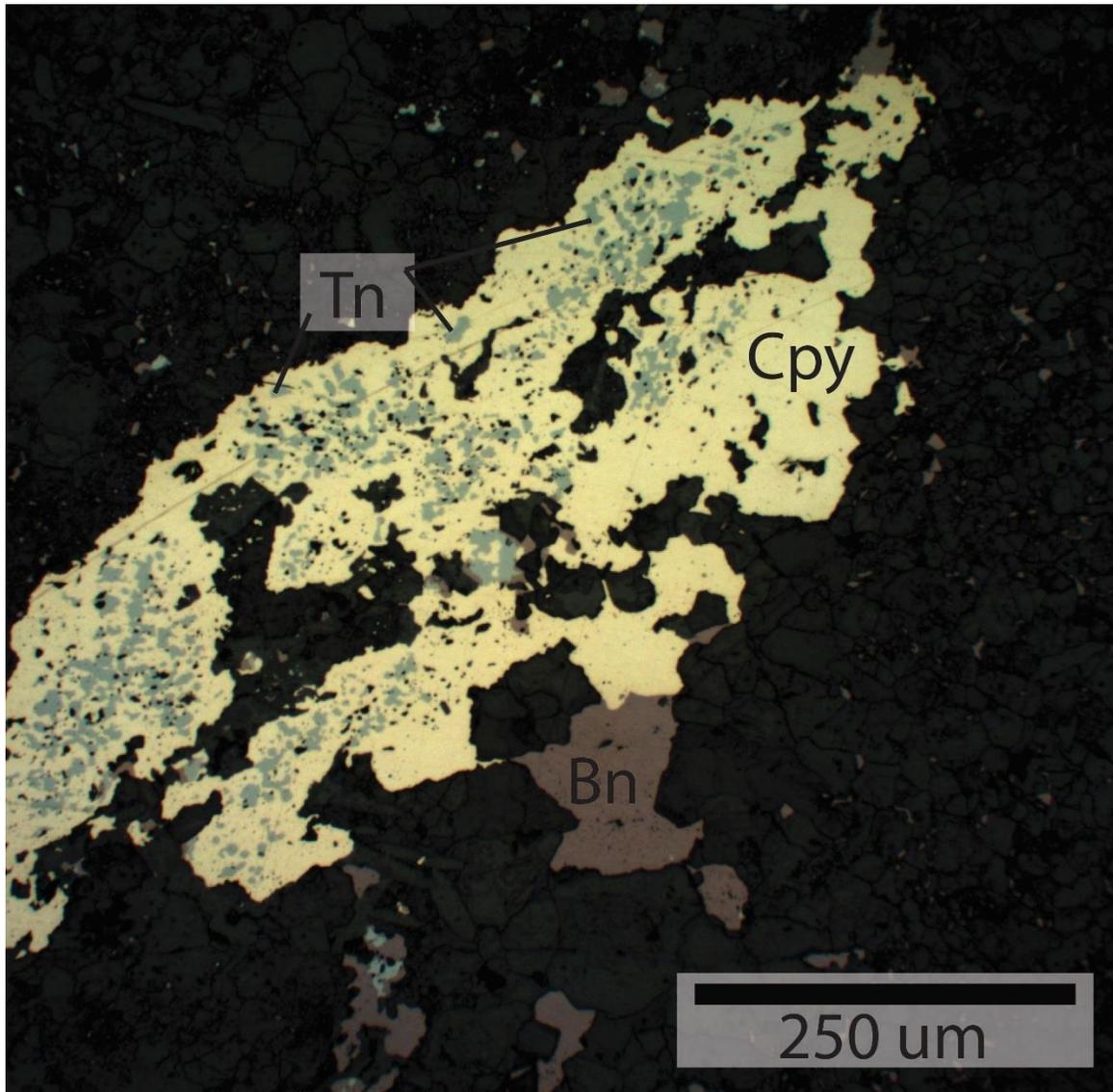


Figura 14 – Fotomicrografía de tennantita (Tn) reemplazada por calcopirita (Cpy) y bornita (Bn). Se observa tanto mineralización en veta como diseminada.

Este evento de mineralización metálica es acompañado de ganga de baritina y calcita, los cuales precipitaron intercrecidos con la mineralización metálica o como vetillas que cortan al Evento 1 (**Figura 16**).

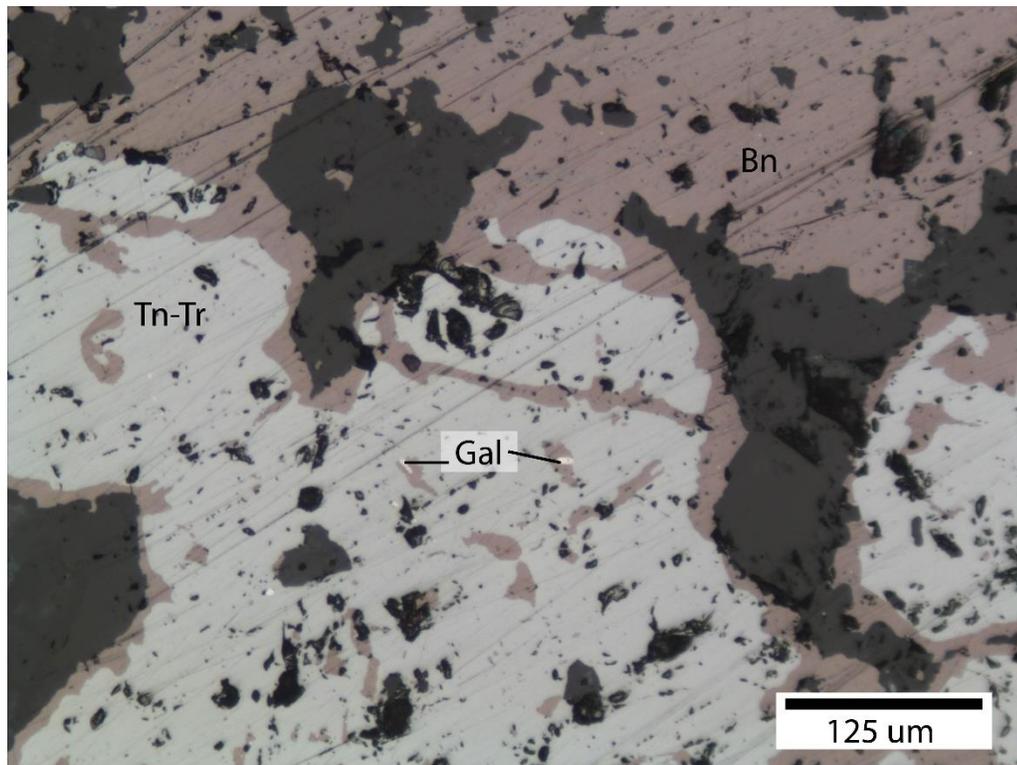


Figura 15 - Solución sólida de tennantita – tetraedrita (Tn-Tr) reemplazada por bornita (Bn). Puntualmente se observa galena (Gal) en bornita.

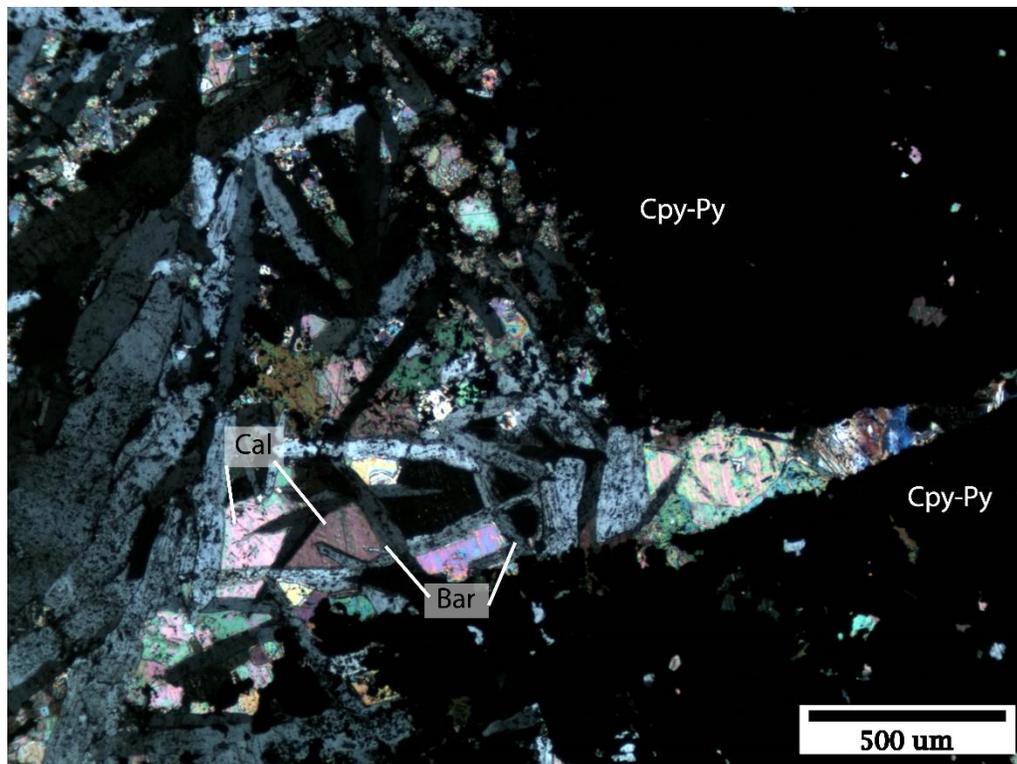


Figura 16 – Fotomicrografía de vetilla de baritina (Bar) y calcita (Cal) cortando el Evento 1 de calcopirita-pirita (Cpy-Py).

### 3.1.2.3 Evento 3

Este evento se caracteriza por la precipitación de minerales de Cu y Ag donde es posible encontrar abundante baritina intercrecida con cristales de arquerita(?), calcita, bornita, calcosina, stomeyerita (?), argentodomeykita (?), galena y sulfosales y arseniuros de Ni y Co (**Figuras 17, 18, 19 y 20**). Este evento puede afectar al Evento 2, reemplazando bornita por calcosina y calcopirita por bornita. El reemplazo de calcopirita por bornita resulta en un aumento de la concentración de hierro, lo cual produciría la precipitación de hematita alrededor de bornita (**Figuras 22 y 23**).

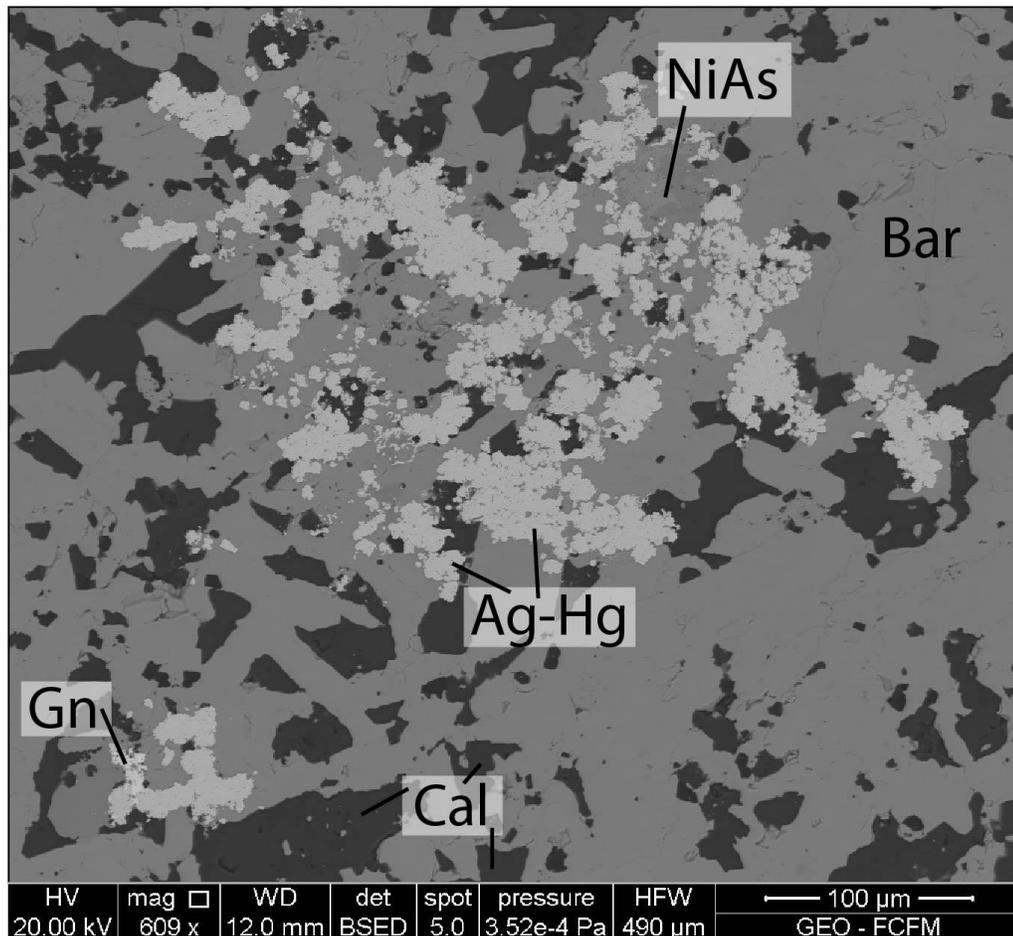


Figura 17 - Imagen BSE de la fase temprana del Evento 3, con presencia de abundante baritina (Bar) intercrecida con probable arquerita (Ag-Hg), galena (Gn), calcita (Cal) y niquelina (NiAs).

En fases tardías es posible encontrar abundantes vetas de calcosina y bornita con textura de intercrecimiento mirmequítico (**Figura 21**), acompañadas en menor medida de calcita, baritina, stromeyerita(?), sulfosales de Cu y galena (**Figura 25**). Además, se distingue mediante microscopio electrónico de barrido, la presencia de electrum y probable greenockita/hawleyita (**Figuras 24**).

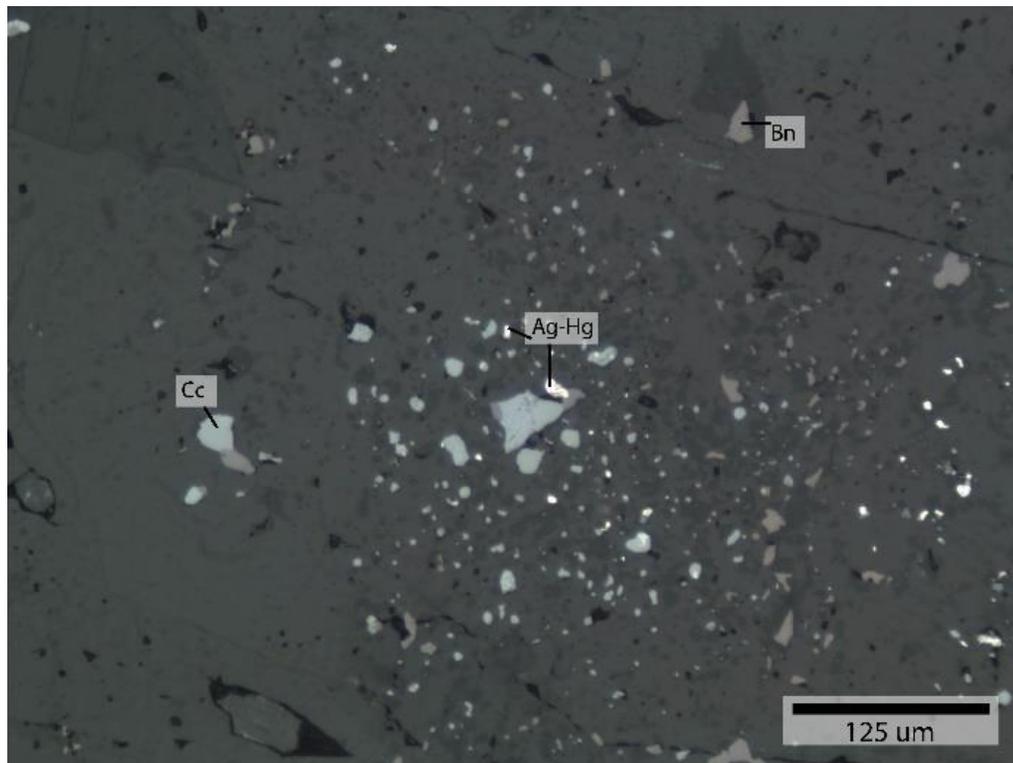


Figura 18 - Fotomicrografía de inclusiones de probable arquerita (Ag-Hg), bornita (Bn) y calcosina (Cc) en baritina.

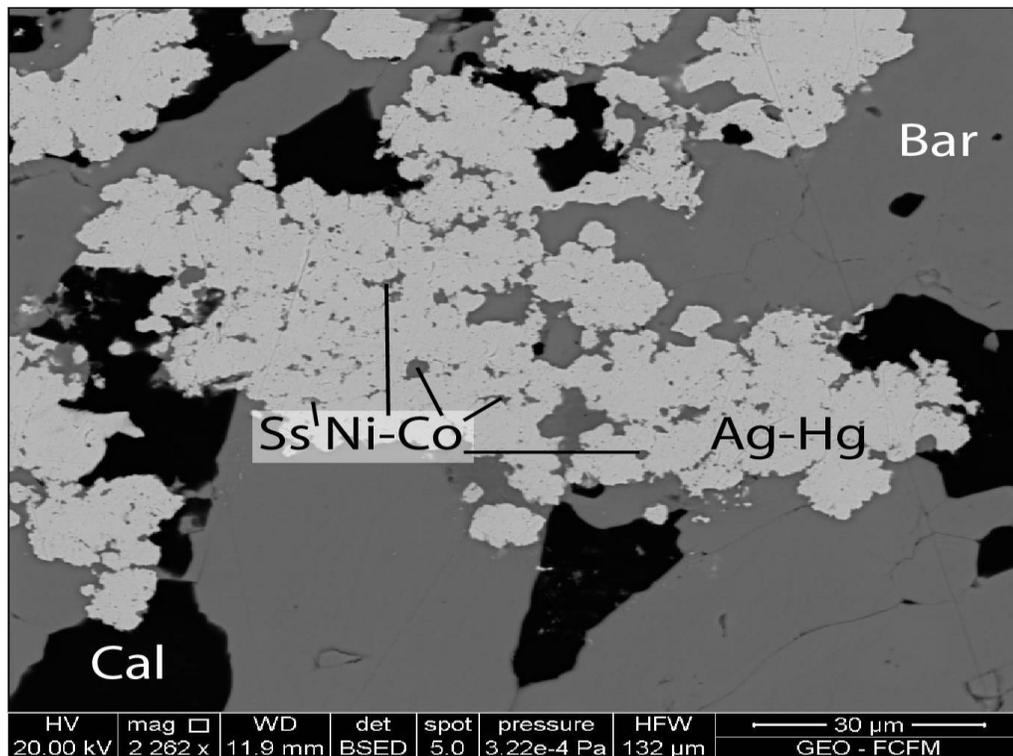


Figura 19 - Imagen BSE del Evento 3 en donde se reconoce sulfosales de níquel y/o cobalto (SS Ni-Co) y arquerita? (Ag-Hg) en baritina (Bar) y calcita (Cal).

