

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

**CARACTERIZACIÓN LITOGEOQUÍMICA DEL DISTRITO MINERO  
TALCUNA IV REGIÓN DE COQUIMBO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**MIGUEL ANDRES ROMERO ROJAS**

**PROFESOR GUÍA:  
DIEGO MORATA CESPEDES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
VICTOR MAKSAEV JURCHUC  
CARLOS MARQUARDT ROMÁN  
SALVADOR MORALES RUANO**

**SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2008**

## RESUMEN

En el Distrito Minero de Talcuna, ubicado entre las coordenadas UTM 6.696.000 N – 316.000 E y 6.691.000 N – 323.000 E (IV Región, Chile) se explotan depósitos estratoligados de cobre-plata, en los que la mineralización precipitó y está hospedada en estructuras y estratos de tobas pertenecientes a la parte superior del Miembro 1 de la Formación Quebrada Marquesa (Barremiano Superior – Albiano; Aguirre y Egert, 1965), evidenciando un importante control estructural-estratigráfico.

En el presente trabajo se estudian las rocas, vetas y mantos mineralizados de dicho distrito, tanto al interior mina Coca Cola 1, como en superficie. El objetivo es, mediante un estudio petrográfico, de difracción de rayos X y geoquímico, establecer una relación entre la mineralogía de alteración y la mineralización existente en el sector, basándose en la hipótesis que existe una alteración hidrotermal sobreimpuesta a un metamorfismo regional de bajo grado.

Los estudios geoquímicos, petrográficos y de difracción de rayos X, realizados en muestras mineralizadas, muestran la existencia una alteración, en todo el sector, dominada principalmente por la asociación mineral clorita, albita y calcita, y de forma incipiente, una alteración compuesta por la asociación mineral feldespato potásico, sericita y analcima en las unidades mineralizadas. Sin embargo, ambas alteraciones no se encuentran asociadas directamente a altas concentraciones de Cu y Ag, por lo