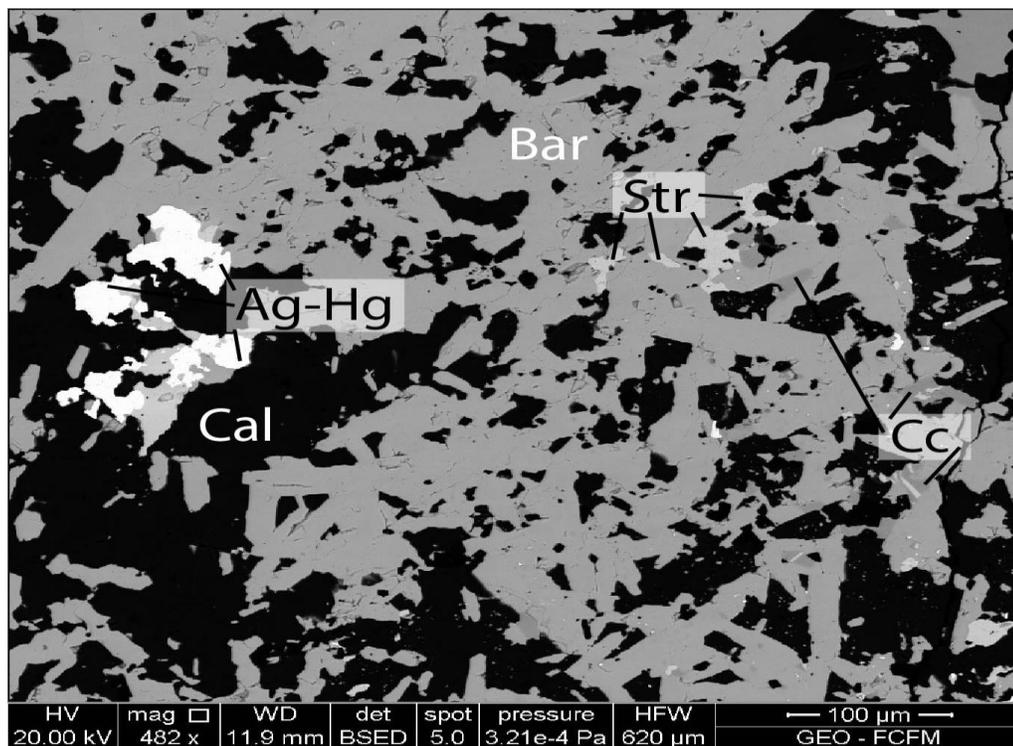


Figura 20 - Imagen BSE de fases tempranas del Evento 3 con presencia de stromeyerita? (Str), calcosina (Cc) y arquerita? (Ag-Hg) en o asociado a baritina (Bar) y calcita (Cal).

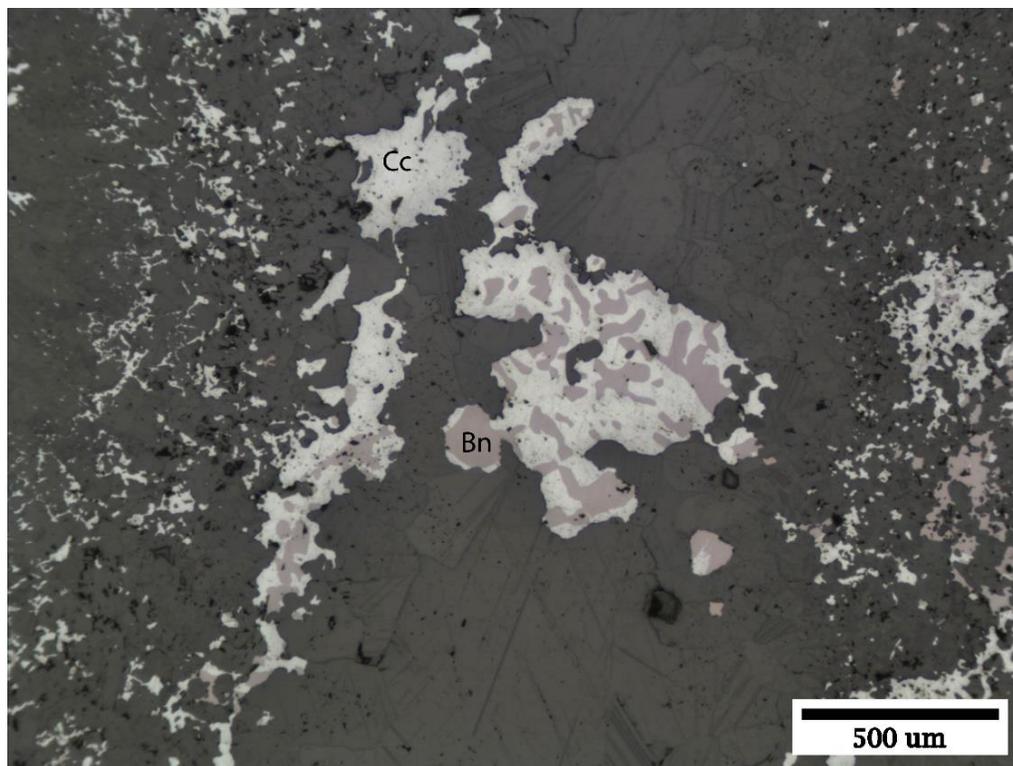


Figura 21 - Fotomicrografía de la fase tardía del Evento 3 que corresponde a mineralización diseminada y vetas de bornita (Bn) y calcosina (Cc) con intercrecimiento mirmequítico.

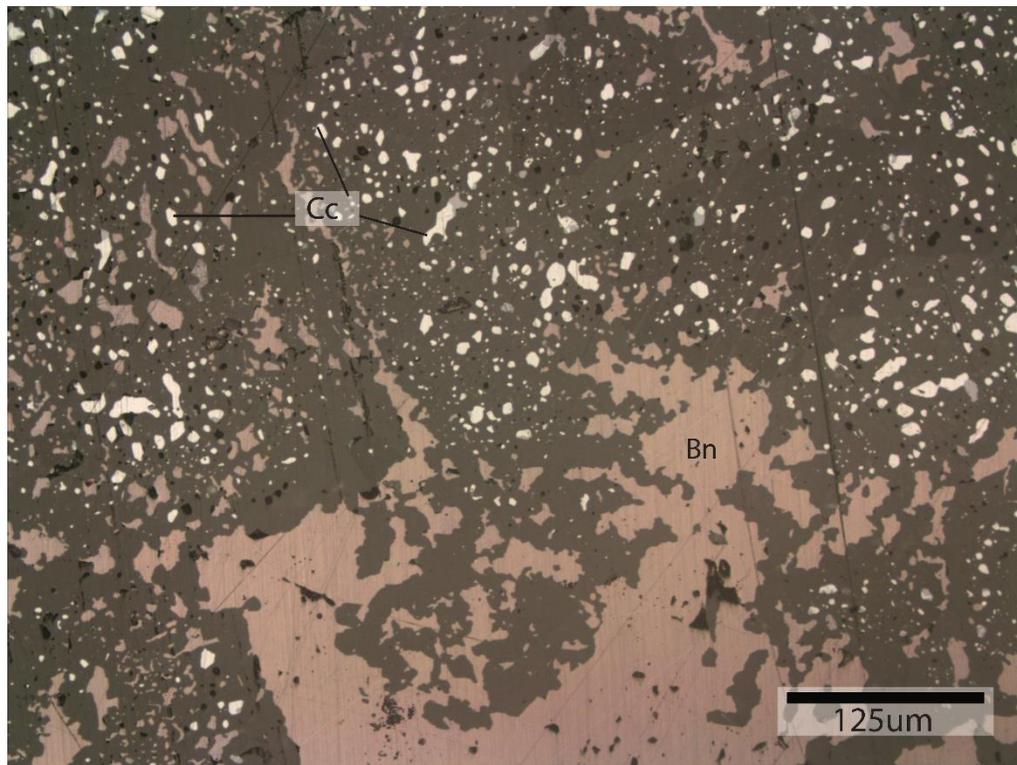


Figura 22 - Fotomicrografía en donde se observa el reemplazo de calcosina (Cc) por bornita (Bn) del Evento 2.

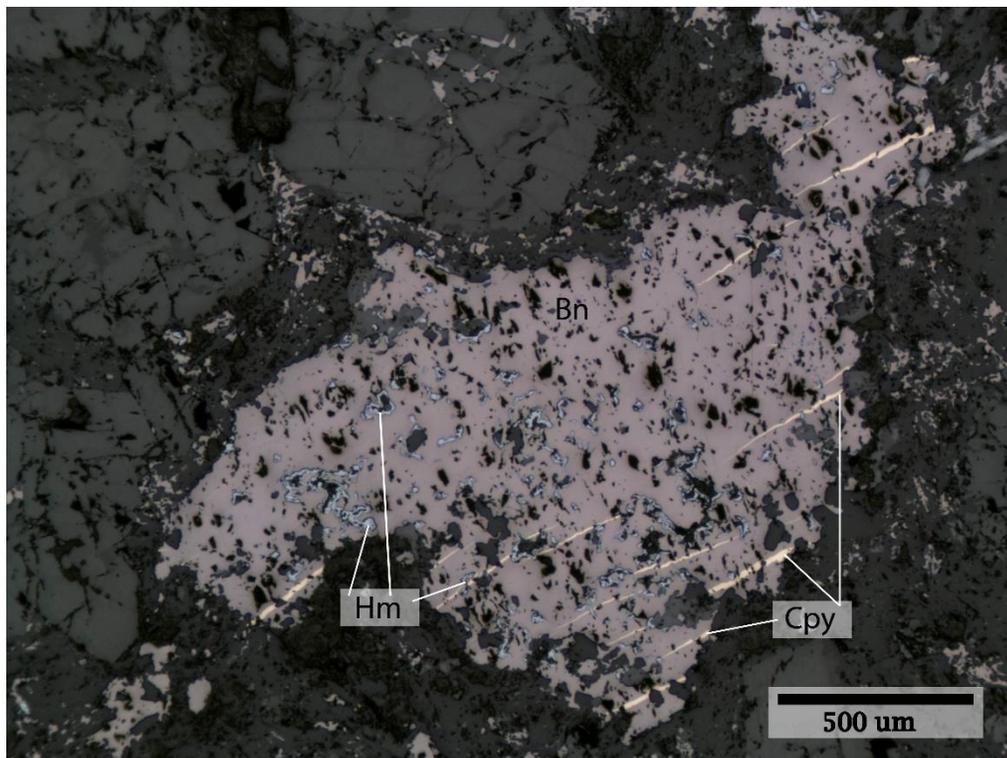


Figura 23 - Fotomicrografía que ilustra el reemplazo de calcopirita (Cpy) por bornita (Bn) y presencia de hematita (Hm).

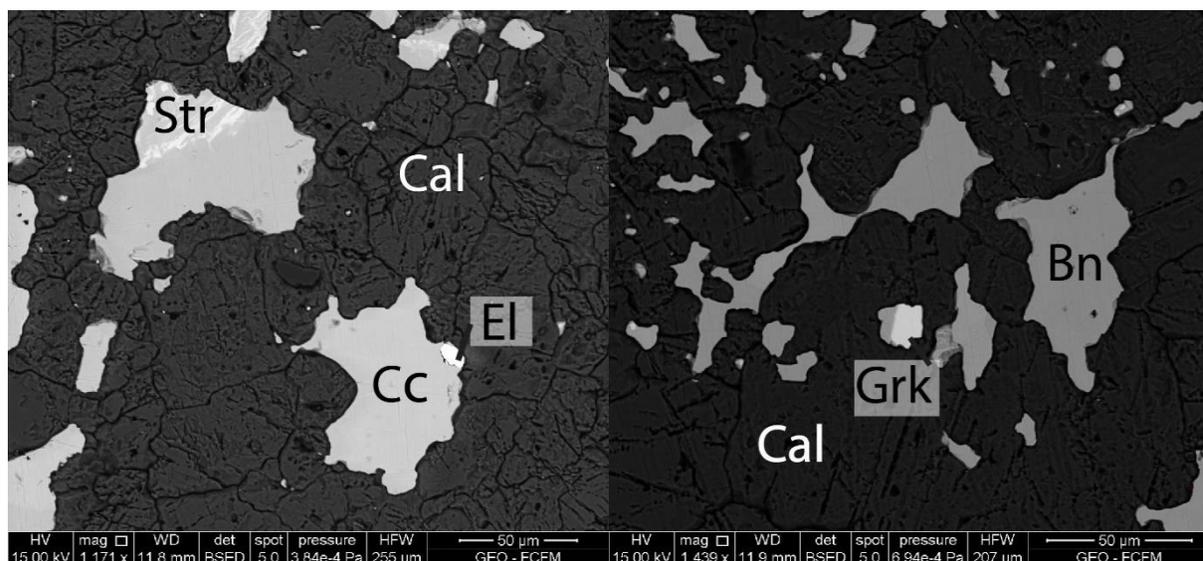


Figura 24 - A la izquierda se observa reemplazo de calcosina (Cc) por probable stromeyerita? (Str) y presencia de electrum (El). A la derecha se observa bornita (Bn) y un sulfuro de Cd, posiblemente greenockita (Grk)/hawleita.

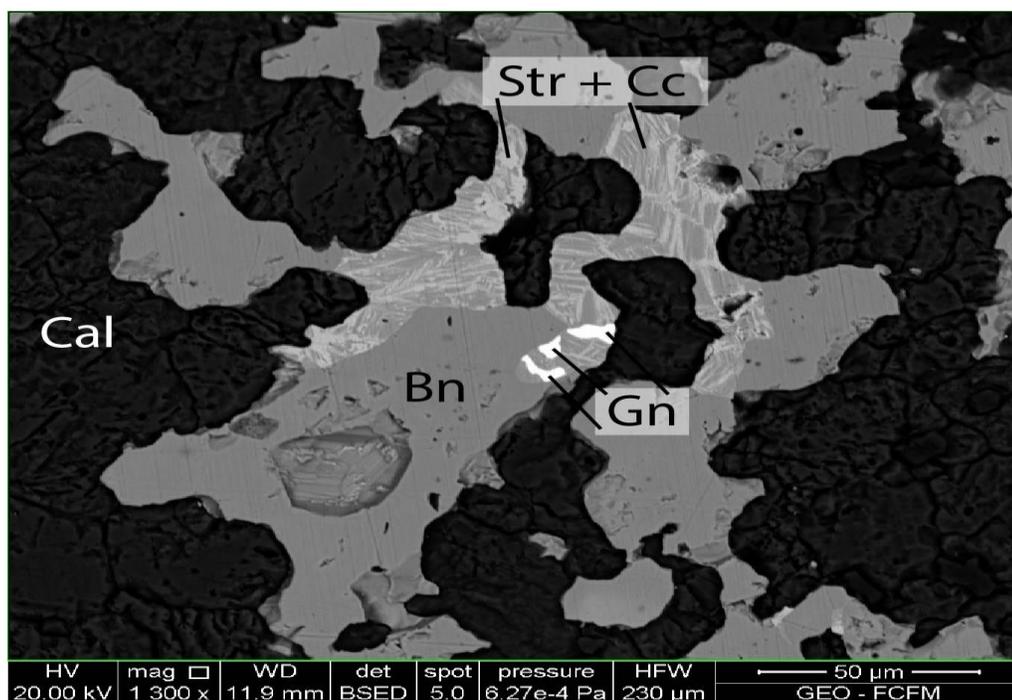


Figura 25 - Imagen BSE de la fase tardía del Evento 3 representada por vetas de calcita (Cal) con bornita (Bn) y calcosina (Cc) reemplazada por stromeyerita? (Str) y galena (Gn) rica en cobre.

Este evento alcanza al Miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa y se concentra en el bitumen poroso o sus cercanías (**Figuras 26 y 27**). En esta situación se observa calcosina diseminada y en los poros del bitumen, además de pequeños cristales de galena y arquerita(?).

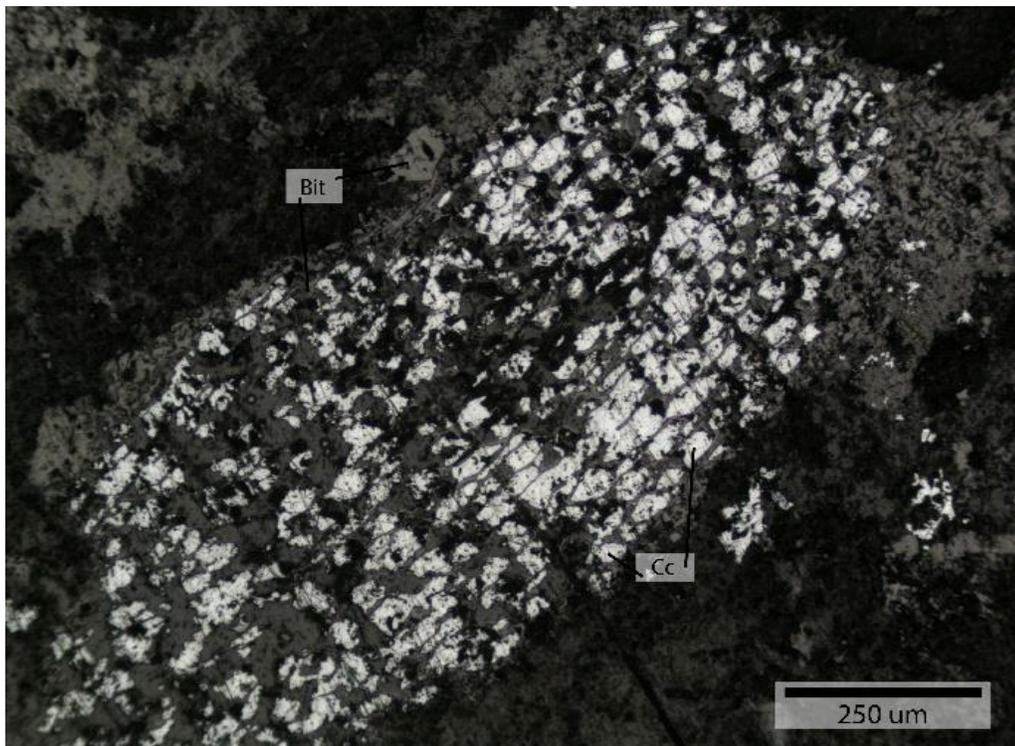


Figura 26 - Fotomicrografía donde se observa bitumen (Bit) con poros ocupados por calcosina (Cc).

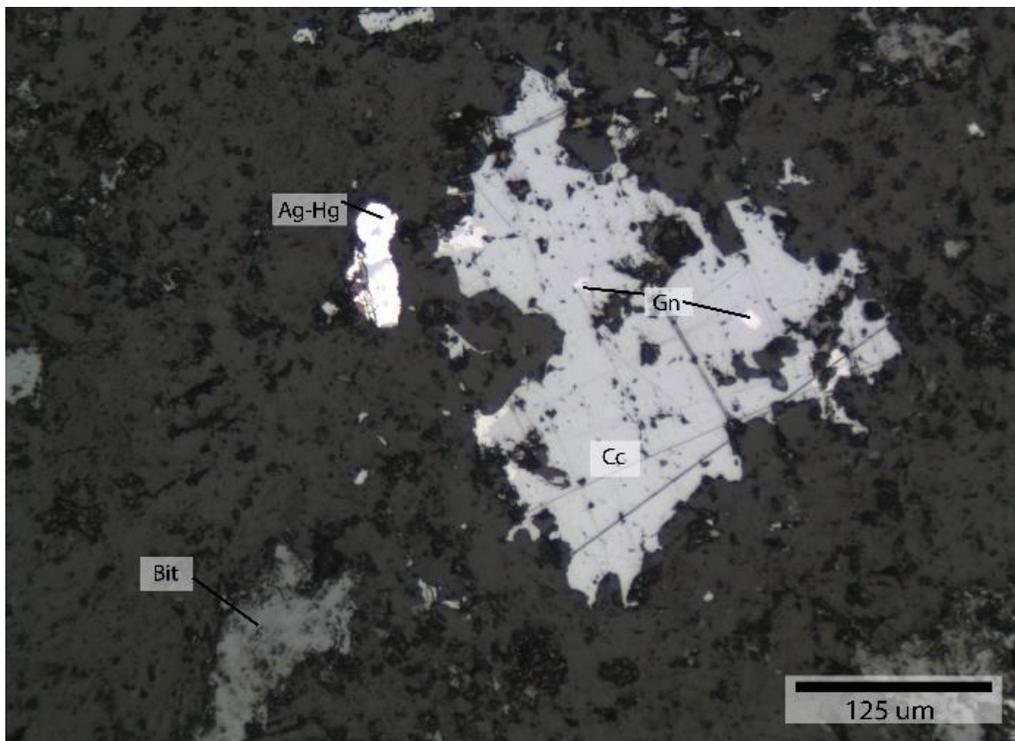


Figura 27 - Fotomicrografía de la mineralización metálica de calcosina (Cc), galena (Gn) y posible arquerita (Ag-Hg) en el Miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa. Se aprecia además bitumen (Bit).

### 3.1.2.4 Evento 4

Este último evento corresponde a un acotado evento de enriquecimiento supérgeno de cobre, caracterizado por la presencia de pequeños cristales de djurleita/anilita (**Figura 28**) que reemplazan a los sulfuros de cobre de las fases previas.

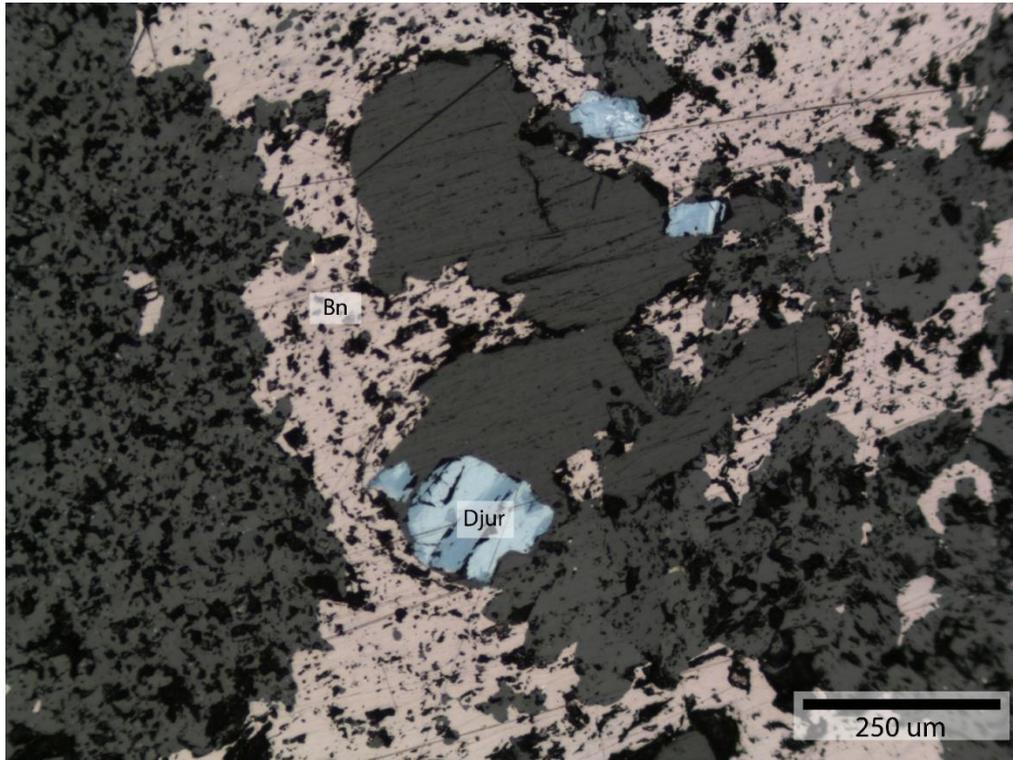


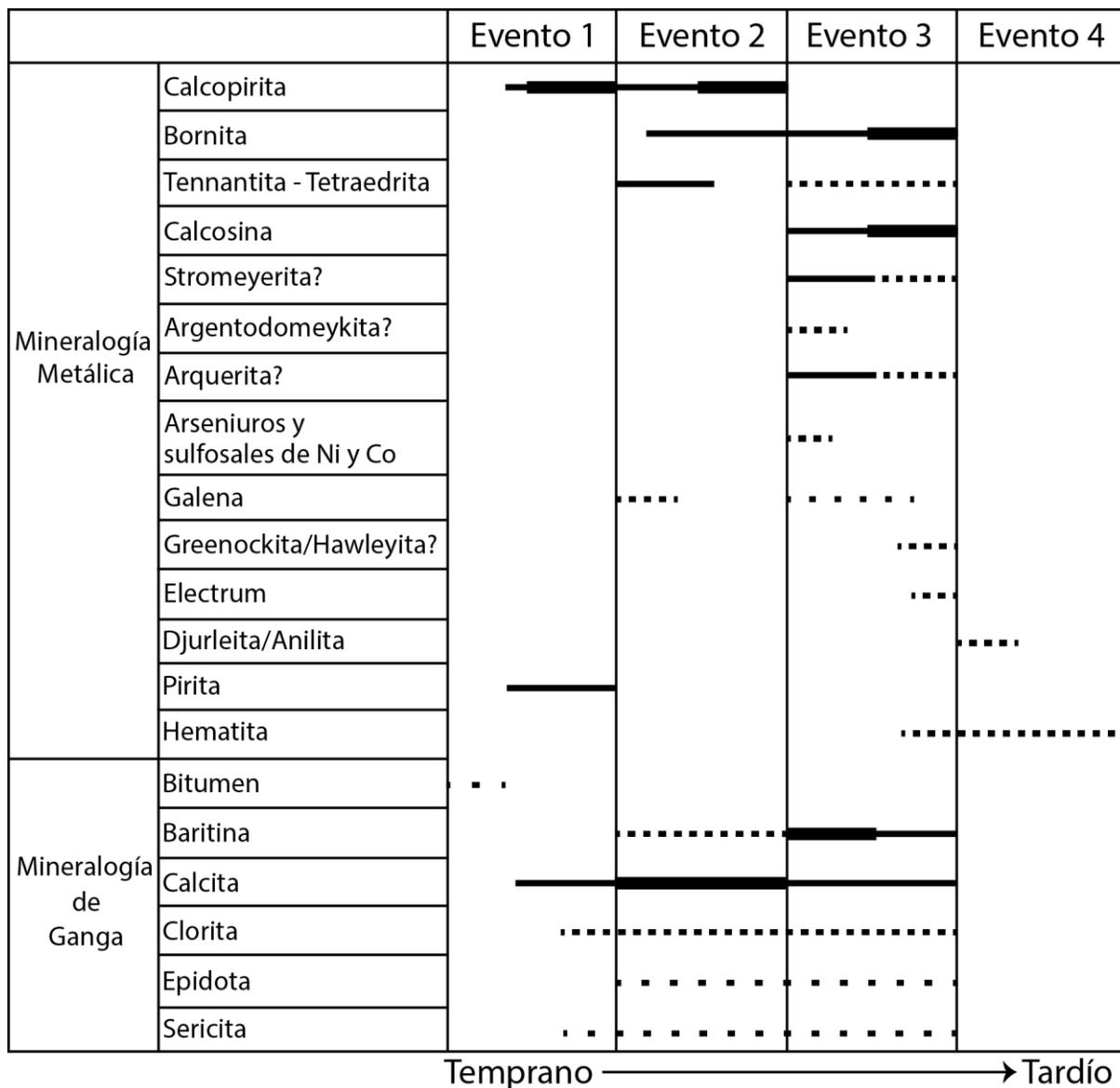
Figura 28 - Fotomicrografía del Evento 4 (supérgeno), el cual presenta pequeños cristales de djurleita (Djur)/anilita asociada a bornita (Bn) primaria.

Las descripciones petrográficas se detallan en el Anexo A, mientras que los espectros y análisis SEM se reportan en el Anexo B.

### 3.2 PARAGÉNESIS MINERAL

La secuencia paragenética (Tabla 3) para el yacimiento de la mina 21 de Mayo se obtuvo en base a observaciones realizadas mediante microscopía óptica de luz transmitida, luz reflejada y los análisis semi-cuantitativos efectuados con el microscopio electrónico de barrido (SEM-EDX).

Tabla 3 - Secuencia paragenética yacimiento de la mina 21 de Mayo.



### 3.3 MICROSONDA ELECTRÓNICA (EMPA)

Se envió una muestra a análisis mediante microsonda electrónica (EMPA), a partir de la cual se obtuvieron 40 análisis puntuales (12 en bornita y 28 en calcosina). Los elementos analizados fueron: Cu, Fe, S, Hg, Te, Se, Bi, Au, Co, As, Pb, Sb, Ni, y Ag. Los rangos y promedios para cada elemento traza presente en calcosina y bornita se presentan en la Tabla 4 y se ilustran en la **Figura 29**. Todos los datos se presentan en el Anexo C.

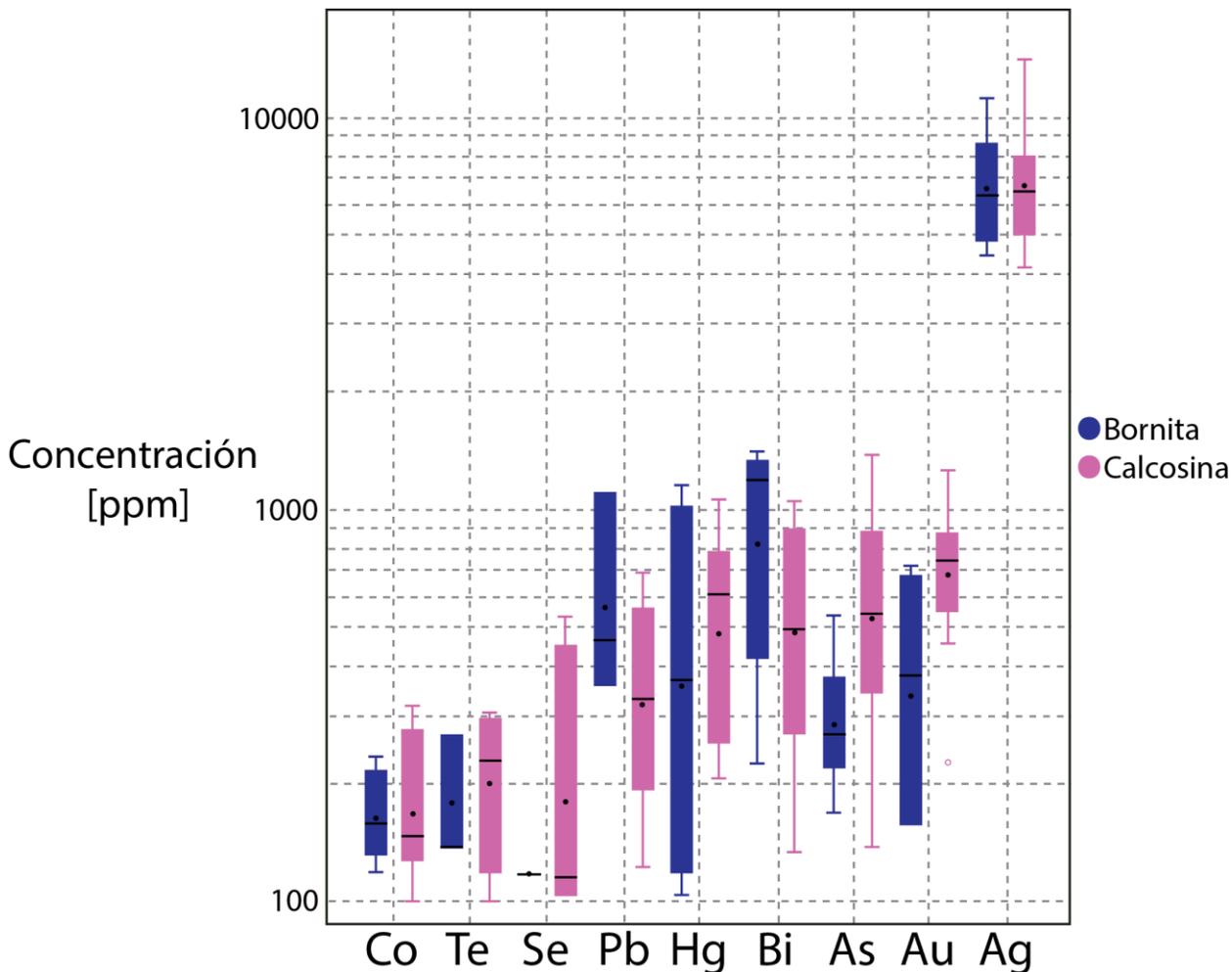


Figura 29 - Gráfico de concentraciones de elementos traza en bornita y calcosina del Evento 3 en escala logarítmica.

Tabla 4 - Resultados de microsonda electrónica para la muestra 21E-1067-1.

	Mineral	Bornita (12)	Calcosina (28)
Ag(ppm)	(n)	12	28
	Rango	4447 - 11100	4114 - 14100
	Promedio	6933	7118
Au(ppm)	(n)	5	14
	Rango	157 - 721	228 - 1263
	Promedio	407	735
Pb(ppm)	(n)	3	12
	Rango	356-1093	123 - 689
	Promedio	637	364
Hg(ppm)	(n)	6	11
	Rango	104 - 1148	206 - 1067
	Promedio	553	554
Te(ppm)	(n)	5	4
	Rango	138 - 267	100 - 304
	Promedio	189	218
Se(ppm)	(n)	2	7
	Rango	118-118	105 - 534
	Promedio	118	233
As(ppm)	(n)	9	25
	Rango	169 - 540	138 - 1388
	Promedio	301	621
Sb(ppm)	(n)	0	1
	Rango		111
	Promedio		111
Bi(ppm)	(n)	5	9
	Rango	225 - 1413	133 - 1052
	Promedio	968	595
Co(ppm)	(n)	6	7
	Rango	119-234	100 - 318
	Promedio	169	182
Ni(ppm)	(n)	1	1
	Rango	143	108
	Promedio	143	108
Fe(ppm)	(n)		28
	Rango		609 - 7227
	Promedio		2012

### 3.4 DATOS DE LEY DE Cu-Ag-As

Mediante el procesamiento de los datos de leyes de Cu, Ag y As se obtuvieron las matrices de correlación entre los tres elementos en la mina, como a nivel de vetas estudiadas. La Tabla 5 resume los factores de correlación para los distintos elementos.

Tabla 5 - Resumen de las matrices de correlación de la mina 21 de Mayo.

Sector del yacimiento	Correlación Cu - Ag	Correlación Cu - As	Correlación Ag - As
Mina 21 de Mayo	0.67	0.11	0.15
Veta Daniela	0.85	0.34	0.35
Veta Fabiola	0.87	0.48	0.42
Veta Claudia Mariela	0.84	0.49	0.53
Veta Dinka Patricia	0.84	0.43	0.40
Veta Jenifer	0.84	0.55	0.49
Veta Josefina	0.86	0.48	0.54
Veta Valeska	0.91	0.48	0.49

### 3.5 ISÓTOPOS DE AZUFRE

Los análisis de isótopos de azufre se realizaron en muestras de bornita, sin embargo, no se descarta la presencia de calcosina por intercrecimiento mirmequítico. Los resultados se reportan en la Tabla 6.

Tabla 6 - Resultados de los isótopos de azufre de bornita de la mina 21 de Mayo.

Muestras	Isótopos de Azufre
Talcuna 1	-14,7‰
Talcuna 2	-25,3‰
Talcuna 3	-21,1‰

Los resultados oscilan entre -14,7 y -25,3‰ con una media de -20,1%, similar a lo reportado para otros yacimientos del Cretácico, lo que indica una posible fuente de azufre por reducción bacteriana de sulfato marino.

## 4 DISCUSIÓN

### 4.1 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN.

Se reconocen 4 etapas de mineralización/alteración en el yacimiento de la mina 21 de Mayo. La primera etapa (Evento 1) está caracterizada por la escasa presencia de bitumen con textura prístina y porosa, pirita euhedral a anhedral y abundante calcopirita asociada a calcita. Boric et al. (2002), basados en estudios realizados en la mina El Soldado, proponen que el bitumen se genera en las etapas de diagénesis y metamorfismo regional, por lo tanto, correspondería a una etapa pre-mineralización metálica (premena). Posteriormente a la formación de bitumen, precipita pirita que luego es reemplazada por calcopirita. Esta asociación pirita-calcopirita también ha sido observada en otros yacimientos estratoligados de Cu-(Ag) como El Soldado (Boric et al., 2002). Sin embargo, a la fecha no se ha reconocido en la mina 21 de Mayo la presencia de pirita con textura framboidal de origen diagenético documentada en otros estratoligados del Cretácico (Boric et al. 2002; Maureira, 2018).

El Evento 2 corresponde a la precipitación de sulfosales de Cu (solución sólida tennantita-tetraedrita), las cuales son reemplazadas por calcopirita y bornita asociadas a la presencia de baritina y calcita como ganga. Tanto esta asociación como la presencia de baritina no son fases típicas reportadas en los estratoligados de Cu-(Ag). Sin embargo, la asociación sulfosales Cu-Ag + baritina + calcita ha sido descrita en el distrito Arqueros, ubicado al norte del yacimiento mina 21 de Mayo (Oyarzún et al., 1998).

La asociación bornita y calcosina en textura de intercrecimiento mirmequítico son representativos del Evento 3. Este tipo de textura es común en estratoligados de Cu-(Ag) y ha sido documentada en El Soldado (Boric et al., 2002), Michilla (Tristá-Aguilera et al., 2006) y en Altamira y Las Luces (Maureira, 2018). En el caso de Altamira y Las Luces, análisis por microsonda electrónica muestran altos contenidos de plata en solución sólida en bornita y calcosina.

En este Evento 3 también se observaron arseniuros y sulfosales de Ni y Co y arquerita(?). Esta mineralogía también ha sido reportada en el distrito Arqueros (Cucurella et al., 2015), por lo que la presencia de estos minerales asociados a bornita y calcosina con textura de intercrecimiento mirmequítico, sugiere una posible superposición o mezcla de fluidos hidrotermales entre un sistema tipo estratoligado de Cu-(Ag) y un epitermal rico en Ag. Esta superposición se sustenta además por la abundante presencia de baritina, fase de ganga común en Arqueros, y la precipitación de stromeyerita(?) en esta etapa.

El último evento de mineralización reconocido en este yacimiento, corresponde a un acotado evento supérgeno con precipitación de djurleita/anilita en el Miembro 1 de la Formación Quebrada Marquesa y la precipitación de óxidos de cobre en los miembros superiores de la formación (Boric, 1985) posiblemente producto de la oxidación *in situ* de sulfuros de cobre. Cabe señalar que este evento no es de carácter económico debido a la poca cantidad de pirita disponible en el sector, lo cual impide la formación de ácido sulfúrico y la consecuente lixiviación de sulfuros de Cu primarios. Adicionalmente, este

evento se acompaña de abundante hematita que actúa como cemento de las grauvacas que hospedan la mineralización.

La alteración hidrotermal es principalmente una alteración de tipo propilítica con clorita, calcita y menor epidota. Este tipo de alteración es característica de yacimientos estratoligados y se desarrolla generalmente como halos de alteración de las vetas mineralizadas (Boric et al., 2002; Makshev y Zentilli, 2002; Maureira, 2018).

## 4.2 ROL DEL BITUMEN

El bitumen es una fase comúnmente presente en depósitos estratoligados de Cu-(Ag) del Cretácico (Zentilli et al., 1997; Cisternas y Hermosilla, 2006). Cucurella et al. (2005) describen la presencia de bitumen en la mina 21 de Mayo y Socavón 2001 y concluyen que el bitumen fue transportado desde calizas de la Formación Arqueros por fluidos hidrotermales de baja temperatura (180-320°C) y salinidad moderada (6,5 a 21% en peso de NaCl equiv.). Posteriormente, Cucurella et al. (2006) describen vetillas de pirobitumen asociadas a la mineralización de Cu en el Miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa. Esto es de relevancia, ya que la mineralización en el distrito Talcuna históricamente se consideraba restringida al Miembro 1 de la Formación Quebrada Marquesa.

La identificación de bitumen con textura prístina y porosa sugiere que el bitumen se depositó en una etapa temprana previo a la mineralización. La presencia de bitumen poroso con calcosina sugiere que fluidos hidrotermales posteriores reaccionaron con el bitumen precipitando cobre y transformando el bitumen a pirobitumen. Lo anteriormente expuesto es consistente con la idea que el bitumen puede actuar como una trampa para los fluidos hidrotermales cargados en cobre, sin embargo, no sería el único control para la precipitación de cobre.

## 4.3 ISÓTOPOS DE AZUFRE

Los datos obtenidos en este estudio muestran un amplio rango de valores de  $\delta^{34}\text{S}$  negativos (-14,7 a -25,3‰; Tabla 6). Valores negativos de isótopos de azufre han sido reportados (Ver Anexo D) para varios depósitos estratoligados del Cretácico (**Figura 30**), evidenciando un origen del azufre por reducción bacteriana de sulfato marino (Carrillo-Rosúa et al., 2014).

Adicionalmente, se ha reportado para algunos depósitos estratoligados la presencia de bitumen sólido en estrecha relación con piritas framboidales (Boric et al., 2002; Carrillo-Rosúa et al., 2014). En la mina 21 de Mayo se ha documentado la presencia de bitumen y de pirita, pero no de piritas framboidales, sin embargo, los valores negativos de  $\delta^{34}\text{S}$  y la presencia de rocas sedimentarias marinas en la Formación Arqueros, son consistentes con una fuente primaria de azufre por acción de bacterias.

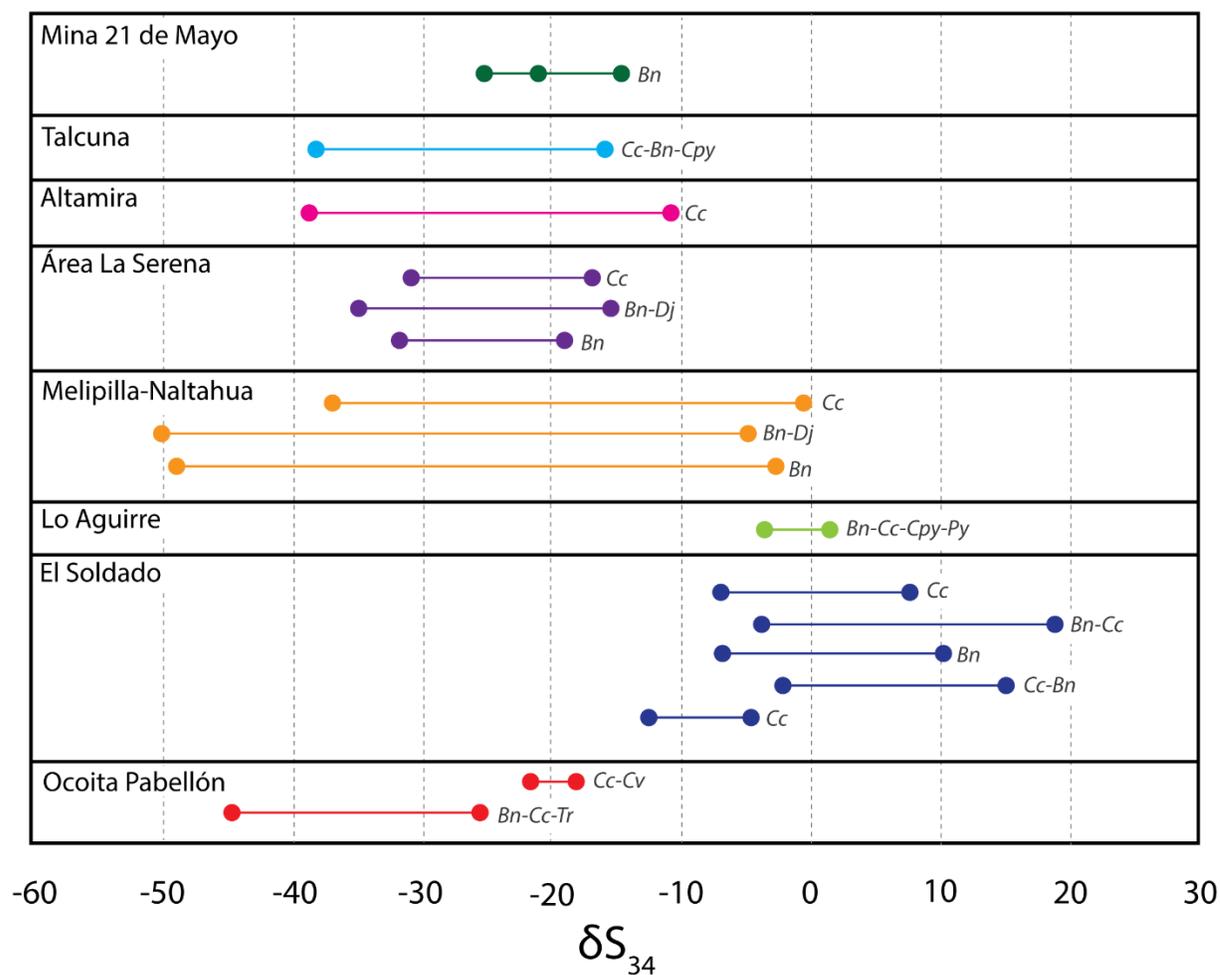


Figura 30 - Comparación de los valores de isótopos de azufre entre los yacimientos estratoligados Cu-(Ag) del Cretácico y la mina 21 de Mayo. Bn: Bornita, Cc: Calcosina, Tr: Tetraedrita, Cpy: Calcopirita, Py: Pirita, Cv: Covelina y Dj: Djurleita.

#### 4.4 FORMA Y OCURRENCIA DE LA PLATA

Los estudios de microscopía óptica y electrónica realizados muestran que la mineralogía argentífera del yacimiento se asocia principalmente al Evento 3 (Tabla 4). La mineralogía de plata solo pudo ser determinada en forma semi-cuantitativa pudiendo ésta corresponder a arquerita, stromeyerita y argentodomeykita. Además, análisis mediante SEM permitieron identificar la presencia de plata en las sulfosales de Cu, Ni y Co del Evento 3. Cabe destacar que Boyle (1968) explica que la plata de carácter supérgeno rara vez contiene mercurio por lo que se le otorga un carácter hipógeno a la arquerita.

Por otro lado, los análisis de microsonda electrónica muestran valores de plata para calcosina que van desde los 4114 a 14100 ppm y para bornita entre 4447 a 11100 ppm. Estos resultados indican que la plata es incorporada de forma abundante en estas dos fases minerales. Altas concentraciones de Ag han sido reportadas en calcosina de los depósitos de Altamira y Las Luces, y en bornita de este último. Sin embargo, no se detectó Ag en

bornita del depósito de Altamira (Maureira, 2018). En algunas muestras del sector noreste y sur de la mina 21 de Mayo es posible encontrar microinclusiones de plata en calcosina y en algunos casos es posible apreciar reemplazos parciales o totales de stromeyerita(?) por calcosina, pero no se aprecia ningún tipo de reemplazo o inclusión de plata en bornita.

Lo anterior sugiere que la plata puede ser preferentemente incorporada en calcosina, seguido de bornita en solución sólida o como nano inclusiones “invisibles” como ha sido reportado en bornita y calcopirita del depósito Mantos Blancos (Reich et al., 2013). Si los fluidos hidrotermales poseen concentraciones muy altas de plata se excede la capacidad de estos sulfuros de Cu y Cu-Fe de incorporar Ag y se podrían formar minerales de plata tales como la stromeyerita.

#### 4.5 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.

Los estudios petrográficos complementados con los análisis de fases minerales en el microscopio electrónico de barrido (SEM) y los resultados de microsonda electrónica (EPMA) permiten realizar las siguientes consideraciones geometalúrgicas para la explotación del yacimiento mina 21 de Mayo.

La primera consideración de relevancia es respecto a la presencia de arsénico en el yacimiento. Este elemento es considerado una impureza que castiga el valor del concentrado. En el depósito de la mina 21 de Mayo, el As proviene de diversas fuentes. Se le observa en tennantita perteneciente a la fase temprana del Evento 2, esta es posteriormente reemplazada por bornita y calcopirita, los cuales pueden incorporar As. Esto genera que, en muestra de mano, la calcopirita tenga tonalidades amarillo verdoso. Por otro lado, en el Evento 3 también es posible encontrar mineralogía con arsénico, consistente en arseniuros de Ni y Cu (posiblemente niquelina y argentodomeikita), y sulfosales de Cu, Ni y Co, pero esta mineralogía es de menor importancia. De acuerdo con los análisis de microsonda electrónica, el arsénico de este evento se aloja principalmente en las fases de cobre principales, vale decir, en bornita (169-540 ppm) y calcosina (138-1388 ppm).

La segunda consideración corresponde al mercurio, el cual se encuentra como una aleación de Ag-Hg, posiblemente arquerita. Esta aleación no genera complicaciones en los procesos de la planta de flotación. Por otro lado, y al igual a lo reportado para bornita y calcosina de Altamira y Las Luces (Maureira, 2018), en el presente trabajo se detectó la presencia de Hg en estas dos fases de cobre del Evento 3, con promedios de 553 ppm en bornita y 554 ppm en calcosina. Esto es importante de considerar ya que, al encontrarse el Hg dentro de estas fases minerales, este no es liberado durante el proceso de concentración de Cu.

La tercera consideración corresponde a la presencia de Au en el yacimiento. Los análisis de microsonda electrónica indican contenidos importantes de Au en bornita (157-721 ppm) y calcosina (228-1263 ppm) del Evento 3. Adicionalmente, en el presente estudio se reconoció la presencia de electrum (**Figura 23**) en la veta Valeska. Otros estratoligados de Cu-(Ag) como Altamira y Las Luces (Maureira, 2018) o Mantos de Luna, Susana-Lince y Mantos Blancos (Alvear, 2009), no reportan valores de Au relevantes, pero estudios en

digenita supérgena en Mantos de Luna y Michilla indican la presencia de plata y oro “invisible” (Reich et al., 2010), aunque los valores de Au registrados en Michilla y Mantos de Luna son 2 órdenes de magnitud más bajos que los obtenidos en este estudio.

La plata es un subproducto importante en la mina alcanzando valores relativamente altos tanto en bornita como en calcosina (promedio de 6933 y 7118 ppm, respectivamente). Además, la presencia de minerales como stromeyerita(?) y arquerita(?) indican la presencia de fluidos saturados en plata. Cabe señalar, que los sectores que presentan bajas leyes de cobre y altas leyes de plata son lugares que tienen solo fases tempranas del Evento 3 con una mayor mineralización de Ag-Hg y menor presencia de sulfuros de cobre.

Es importante destacar que las correlaciones de Cu-Ag, Cu-As y Ag-As (Tabla 5) en las vetas del depósito son consistentes con la mineralogía encontrada, siendo la correlación Cu-Ag la de valores más altos debido a la incorporación de plata en los distintos minerales de Cu y por la presencia de minerales de Ag. Por otro lado, las relaciones Cu-As y Ag-As, se pueden explicar no solo por la presencia de sulfosales de Cu, si no por la incorporación de arsénico en bornita y calcosina del Evento 3, los cuales además presentan altas concentraciones de plata en su estructura.

Finalmente, el alto contenido de plata reportado para la mina 21 de Mayo y su cercanía con el distrito argentífero de Arqueros sugiere una posible mezcla o superposición de eventos ricos en cobre y fluidos ricos en plata. Esta transición o gradación hacia un sistema epitermal rico en Ag se basa además sobre la abundante presencia de baritina, fase de ganga común en Arqueros (Oyarzún et al., 1998) y la precipitación de stromeyerita y aleaciones de Ag-Hg como las descritas para el distrito Arqueros (Cucurella et al., 2015).

#### **4.6 MINA 21 DE MAYO Y ESTRATOLIGADOS Cu-(Ag) DEL DISTRITO**

La mineralización de Cu-(Ag) en los depósitos estratoligados del distrito Talcuna puede presentarse de dos maneras: conformando cuerpos mantiformes como en los yacimientos Coca-Cola I y II (Toledo, 2004; Salgado, 2004) o formando cuerpos vetiformes como ocurre en la mina 21 de Mayo. En el primer caso, la mineralización tiene un fuerte control litológico definido por la permeabilidad de las rocas, mientras que en el segundo caso, el control es netamente estructural en donde los fluidos mineralizados ascienden por fallas para luego precipitar su carga metálica. Sin embargo, es muy probable que los alimentadores de los cuerpos mantiformes correspondan a vetas-fallas y que los cuerpos vetiformes puedan formar pequeños “bolsones” o “mantos” de pequeño tamaño como ocurre en mina 21 de Mayo.

Trabajos anteriores no reconocen la presencia de fases de Ag en las minas Coca Cola (Salgado, 2004; Toledo, 2004), sin embargo, Carrillo-Rosúa et al. (2014) menciona la ocurrencia de algunos cristales de stromeyerita. Esto permite inferir que los depósitos estratoligados del sector concentran la plata principalmente en las fases sulfuradas o en las sulfosales de Cu. Sin embargo, la mina 21 de Mayo parece ser un yacimiento anómalo

en cuanto presenta no solo altas concentraciones de Ag en los sulfuros de Cu (bornita y calcosina), pero también minerales y aleaciones de Ag (arquerita?, stromeyerita? y electrum). Otro aspecto que hace de la mina 21 de Mayo particular, es la presencia de Hg y Au formando aleaciones. El Hg también se detectó en bornita y calcosina correspondientes al Evento 3, posiblemente incorporado dentro de la estructura de estos minerales. Tanto el Au como el Hg no han sido reportados por ningún autor dentro de los estratoligados Cu-(Ag) del distrito Talcuna. Sin embargo, el Hg ha sido reportado en la mineralización argentífera del distrito Arqueros (Cucurella et al., 2015).

#### 4.7 GÉNESIS DE LA MINA 21 DE MAYO

En base a los nuevos antecedentes obtenidos de este estudio, se puede concluir que la mina 21 de Mayo no corresponde a un yacimiento estratoligado Cu-(Ag) típico, pero comparte características con este tipo de yacimientos. En particular, la mina 21 de Mayo presenta una mineralización de cobre dominada por calcopirita, bornita y calcosina con textura de intercrecimiento mirmequítico como la descrita en otros yacimiento estratoligados (Tristá-Aguilera et al., 2006; Kojima et al., 2009) y altos contenidos de Ag. Sin embargo, los cuerpos de mena son principalmente vetiformes, con escaso a nulo desarrollo de mantos.

En cuanto a su génesis, se propone que el yacimiento se habría formado a partir de fluidos ricos en cobre y en menor medida Ag, elementos metálicos probablemente derivados de la lixiviación de la roca de caja, en un proceso similar al descrito por Maureira (2018) para los depósitos estratoligados de Las Luces y Altamira. En relación con la fuente del azufre, éste tiene un origen a partir de la reducción bacteriana de sulfato marino, evidenciado por los valores altamente negativos del  $\delta^{34}\text{S}$  determinados para bornita.

Por otro lado, estudios recientes realizados en el distrito Arqueros (Cucurella et al., 2015) sugieren que este distrito corresponde a vetas epitermales de Ag del tipo *Five Elemental Veins (Ag-Ni-Co-As-Bi)*, los cuales fueron definidos por Kissin (1992) como vetas hidrotermales con Ag, As o Bi con una sucesión de arseniuros de Ni, Co o Fe con presencia de calcita como ganga principal. Cabe destacar que existe una gran variedad de subtipos de vetas y no siempre se presentan los 5 elementos mencionados, incorporándose a veces otros elementos como el Sb, U, Au, Hg entre otros (Markl et al., 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone que la formación de la mina 21 de Mayo sería el resultado de dos procesos principales (**Figuras 31, 32 y 33**): un evento caracterizado por fluidos ricos en Cu y Ag (Eventos 1 y 2) que generaron los estratoligados de Cu-(Ag) del distrito, seguido de un segundo evento más rico en Ag, de carácter epitermal y que se superpone al primero, generando un enriquecimiento en Ag y precipitación de la mineralogía argentífera (Evento 3). Este segundo evento es también el responsable de la formación de vetas epitermales en el distrito Arqueros. Finalmente, la exhumación produce la oxidación y lixiviación de sulfuros hipógenos generando el Evento 4 de carácter supérgeno.

Cabe notar que la propuesta de Cucurella et al. (2015) para el distrito Arqueros se sustenta sobre la presencia de arquerita y baritina, minerales que se han reportado en

depósitos del tipo *five elemental veins* (Burisch et al., 2017) y que también están presentes en los Eventos 2 y 3 de la mina 21 de Mayo. Otro dato que avala que los fluidos podrían ser hidrotermales del tipo *five elemental veins*, son los valores negativos de isótopos de azufre de las fases sulfuradas en el depósito, los cuales concuerdan con los valores de isótopos de azufre obtenidos por Burisch et al. (2017) en fases sulfuradas de Pb y Ag.

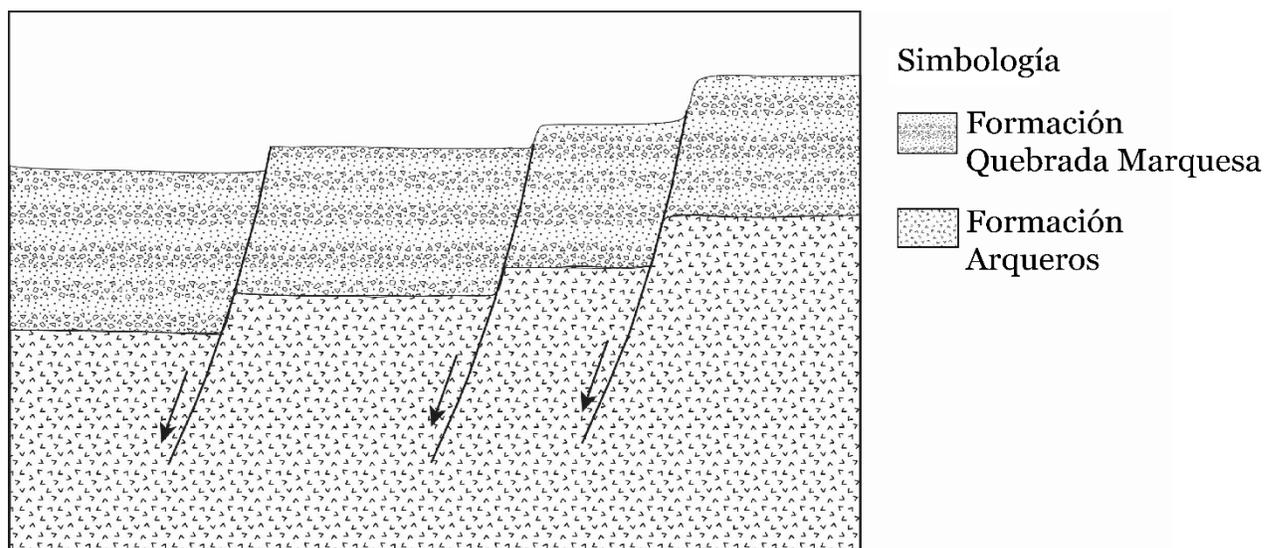


Figura 31 - Modelo genético esquemático para la formación del depósito de la mina 21 de Mayo. Extensión del Cretácico y deformación de Formación Arqueros y Formación Quebrada Marquesa.

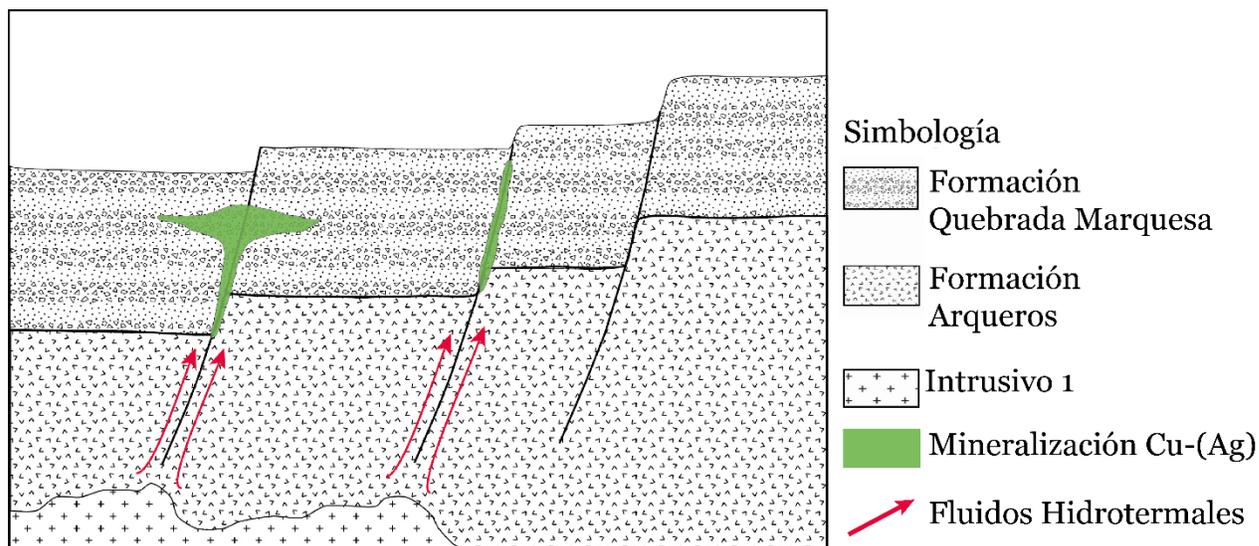


Figura 32 - Modelo genético esquemático para la formación del depósito de la mina 21 de Mayo. Formación de los estratoligados Cu - (Ag).

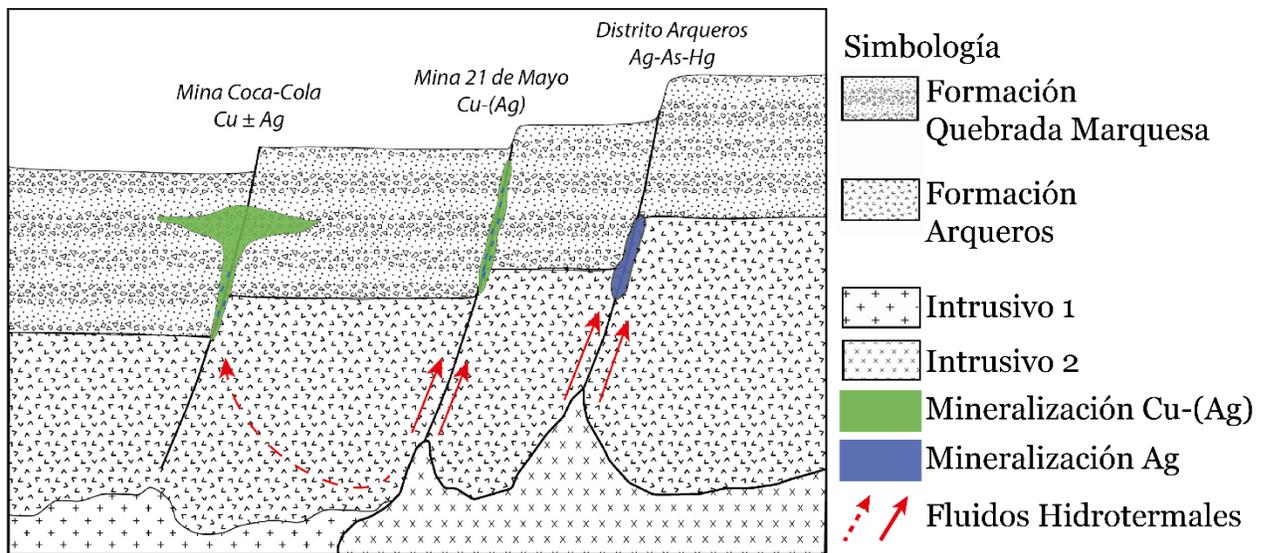


Figura 33 - Modelo genético esquemático para la formación del depósito de la mina 21 de Mayo. Formación de las vetas de Ag del distrito Arqueros y precipitación de minerales de Ag en mina 21 de Mayo.

En cuanto a la temporalidad de la mineralización, esta no ha sido determinada en el distrito Talcuna, pero una datación K-Ar de  $93 \pm 2$  Ma en celadonita asociada a la mineralización sulfurada en el distrito Arqueros permite constreñir la edad del metamorfismo de bajo grado y posiblemente de la mineralización en Arqueros (Morata et al., 2006) y establecer un límite mínimo para la edad de los yacimientos estratoligados de Talcuna.

## 5 CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentan nuevos antecedentes para una mejor comprensión de la génesis del depósito de la mina 21 de Mayo, el cual se ubica en la franja metalogénica del Cretácico de la Cordillera de la Costa del norte de Chile. Este yacimiento se caracteriza por presentar una mineralización de Cu-(Ag) controlada por fallas normales de alto ángulo asociadas a secuencias volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Quebrada Marquesa.

A través de estudios petrográficos, calcográficos y de microscopía electrónica de barrido se logró definir 4 etapas de mineralización/alteración para la formación de la mina 21 de Mayo. El primer evento está caracterizado por la formación de escaso bitumen seguido de la precipitación de pirita euhedral a anhedral, la cual es posteriormente rodeada por abundante calcopirita. El Evento 2 corresponde a la precipitación de tennantita-tetrahedrita en primera instancia, la cual es reemplazada total o parcialmente por bornita y calcopirita. Este evento se acompaña además de escasa galena. El tercer evento corresponde al evento principal de Cu-Ag. En etapas tempranas presenta mineralización de bornita, calcosina, galena, fases de Ag (stromeyerita?, arquerita?, domeikita?) y sulfosales de Cu-Ni-Co, mientras que en fases tardías se encuentra bornita y calcosina con textura de intercrecimiento mirmequítico, y calcosina reemplazada por posible stromeyerita. Además, se observa presencia de electrum y sulfuros de Cd (greenockita/hawleita?). El último evento es de carácter supérgeno y se caracteriza por la formación de djurleita/anilita en forma local.

Los estudios de isótopos estables de azufre indican un origen biogénico para este elemento en la mineralización sulfurada de la mina 21 de Mayo, evidenciado por los valores de  $\delta^{34}\text{S}$  extremadamente negativos.

Las elevadas leyes de plata reportadas para el yacimiento se explican por la precipitación de minerales de plata, posiblemente arquerita y stromeyerita. Adicionalmente, la elevada concentración de Ag en bornita y calcosina permiten sugerir que la plata se incorpora preferentemente en la calcosina, seguida por la bornita en solución sólida o como nanoinclusiones “invisibles”. Por otra parte, si la concentración de Ag en calcosina es excedida ésta genera microinclusiones y reemplazos parciales o totales de stromeyerita, situación que no ocurre en bornita.

Por último, el aumento en las leyes de Ag en la mina 21 de Mayo y su cercanía al distrito de argentífero de Arqueros sugieren una superposición de fluidos epitermales ricos en Ag por sobre el sistema hidrotermal de Cu-(Ag) que dio origen a los depósitos estratoligados del distrito Talcuna.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, L.; Egert, E. 1965. Cuadrángulo Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 15. 92 p., mapa 1:50.000.
- Alvear, M., 2009. Distribución, límites de incorporación y especiación de la Ag en sulfuros en depósitos de Cu de la Cordillera de la Costa del norte de Chile, región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 95 pp.
- Boric, R. 1985. Geología y yacimientos metálicos del distrito de Talcuna, IV región de Coquimbo. Revista Geológica de Chile No. 25-26, p. 57-75.
- Boric, R.; Holmgren, C.; Wilson, N.; Zentilli, M, 2002. The geology of the El Soldado manto type Cu (Ag) deposit, Central Chile. In: Hydrothermal iron oxide copper-gold y related deposits: a global perspective 2:163-184.
- Boyle, R., 1968. The geochemistry of silver and its deposits. Bulletin Geological Survey Canada. 160, 264 p.
- Burisch M.; Gerdes A.; Walter B.; Neumann U.; Fettel M., Markl G., 2017. Methane and the origin of five-element veins: Mineralogy, age, fluid inclusion chemistry and ore forming processes in the Odenwald, SW Germany. Ore Geology Reviews 81: 42–61
- Camus, F., 1986. Yacimientos estratoligados de Cu, Pb-Zn y Ag de Chile: In: Frutos, R Oyarzún, M Pincheira (eds.) Geología y Recursos Minerales de Chile, pp: 547-635. Editorial Universidad de Concepción. Concepción.
- Camus, F., 1990. Geological Characteristics of Stratabound Deposits Associated with Lacustrine Sediments, Central Chile. In Fontboté L, Amstutz G, Cardozo M, Cedillo E y J Frutos (eds.) Stratabound Ore Deposit in the Andes. Special Publication N°8 of the Society For Geology Applied to Mineral Deposit. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; pp: 449-462.
- Carrillo-Rosúa, J.; Morales-Ruano, S.; Morata, D.; Boyce, A.; Fallick, A.; Belmar, M.; Munizaga, F.; Fenoll Hach-Alí, P., 2006. Mineralogía e isótopos estables en depósitos de Cu-(Ag) estratoligados tipo manto del cretácico inferior de la Cordillera de la Costa (área de La Serena y Melipilla), Actas XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta Vol. 2: 199-202.
- Carrillo-Rosúa, J.; Boyce, A.; Morales-Ruano, S.; Morata, D.; Roberts, S.; Munizaga, F.; Moreno-Rodríguez, V., 2014. Extremely negative and inhomogeneous sulfur isotope signatures in Cretaceous Chilean Manto-type Cu-(Ag) deposits, Coastal Range of central Chile. Ore Geology Reviews 56:13-24.

- Charrier, R.; Pinto L.; Pía Rodríguez, M., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In Moreno, T. y Gibbons, W. (eds.) *The Geology of Chile*. The Geological Society, 21-114.
- Cisternas, M.; Hermosilla, J., 2006. The role of bitumen in strata-bound copper deposit formation in the Copiapo area, Northern Chile. *Mineralum Deposita* 41:339-355.
- Cucurella, J.; Canut de Bon, C.; Cisternas M.E., 2005. Pyrobitumen related to silver-copper deposits in a cretaceous volcanic-sedimentary sequence: Talcuna District, Coquimbo, Chile. *Mineralogia Polonica* 36:21-30.
- Cucurella, J.; Canut de Bon, C.; Flores, I.; Moreno, A.; Toledo, A.; Paulo, A.; Piekzca, A., 2006. Nuevos Antecedente Mineralógicos y Geoquímicas de la mena sulfurada del Distrito de Talcuna. In Congreso Geológico Chileno No.11, Actas 2: 227-230. Antofagasta.
- Cucurella, J.; Gerding, J.; Flores, I., 2015. Distrito de Arqueros. Una revisión de su mineralogía argentífera. In Congreso Geológico Chileno No.14, Actas. La Serena.
- Emparan, C.; Pineda, G., 1999. Área Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, N°12, 1 mapa escala 1:100.000, 1 anexo, Santiago.
- Emparan, C.; Pineda, G. 2000. Área La Serena-La Higuera, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 18, escala 1:100.000.
- Kamono, H.; Boric, R., 1982. Inventario Polimetálico y estudio geológico, distrito minero de Talcuna. SERNAGEOMIN, Santiago de Chile; 144 p.
- Kissin, S., 1992. Five-element (Ni-Co-As-Ag-Bi) veins. *Geoscience Canada* N°19 (3).
- Klohn, E.; Holmgren, C.; Ruge, H., 1990. El Soldado, a strata-bound copper deposit associated with alkaline volcanism in the central Chilean Coastal Range. In Fontboté, L., Amstutz, G.C., Cardozo, M., Cedillo, E., and Frutos, J., eds., *Strata-bound ore deposits in the Andes*: Berlin, Springer-Verlag, p. 435-448.
- Kojima, S.; Tristá-Aguilera, D.; Hayashi, K., 2009. Genetic aspects of the Manto-type copper deposits based on geochemical studies of north Chilean deposits. *Resource Geology*. 59: 87-98.
- Maksaev, V.; Zentilli, M., 2002. Chilean strata-bound Cu-(Ag) deposits: An Overview. In - Porter, T.M. (eds.) - *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, Australian Mineral Foundation, Volume 2; PGC Publishing, Adelaide, Australia, pp. 185-205.
- Markl, G.; Burisch, M.; Neumann, U., 2016. Natural fracking and the genesis of five element veins. *Mineralum Deposita* 51, 703-712.

- Márquez, A.; Oyarzún, R.; Ortega, L., 1996. Utilización de imágenes SIR-C en el estudio de lineamientos en las unidades volcánicas Cretácicas y Terciarias de la Región de Coquimbo (Chile): el sector de Quebrada Marquesa. *Geogaceta*. 19: 146-149.
- Maureira, I., 2018. Estudio comparativo entre los depósitos Altamira y Las Luces, Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta: Implicancias para el origen de los depósitos estratoligados de Cu – (Ag). Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 106 pp.
- Morata D.; Aguirre L., 2003. Extensional Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range (29°20' – 30°S), Chile: geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Science* 16: 459-476.
- Morata, D.; Belmar, M.; Pérez de Arce, C.; Arancibia, G., Morales, S.; Carrillo-Rosúa, J., 2006. V South American Symposium of Isotope Geology, 25-28.
- Moreno, A., 2001. Geología del yacimiento 21 de Mayo, Talcuna, Cuarta Región. Informe Inédito, Compañía Minera San Gerónimo, Coquimbo, 81 p.
- Oyarzún, R.; Ortega, L.; Sierra, J.; Lunar, R.; Oyarzún, J., 1998. Cu, Mn and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita* 33: 547-559.
- Peebles, F., 1966. Estudio geológico del distrito cuprífero de Talcuna. Instituto de Investigaciones Geológicas. Publicación especial. Santiago; 100 p.
- Pineda, G.; Emparan, C., 1997. Nuevos antecedentes de la estratigrafía y geocronología cretácica del norte del río Elqui: Evidencias de Tectónica extensional. In VIII Congreso Geológico Chileno. Vol I, Antofagasta, pp: 215-219.
- Reich, M.; Chryssoulis, S.L.; Deditius, A.; Palacios, C.; Zúñiga, A.; Weldt, M.; Alvear, M., 2010. “Invisible” silver and gold in supergene digenite (Cu 1.8 S). *Geochimica Cosmochimica Acta* 74:6157-6173.
- Reich, M.; Palacios, C.; Barra, F.; Chryssoulis, S., 2013. “Invisible” silver in chalcopyrite and bornite from the Mantos Blancos Cu deposit, northern Chile. *European Journal of Mineralogy*. 25:453-460.
- Romero. M.; 2008; Caracterización litogeoquímica del distrito minero Talcuna, IV Región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 89 pp.
- Salgado, C. 2004. El sistema estructural de los yacimientos del Distrito Minero de Talcuna, Provincia del Elqui, IV región de Coquimbo. Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Concepción. Chile 92 pp.
- Santana, C. 2017. Estudio de mineralogía-alteración e inclusiones fluidas en distrito de Talcuna y Arqueros región de Coquimbo, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Concepción. Chile 100 pp.

- Saric, N.; Kreft, C.; Huete, C.; 2003. Geología del yacimiento Lo Aguirre, Chile. In: *Andean Geology* 30: 317-331.
- Scheuber, E.; Bogdanic T.; Jensen A.; Reutter KJ. 1994. Tectonic Development of the North Chilean Andes in Relation to Plate Convergence and Magmatism since the Jurassic. *Tectonics of the Southern Central Andes*, 121-139.
- Scheuber, E.; González, G. 1999. Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°-26°S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics* 18 (5), 895-910.
- Spiro, B.; Puig, A., 1988. The source of sulphur in polymetallic deposits in the Cretaceous magmatic arc, Chilean Andes. *Journal South America Earth Science* 1:261-266.
- Toledo, A. 2004. Modelo Geológico-Estructural, con aplicación a la actividad minera, en las Minas Coca Cola I y II. Distrito Minero de Talcuna. IV Región de Coquimbo. Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Concepción. Chile 123 pp.
- Tristá-Aguilera, D.; Barra, F.; Ruíz J.; Morata, D.; Talavera-Mendoza, O.; Kojima, S.; Ferraris, F., 2006. Re-Os isotope systematics for the Lince-Estefanía deposit: constraints on the timing and source of copper mineralization in a stratabound copper deposit, Coastal Cordillera of Northern Chile. *Mineralum Deposita* 41:99-105.
- Villalobos, H., 1995. Antecedentes para un modelo genético del yacimiento Veta Negra y su relación con el yacimiento de cobre El Soldado (Unpublished Graduate Thesis). University Concepción, Concepción, Chile.
- Wilson, N., Zentilli, M. 1999. The role of organic matter in the genesis of the El Soldado volcanic-hosted manto-type Cu deposit, Chile. *Economic Geology* 94:1115-1135.
- Wilson, N.; Zentilli, M.; Spiro, B., 2003. A sulfur, carbon, oxygen, and strontium isotope study of the volcanic-hosted El Soldado manto-type copper deposit, Chile: the essential role of bacteria and petroleum. *Economic Geology* 98:163-174.
- Zentilli, M.; Munizaga, F.; Graves, M.; Boric, R.; Wilson, N.; Mukhopadhyay, P.; Snowdon, L., 1997. Hydrocarbon involvement in the genesis of ore deposits: an example in Cretaceous stratabound (Manto-Type) copper deposits of central Chile. *Int Geol Rev* 39:1-21.

## ANEXOS

### Anexo A: Descripciones petrográficas.

En el siguiente Anexo se presentan las descripciones petrográficas y calcográficas de las 55 muestras estudiadas. Se indica nombre de la muestra, su mineralización y su ubicación en las vetas de la mina 21 de Mayo. Las Tablas 7 y 8 contienen la información de las muestras con mineralización, por otro lado, las Tablas 9 y 10 contienen las descripciones de los cortes de las rocas hospedantes.

Tabla 7 - Resumen descripciones petrográficas y calcográficas de los cortes con mineralización.

Muestra	Mineralogía		Litología	Ubicación
	Mineralización Metálica y Bitumen	Mineralogía primaria y de alteración		
21E-1126-1	Bn-Cpy-Hm	Pl-Ox.Fe-Pmp-Ceo-(Ep)-Ser-Cal	Veta de calcita y sulfuros de Cu en andesita amigdaloidal	Veta Daniela
PG-69-1	Bn-Cc-Hm-Gn	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros-sulfosales de Cu	Veta Claudia-Mariela
PG-65-1	Cpy-Tn-Tr-Gn	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros-sulfosales de Cu	Veta Valeska
PG-65-2	Bn-Cc-Tn-Cpy	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros-sulfosales de Cu	Veta Valeska
PG-43-1	Bit-Cc-Gn-Arq	Cal	Veta de bitumen y sulfuros de Cu en arenisca	Miembro 2
21E-485-1	Py-Cpy-Tn	Cal-(Bar)	Veta de calcita y sulfuros-sulfosales de Cu	Veta Daniela
21E-486-1	Bn-Cpy-Hm-Gn	Cal	Veta de calcita y sulfuros de Cu	Veta Daniela
21E-602-1	Bn-Cpy-Cc	Cal	Veta de calcita y sulfuros de Cu	Veta Fabiola
21E-603-1	Py-Cpy	Cal-(Ser)	Veta de calcita y sulfuros de Cu-Fe en grauvaca feldespática	Veta Fabiola
21E-609-1	Bit-Py-Cpy-Tn	Cal	Veta de calcita y sulfuros-sulfosales de Cu	Veta Claudia-Mariela
21E-641-1	Cpy-Bn-(Cc)-Djur-Gn	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Claudia-Mariela
21E-826-1	Bn-Cc-Arq	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Josefina
21E-826-3	Bn-(Cpy)-(Cc)-Hm-Gn-(Arq)	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Josefina
21E-1067-1	Bn-Cpy-Cc-Arq	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Valeska

Tabla 8 - Continuación Tabla 7 con descripción petrográfica y calcográfica de los cortes con mineralización.

21E-1068-1	Bn-Cc-Arq	Cal-Car	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Valeska
21E-333-1	Bn-Cpy-Cc-Arq-Hm	Pl-Pmp-Ox. Fe-Cal-Bar-Ser	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu en andesita	Veta Daniela
21E-415-1	Bn-Cc	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Fabiola
21E-391-1	Tn/Tr-(Gn)-Bn-Cpy-Bit-Djur	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Claudia-Mariela
21E-391-3	Cc-Arq	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Claudia-Mariela
21E-392-1	Bn-Cpy-Cc	Cal-(Bar)	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Claudia-Mariela
21E-611-1	Tn-Cpy-Bn-Gn-Hm	Cal	Veta de calcita y sulfuros - sulfosales de Cu	Veta Jenifer
21E-612-1	Tn-Bn-Cpy-Cc-Hm-Gn	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros - sulfosales de Cu	Veta Jenifer
21E-340-1	Cpy-Py	Cal-(Bar)	Veta de calcita y sulfuros de Cu cortada por vetillas calcita-baritina	Veta Daniela
21E-341-1	Bn-Cpy	Cal-Bar-Pl-Ser-Ox. Fe	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu en andesita	Veta Daniela
21E-455-1	Tn-Cpy-Bn-Cc-Arq	Cal-Bar	Vetas de calcita, calcita-baritina y sulfuros-sulfosales de Cu	Veta Fabiola
21E-455-2	Bn-Cc-Arq	Cal-Bar-Ser	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu en grauvaca feldespática	Veta Fabiola
21E-374-1	Bn-Cc	Cal-Bar	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu	Veta Claudia-Mariela
21E-375-1	Bn-Cc-Cpy-Hm	Cal-Bar-Pl-Cpx	Veta de calcita-baritina y sulfuros de Cu en dique de diorita de clinopiroxeno con textura glomeroporfídica	Veta Claudia-Mariela
21E-833-1	Cpy-Bn	Cal-Pl-Ser-Ox. Fe	Veta de calcita y sulfuros de Cu en andesita amigdaloidal	Veta Dinka
21E-833-2	Cpy-Bn-Cc-Arq	Cal-Bar-Pl-Ser-Ox. Fe	Veta de calcita, calcita-baritina y sulfuros de Cu en andesita amigdaloidal	Veta Dinka
21E-833-3	Cpy-Bn-Cc-Arq	Cal-Bar-Pl-Ser-Ox. Fe	Veta de calcita, calcita-baritina y sulfuros de Cu en andesita amigdaloidal	Veta Dinka
21E-833-4	Cpy	Cal-Ep-Ceo-Pl-Ser-Ox. Fe	Veta de calcita y sulfuros de Cu en andesita amigdaloidal	Veta Dinka
21E-833-5	Tn-Cpy-Bn-Gal-Hm	Cal-Pl-Ser-Ox. Fe	Veta de calcita y sulfuros de Cu en andesita amigdaloidal	Veta Dinka

Abreviaciones: Bn: Bornita, Cpy: Calcopirita, Hm: Hematita, Cc: Calcosina, Gn: Galena, Tn: Tennantita, Tr: Tetraedrita, Arq: Arquerita, Py: Piritita, Bit: Bitumen, Djur: Djurleita, Pl: Plagioclasa, Ox. Fe: Óxidos de Hierro, Pmp: Pumpellyita, Ceo: Ceolitas, Ep: Epidota, Ser: Sericita, Cal: Calcita, Bar: Baritina, Cpx: Clinopiroxeno.

Tabla 9 - Descripciones petrográficas de las rocas hospedantes.

Muestra	Mineralogía primaria y de alteración	Clastos	Litología	Ubicación
21E-1126-2	Pl-Ox.Fe-Pmp-Ceo-Chl-Ser	No presenta	Andesita amigdaloidal	Veta Daniela
PG-69-2	Ser - Ox. Fe - Px	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de hematita	Grauvaca feldespática	Veta Claudia-Mariela
PG-65-3	Ser - Ox. Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de hematita	Grauvaca feldespática	Veta Valeska
PG-43-2	Ser - Ox. Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de hematita	Grauvaca feldespática	Miembro 2
PG-43-3	Ser - Ox. Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de hematita	Grauvaca feldespática	Miembro 2
PG-43-4	Pl-Ser-(Bt)-(Ep)-Cal-Ox.Fe	No presenta	Diorita de biotita	Miembro 2
21E-602	Chl-Ceo-Cal-Pmp-(Ser)	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita amigdaloidal, matriz de arcillas y cemento de hematita	Grauvaca feldespática	Veta Fabiola
21E-603-2	Pmp-Chl-(Ser)	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de hematita	Grauvaca feldespática	Veta Fabiola
21E-609-2	Cal-(Ser)-Ox. Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita amigdaloidal, matriz de arcillas y cemento de hematita y calcita	Grauvaca feldespática	Veta Claudia-Mariela
21E-641-2	Cal-(Ser)-Ox.Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita amigdaloidal, matriz de arcillas y cemento de calcita	Grauvaca feldespática	Veta Claudia-Mariela
21E-826-2	Pl-Ox. Fe-Ser-Ceo-Pmp-Cal	No presenta	Andesita amigdaloidal	Veta Josefina
21E-826-4	Ser-Ox. Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de hematita	Grauvaca feldespática	Veta Josefina
21E-1067-2	Cal-Ser-Ox. Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de calcita	Grauvaca feldespática	Veta Valeska

Tabla 10 - Continuación Tabla 9 descripciones petrográficas de rocas hospedantes.

21E-1068-2	Cal-Ox. Fe-Ser	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de calcita	Grauvaca feldespática	Veta Valeska
21E-333-2	Pl-Ser-Chl-Ox. Fe-Cal	No presenta	Andesita	Veta Daniela
21E-415-2	Pl-Cpx-Ceo-Prh-Ox. Fe	No presenta	Andesita de clinopiroxeno	Veta Fabiola.
21E-391-2	Pl-Ser-Chl-Ox. Fe-Cal	No presenta	Andesita	Veta Claudia-Mariela
21E-611-2	Pl-Ser-Pmp-Ox. Fe-Cal	No presenta	Andesita	Veta Jenifer
21E-341-2	Pl-Ser-Pmp-Ox. Fe-Cal	No presenta	Andesita	Veta Daniela
21E-455-3	Pl-Ser-Ox. Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de hematita	Grauvaca feldespática	Veta Fabiola
21E-374-2	Pl-Ser-Ox. Fe	Cristales de plagioclasa, fragmentos líticos de andesita, matriz de arcillas y cemento de hematita y calcita	Grauvaca feldespática	Veta Claudia-Mariela
21E-375-2	Pl-Ser-Pmp-Ox. Fe-Cal	No presenta	Andesita	Veta Claudia-Mariela

Abreviaciones: Pl: Plagioclasa, Ox.Fe: Óxidos de Hierro, Pmp: Pumpellyita, Ceo: Ceolitas, Chl: Clorita, Ser: Sericita, Px: Piroxeno, Ep: Epidota, Bt: Biotita, Cal: Calcita.

## Anexo B: Microscopio electrónico de barrido (SEM).

En el siguiente anexo se presentarán los espectros de dispersión de que fueron de interés para este estudio.

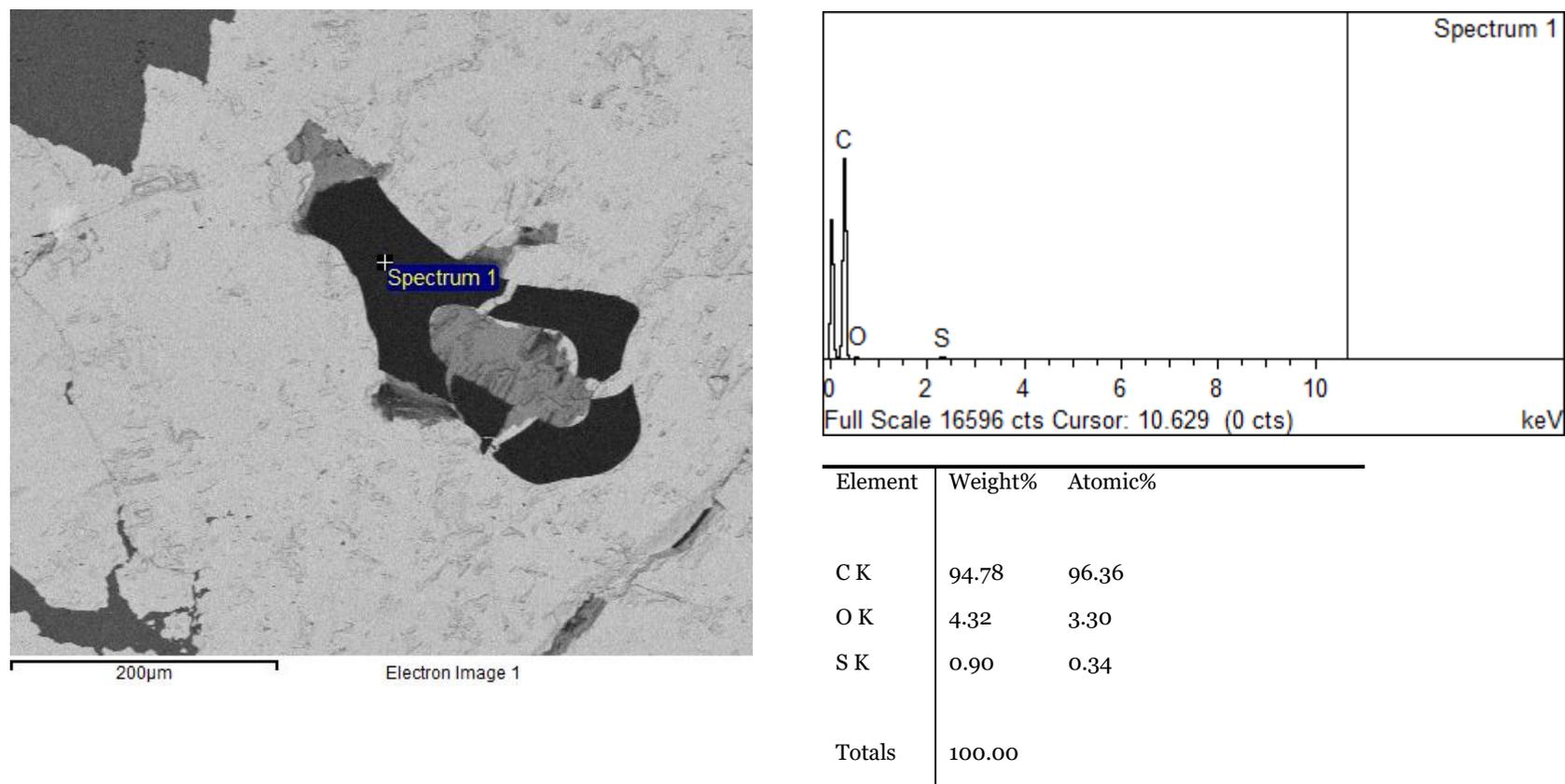
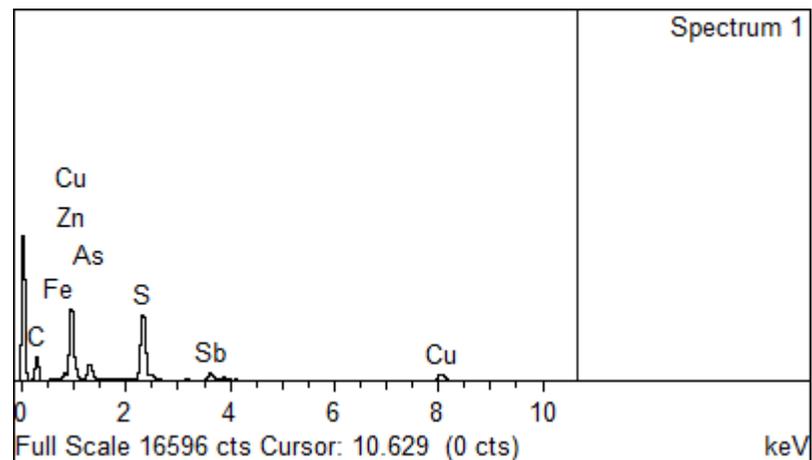
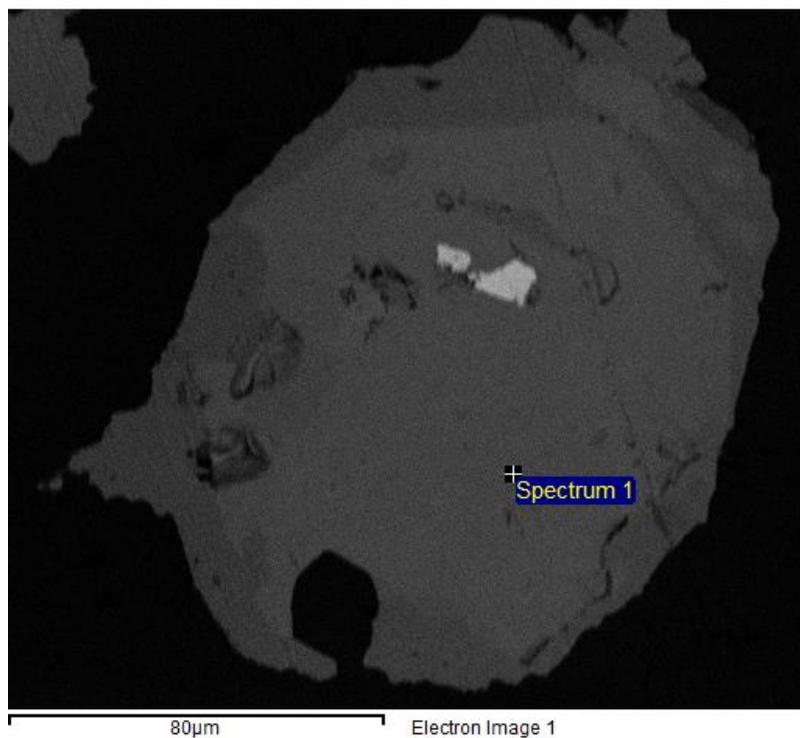
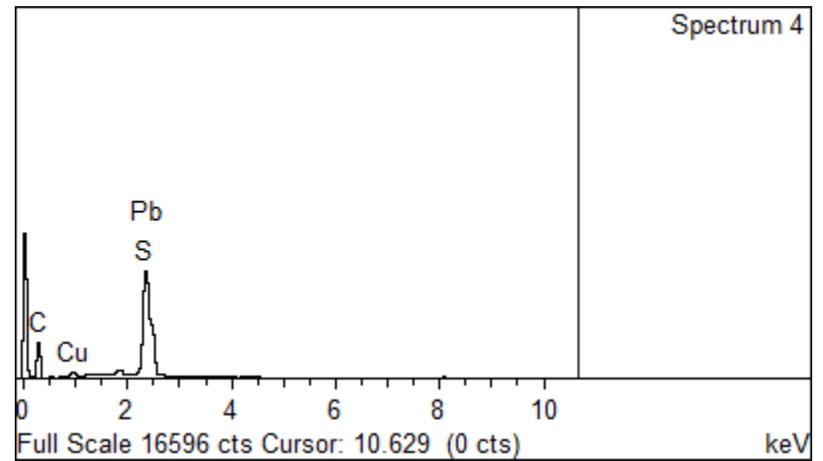
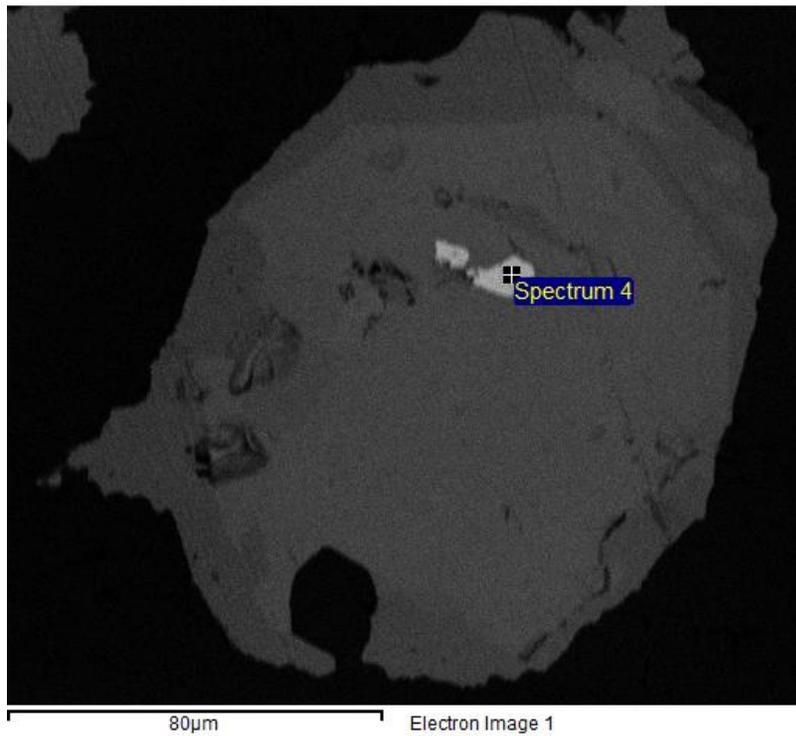


Figura 34 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para bitumen del Evento 1.



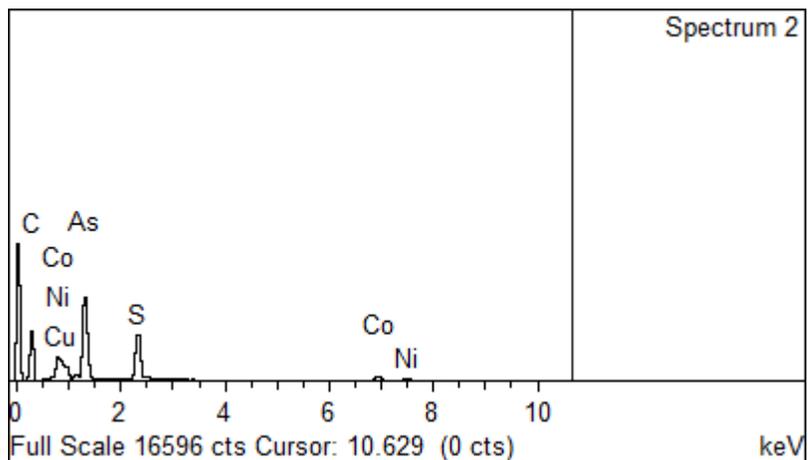
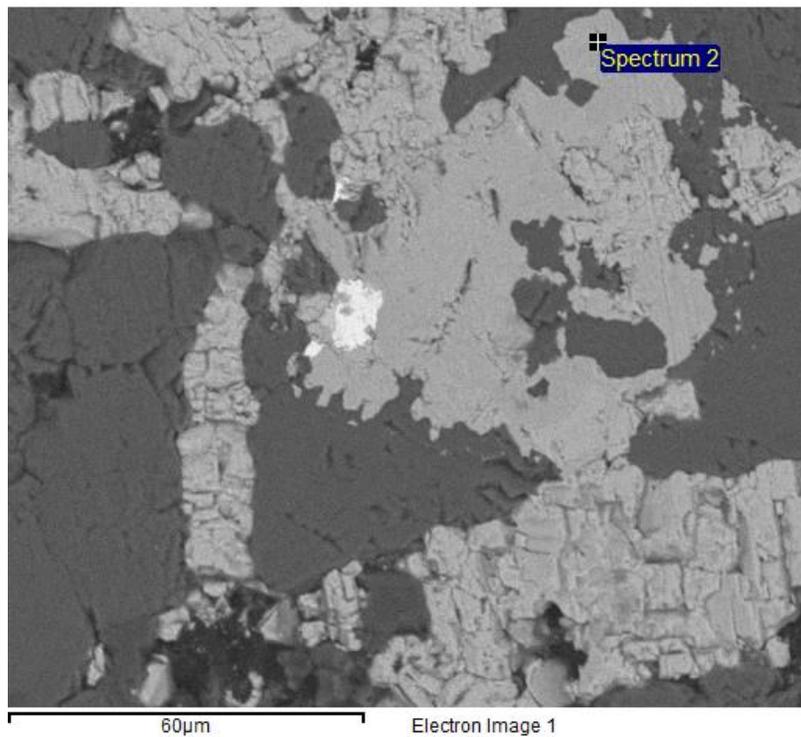
Element	Weight%	Atomic%
S K	25.11	42.26
Fe K	0.68	0.65
Cu L	43.92	37.31
Zn L	8.16	6.74
As L	11.67	8.41
Sb L	10.46	4.64
Totals	100.00	

Figura 35 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para solución sólida tennantita – tetraedrita.



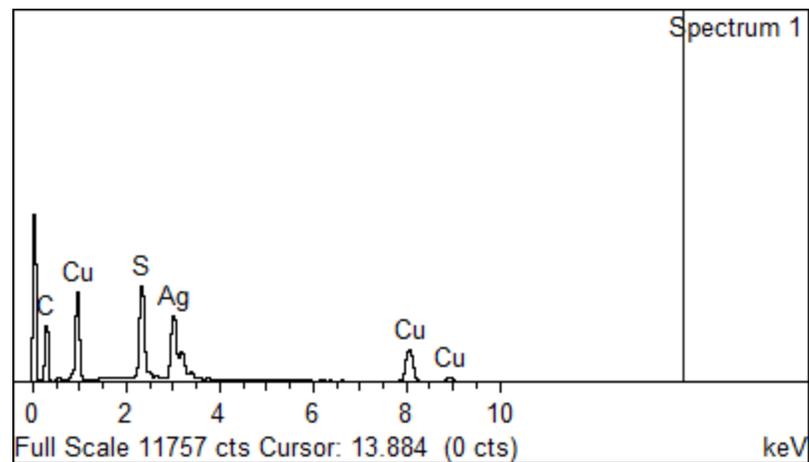
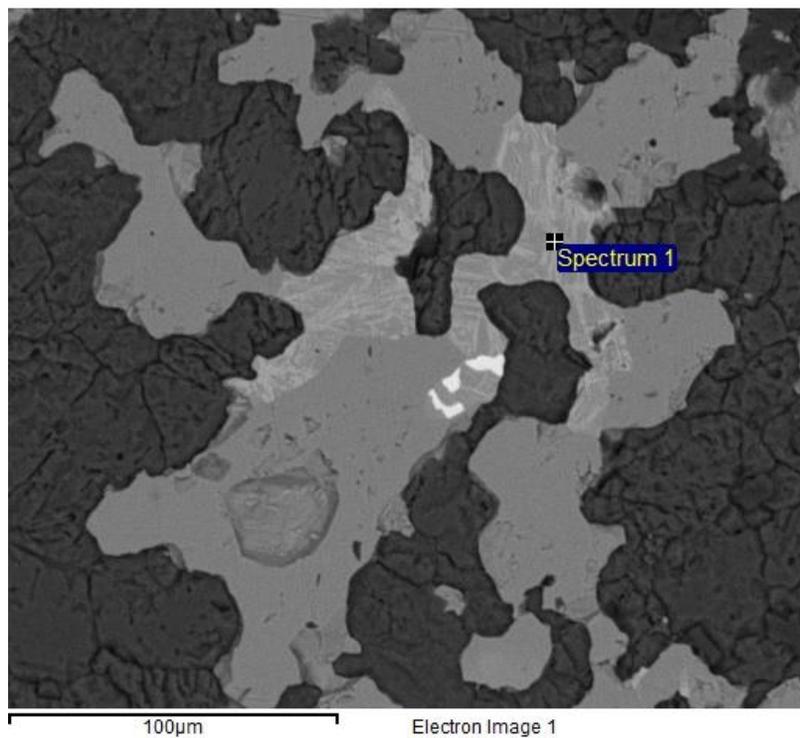
Element	Weight%	Atomic%
S K	14.83	50.36
Cu L	4.10	7.03
Pb M	81.08	42.62
Totals	100.00	

Figura 36 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para galena.



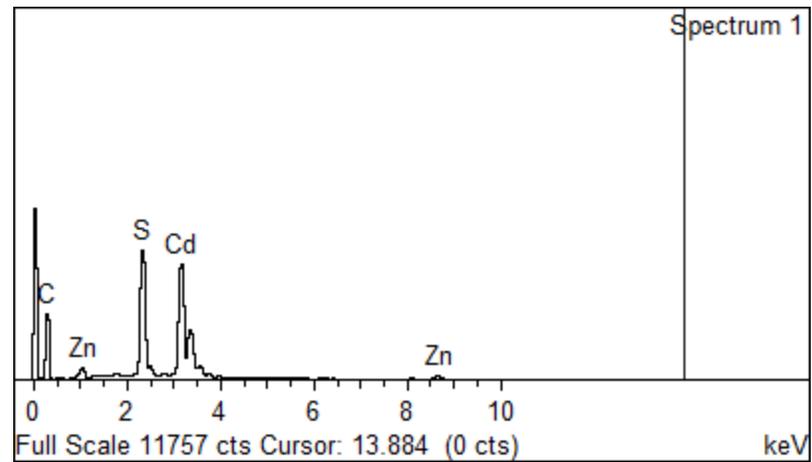
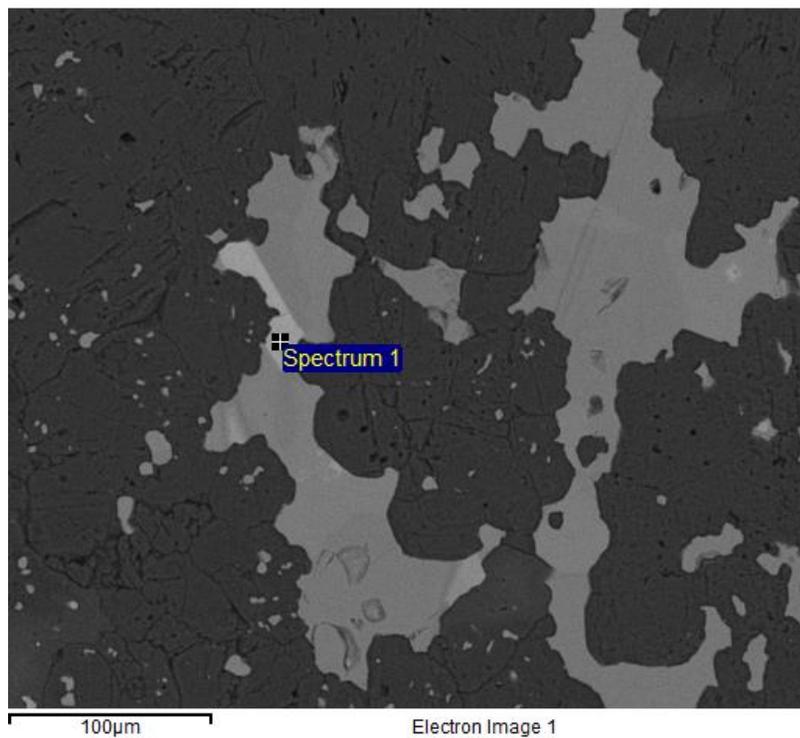
Element	Weight%	Atomic%
S K	20.45	35.26
Co K	14.19	13.31
Ni K	8.58	8.08
Cu L	11.18	9.73
As L	45.60	33.64
Totals	100.00	

Figura 37 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para sulfosal de Cu-Ni-Co.



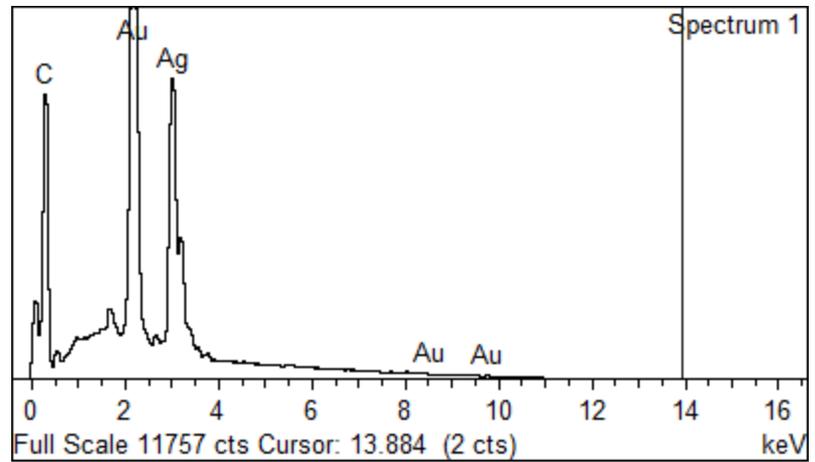
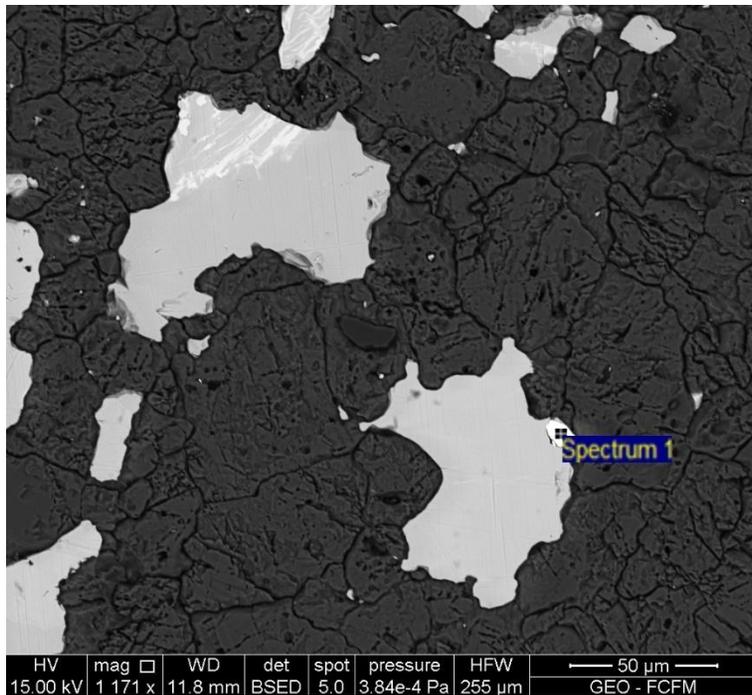
Element	Weight%	Atomic%
S K	19.52	37.56
Cu K	41.10	39.91
Ag L	39.39	22.53
Totals	100.00	

Figura 38 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para calcosina reemplazada por stromeyerita.



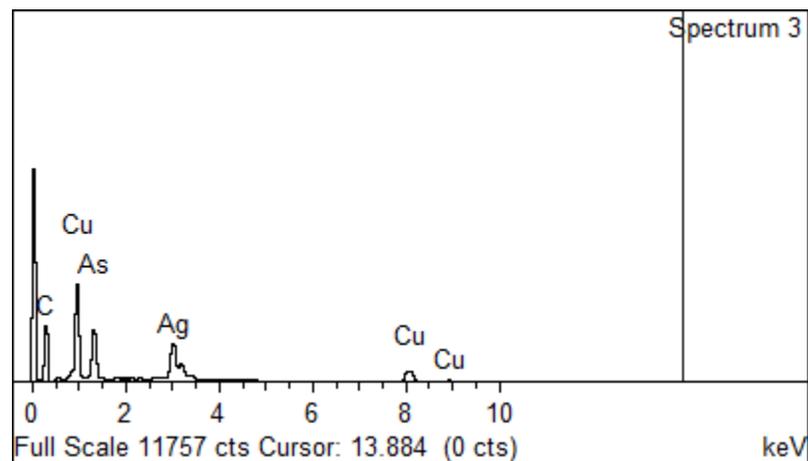
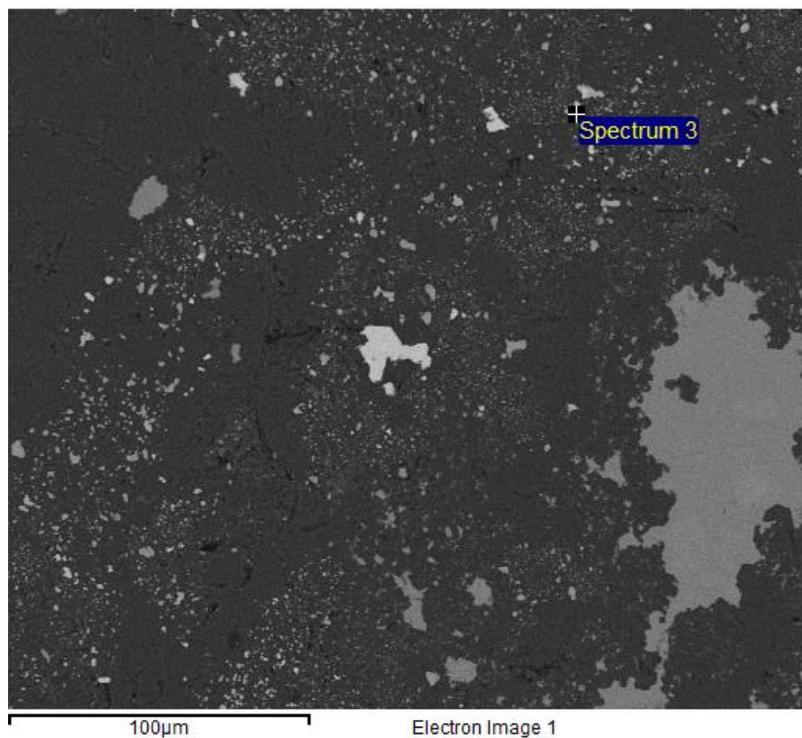
Element	Weight%	Atomic%
S K	24.35	51.85
Zn K	5.02	5.24
Cd L	70.64	42.91
Totals	100.00	

Figura 39 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para greenockita/hawleita.



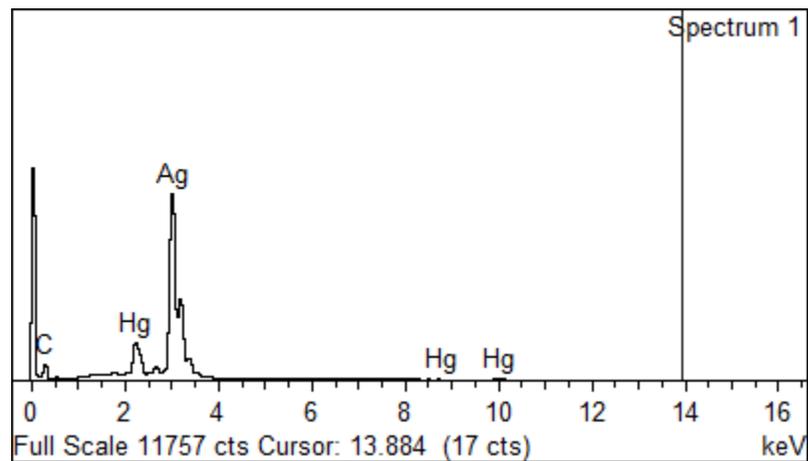
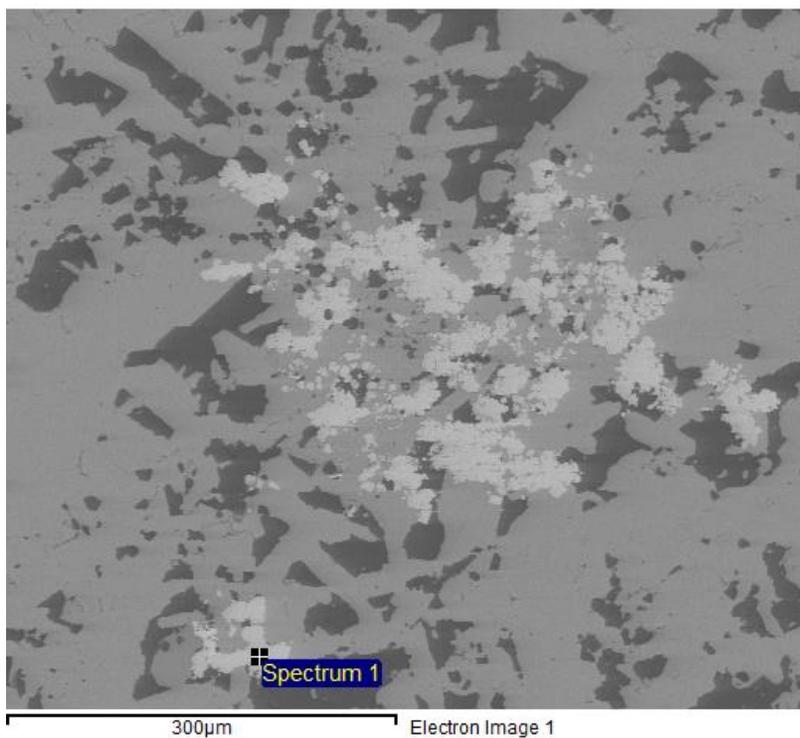
Element	Weight%	Atomic%
Ag L	47.62	62.40
Au M	52.38	37.60
Totals	100.00	

Figura 40 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para electrum.



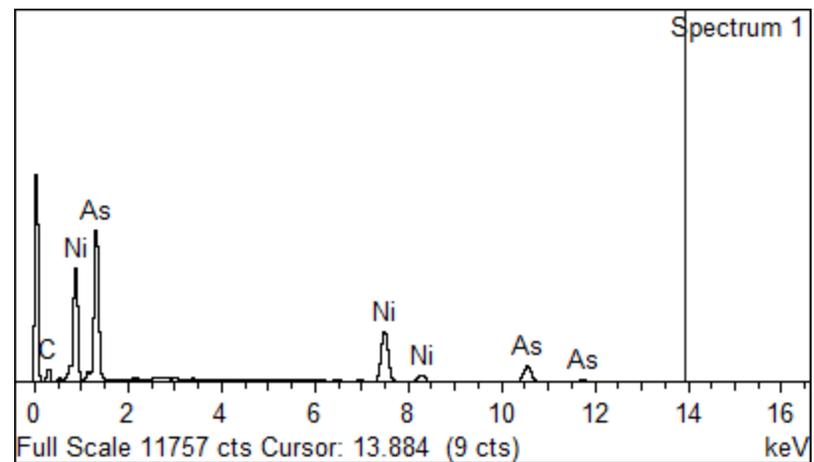
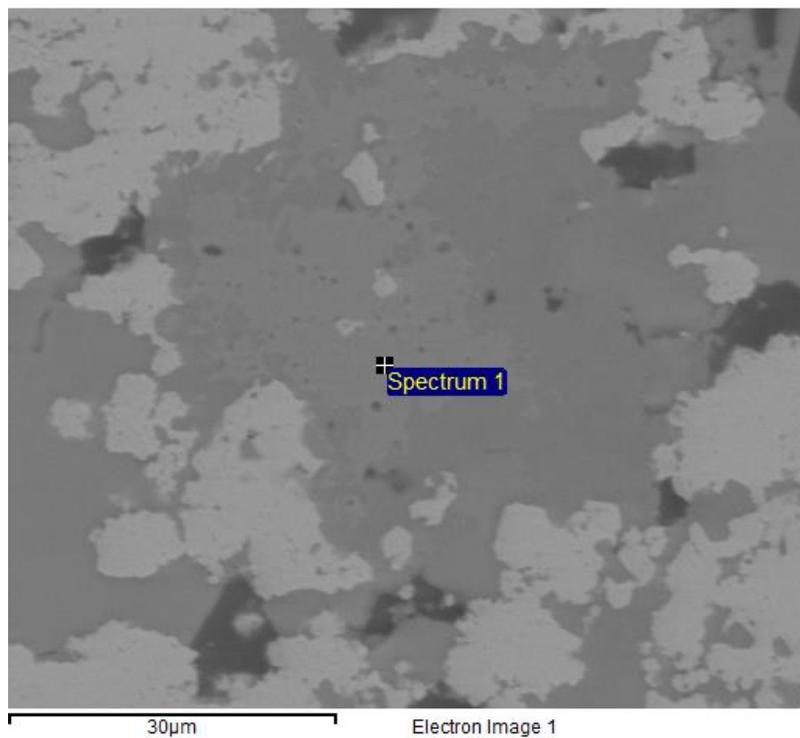
Element	Weight%	Atomic%
Cu L	46.41	54.97
As L	24.94	25.05
Ag L	28.64	19.98
Totals	100.00	

Figura 41 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para argentodomeikita.



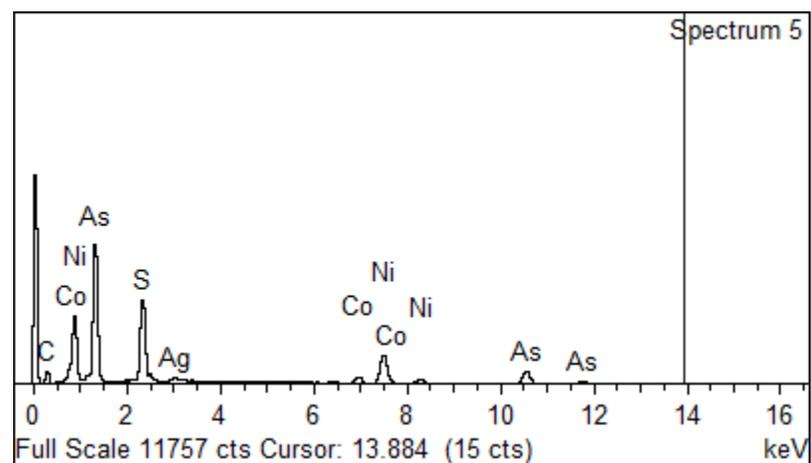
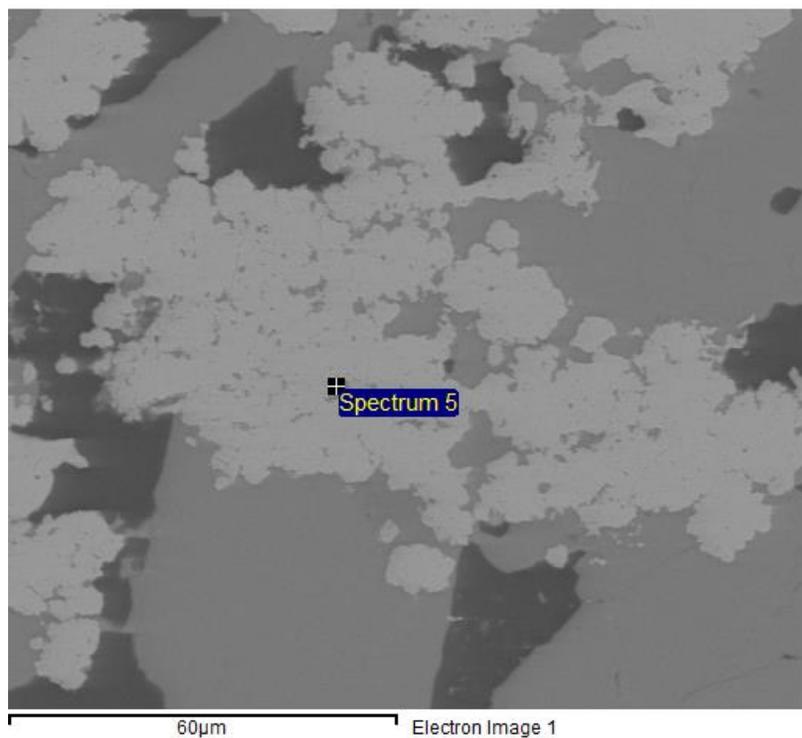
Element	Weight%	Atomic%
Ag L	84.05	90.74
Hg M	15.95	9.26
Totals	100.00	

Figura 42 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para arquerita.



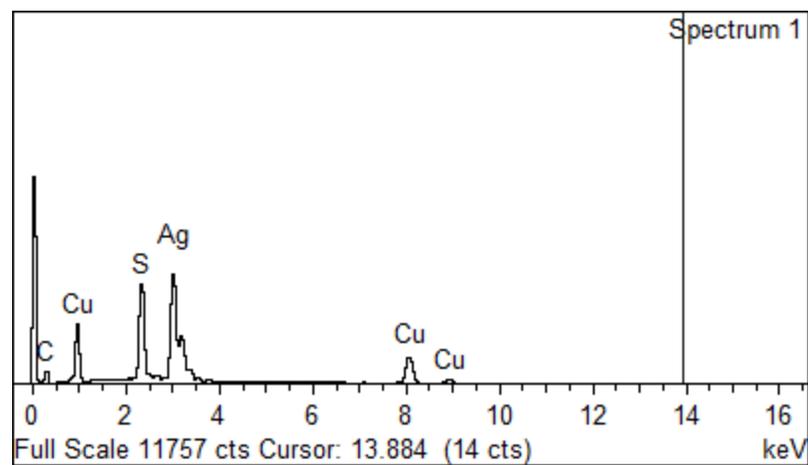
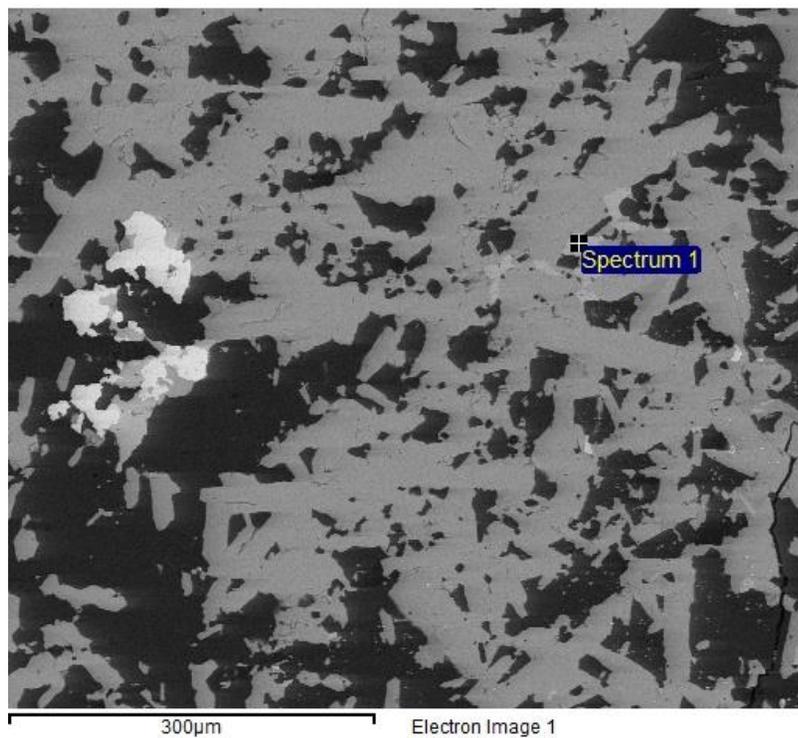
Element	Weight%	Atomic%
Ni K	41.62	47.64
As L	58.38	52.36
Totals	100.00	

Figura 43 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para niquelina.



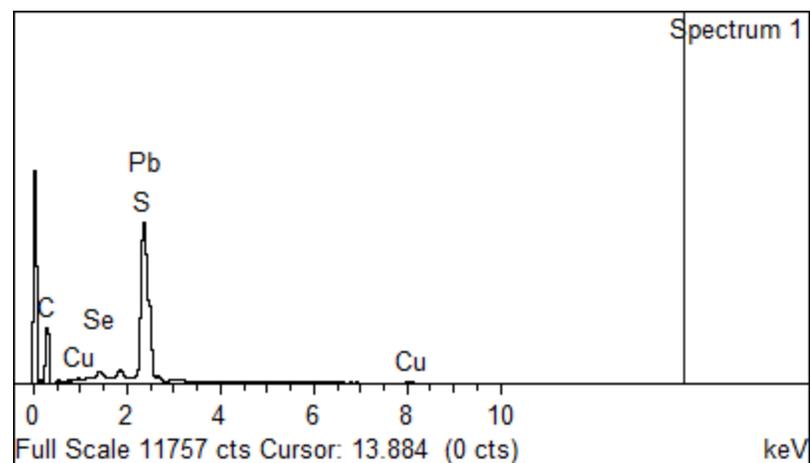
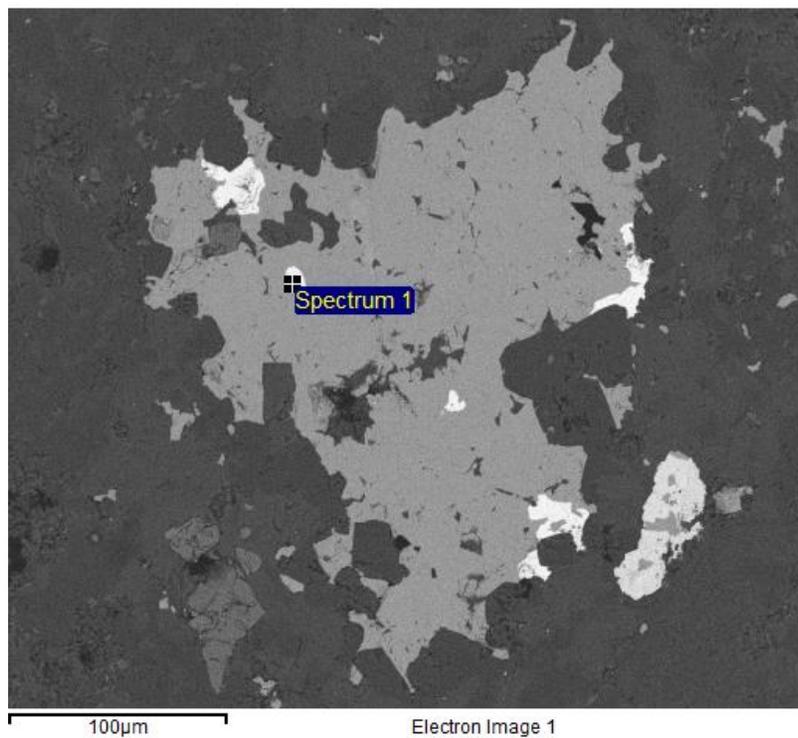
Element	Weight%	Atomic%
S K	19.33	33.85
Co K	4.67	4.45
Ni K	25.41	24.29
As L	48.42	36.28
Ag L	2.17	1.13
Totals	100.00	

Figura 44 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para sulfosal Co-Ni en arquerita.



Element	Weight%	Atomic%
S K	17.10	35.94
Cu K	28.19	29.89
Ag L	54.71	34.17
Totals	100.00	

Figura 45 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para stromeyerita.



Element	Weight%	Atomic%
S K	13.40	48.23
Cu L	0.99	1.79
Se L	2.56	3.74
Pb M	83.05	46.25
Totals	100.00	

Figura 46 - Imagen BSE, espectro de dispersión de rayos X y resultado semi cuantitativo del análisis elemental para galena con Se y Cu.

## ANEXO C: Análisis químicos de fases sulfuradas obtenidos mediante microsonda electrónica.

En el siguiente anexo se muestra la concentración de elementos mayores y menores (Tabla 12 y Tabla 13) obtenidos mediante microsonda electrónica de los puntos analizados en la muestra 21E-1067-1 en % en peso.

Las tablas de elementos incluyen el mineral que fue medido. Además, las casillas que contienen un signo “b.d.” en las tablas de elementos, indica que el valor está bajo el límite de detección. Además, se incorpora en la Tabla 11 el estándar usado para calcosina y para bornita.

Tabla 11 - Condiciones EMPA en calcosina y bornita.

Calcosina			Bornita		
Elemento (X-ray line)	Estándar	Cristal	Elemento (X-ray line)	Estándar	Cristal
Hg (M $\alpha$ )	Coloradoíta	PETJ	Hg (M $\alpha$ )	Coloradoíta	PETJ
Te (L $\alpha$ )	Coloradoíta	PETJ	Te (L $\alpha$ )	Coloradoíta	PETJ
Se (L $\alpha$ )	NiSe	TAP	Se (L $\alpha$ )	NiSe	TAP
Bi (M $\alpha$ )	Bismutinita	PETJ	Bi (M $\alpha$ )	Bismutinita	PETJ
Au (M $\alpha$ )	Oro	PETJ	Au (M $\alpha$ )	Oro	PETJ
S (K $\alpha$ )	Pirita	PETJ	S (K $\alpha$ )	Calcopirita	PETJ
Fe (K $\alpha$ )	Pirita	LIF	Fe (K $\alpha$ )	Calcopirita	LIF
Co (K $\alpha$ )	Skutterudita	LIF	Co (K $\alpha$ )	Skutterudita	LIF
Zn (K $\alpha$ )	Esfalerita	LIF	Zn (K $\alpha$ )	Esfalerita	LIF
As (K $\alpha$ )	Niquelina	LIF	As (K $\alpha$ )	Niquelina	LIF
Ag (L $\alpha$ )	Plata	PETH	Ag (L $\alpha$ )	Plata	PETH
Pb (M $\beta$ )	Galena	PETH	Pb (M $\beta$ )	Galena	PETH
Sb (L $\alpha$ )	Estibina	PETH	Sb (L $\alpha$ )	Estibina	PETH
Cu (K $\alpha$ )	Calcopirita	LIFH	Cu (K $\alpha$ )	Calcopirita	LIFH
Ni (K $\alpha$ )	NiSe	LIFH	Ni (K $\alpha$ )	NiSe	LIFH

Tabla 12 - Análisis químicos de calcosina de la muestra 21E-1067-1. Concentraciones en % en peso.

Mineral	Hg	Te	Se	Bi	Au	S	Fe	Co	Zn	As	Ag	Pb	Sb	Cu	Ni	Total
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	20,26	0,10	b.d.	b.d.	0,02	0,57	0,02	b.d.	78,54	b.d.	99,52
Calcosina	b.d.	0,01	b.d.	b.d.	b.d.	19,66	0,13	b.d.	b.d.	b.d.	0,41	0,02	b.d.	79,36	b.d.	99,60
Calcosina	b.d.	0,01	0,01	b.d.	b.d.	19,95	0,09	0,01	b.d.	0,11	0,42	b.d.	0,01	79,03	b.d.	99,63
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,06	20,10	0,22	0,01	b.d.	0,04	0,56	b.d.	b.d.	78,34	b.d.	99,33
Calcosina	0,03	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	20,06	0,11	0,02	b.d.	0,07	0,56	b.d.	b.d.	77,42	b.d.	98,26
Calcosina	0,07	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	19,66	0,11	b.d.	b.d.	0,05	0,42	b.d.	b.d.	78,81	b.d.	99,12
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,05	19,62	0,26	0,01	b.d.	0,11	0,43	0,06	b.d.	78,93	b.d.	99,47
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	0,09	b.d.	20,17	0,07	b.d.	b.d.	0,02	0,47	0,01	b.d.	78,42	b.d.	99,24
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,02	19,48	0,12	0,01	b.d.	0,08	0,64	b.d.	b.d.	79,05	b.d.	99,40
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,01	19,35	0,17	b.d.	b.d.	0,09	0,80	b.d.	b.d.	79,35	b.d.	99,78
Calcosina	b.d.	b.d.	0,01	b.d.	0,06	19,41	0,38	0,01	b.d.	0,01	0,69	b.d.	b.d.	78,64	b.d.	99,21
Calcosina	0,06	b.d.	0,01	0,02	0,10	19,31	0,29	0,01	b.d.	0,10	0,76	0,04	b.d.	78,38	b.d.	99,06
Calcosina	b.d.	b.d.	0,05	0,11	b.d.	19,74	0,43	b.d.	b.d.	0,01	0,63	0,03	b.d.	78,27	b.d.	99,26
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	0,05	0,08	19,65	0,24	0,01	b.d.	0,03	0,59	0,07	0,01	78,69	b.d.	99,41
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	19,42	0,18	b.d.	b.d.	0,07	0,49	0,03	b.d.	79,47	0,01	99,66
Calcosina	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,06	20,10	0,72	0,03	b.d.	0,05	0,48	b.d.	b.d.	78,19	b.d.	99,65
Calcosina	0,07	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	19,53	0,41	0,01	b.d.	0,04	0,62	b.d.	b.d.	78,29	b.d.	98,96
Calcosina	b.d.	0,03	b.d.	b.d.	b.d.	19,31	0,22	b.d.	b.d.	0,06	0,65	b.d.	b.d.	79,53	b.d.	99,81
Calcosina	0,05	b.d.	b.d.	b.d.	0,13	19,25	0,06	b.d.	b.d.	0,05	0,75	0,05	b.d.	78,86	b.d.	99,21
Calcosina	0,08	b.d.	b.d.	0,09	0,08	19,40	0,19	b.d.	b.d.	0,14	0,72	0,04	b.d.	79,01	b.d.	99,75
Calcosina	b.d.	0,03	0,01	b.d.	0,07	19,92	0,35	b.d.	b.d.	0,09	0,85	b.d.	b.d.	78,86	0,01	100,18
Calcosina	b.d.	0,02	0,04	b.d.	0,06	19,39	0,14	0,01	b.d.	0,03	0,75	b.d.	b.d.	78,82	b.d.	99,27
Calcosina	0,11	b.d.	b.d.	b.d.	0,08	19,29	0,11	0,01	b.d.	0,04	0,71	0,02	b.d.	79,30	b.d.	99,66
Calcosina	0,02	b.d.	b.d.	0,05	0,08	19,23	0,08	b.d.	b.d.	b.d.	1,24	0,06	b.d.	78,11	b.d.	98,87
Calcosina	b.d.	0,01	b.d.	0,01	b.d.	19,15	0,08	0,01	b.d.	0,12	1,41	b.d.	b.d.	77,84	0,01	98,64
Calcosina	0,03	b.d.	0,01	b.d.	b.d.	19,49	0,13	0,03	b.d.	0,04	1,27	0,01	b.d.	77,72	b.d.	98,73
Calcosina	0,02	b.d.	b.d.	0,08	b.d.	19,62	0,09	b.d.	b.d.	0,03	1,02	b.d.	b.d.	77,20	b.d.	98,07
Calcosina	0,08	b.d.	b.d.	0,04	0,11	19,58	0,13	b.d.	b.d.	0,07	1,01	b.d.	b.d.	77,64	b.d.	98,67

Tabla 13 - Análisis químicos de bornita de la muestra 21E-1067-1. Concentraciones en % en peso.

Mineral	Hg	Te	Se	Bi	Au	S	Fe	Co	Zn	As	Ag	Pb	Sb	Cu	Ni	Total
Bornita	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,02	25,06	10,89	0,01	b.d.	0,02	0,46	0,04	b.d.	61,91	b.d.	98,40
Bornita	0,10	0,01	b.d.	0,02	b.d.	25,40	10,69	b.d.	b.d.	0,04	0,48	b.d.	b.d.	61,59	b.d.	98,33
Bornita	b.d.	b.d.	0,01	0,12	b.d.	25,23	10,68	b.d.	b.d.	0,03	0,49	b.d.	b.d.	61,46	b.d.	98,03
Bornita	0,01	0,03	b.d.	b.d.	0,07	25,40	11,03	0,01	b.d.	b.d.	0,66	b.d.	b.d.	61,97	b.d.	99,19
Bornita	0,01	b.d.	0,01	b.d.	b.d.	25,27	10,82	b.d.	0,01	0,04	0,60	b.d.	b.d.	61,71	b.d.	98,47
Bornita	0,01	0,01	b.d.	b.d.	b.d.	25,25	10,80	0,02	b.d.	b.d.	0,55	0,01	b.d.	61,85	b.d.	98,51
Bornita	0,08	b.d.	b.d.	0,08	0,02	25,30	10,81	0,02	b.d.	b.d.	0,44	b.d.	b.d.	61,93	0,01	98,70
Bornita	0,11	0,01	b.d.	0,12	b.d.	25,10	10,71	0,02	b.d.	0,02	0,73	b.d.	b.d.	61,34	b.d.	98,17
Bornita	b.d.	b.d.	b.d.	0,14	0,06	25,19	10,76	0,02	b.d.	0,02	0,82	b.d.	b.d.	60,84	b.d.	97,85
Bornita	0,02	0,03	0,01	b.d.	b.d.	25,21	10,77	0,01	b.d.	0,03	1,11	0,05	b.d.	61,00	b.d.	98,23
Bornita	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	25,06	10,76	b.d.	b.d.	0,03	1,11	0,11	b.d.	61,11	0,01	98,19
Bornita	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,04	25,07	10,92	0,01	b.d.	0,05	0,87	b.d.	b.d.	61,32	b.d.	98,28

## Anexo D: Isótopos de azufre.

En el siguiente anexo se muestran los datos de isótopos de azufre para depósitos estratoligados Cu – (Ag) del Cretácico, se incluye en que minerales fue medido el dato y la publicación de la cual fue obtenido (Tabla 14).

Tabla 14 - Resumen de análisis de isótopos estables en principales depósitos estratoligados del Cretácico.

	Deposito	Fase Mineral	$\delta^{34}\text{S}$ (%)	Referencia
Yacimientos estratoligados Cu – (Ag) del Cretácico.	Metalotecto Ocoita Pabellón	Bn - Cc - Tr	-44,7 a -25,4	Cisternas y Hermosilla (2006)
		Cc - Cv	-21,9 a -17,9	Cisternas y Hermosilla (2006)
	Talcuna	Cc - Bn - Cpy	-38,3 a -16,0	Spiro y Puig (1988); Carrillo-Rosúa et al. (2006)
	El Soldado	Cc	-12,7 a -4,6	Villalobos (1995); Wilson et al. (2003)
		Cc - Bn	-2,2 a 15,2	Villalobos (1995); Wilson et al. (2003)
		Bn	-6,9 a 10,5	Klohn et al. (1990); Wilson et al. (2003)
		Bn - Cc	-4,1 a 19,0	Klohn et al. (1990); Wilson et al. (2003)
		Cc	-6,8 a 7,7	Klohn et al. (1990); Wilson et al. (2003)
	Lo Aguirre	Bn - Cc - Cpy - Py	-3,6 a 1,4	Spiro y Puig (1988); Saric et al. (2003)
	Melipilla - Naltahua	Bn	-49,1 a -2,8	Carrillo-Rosúa et al. (2014)
		Bn - Djur	-50,4 a -4,7	Carrillo-Rosúa et al. (2014)
		Cc	-37,1 a -0,6	Carrillo-Rosúa et al. (2014)
	La Serena Área	Bn	-31,7 a -18,9	Carrillo-Rosúa et al. (2014)
		Bn - Djur	-35,0 a -15,5	Carrillo-Rosúa et al. (2014)
		Cc	-30,8 a -16,8	Carrillo-Rosúa et al. (2014)
	Altamira	Cc	-38,7 a -10,7	Maureira (2018)

Abreviaciones: Bn: Bornita, Cc: Calcosina, Tr: Tetraedrita, Djur: Djurleita, Cv: Covelina, Cpy: Calcopirita, Py: Piritita.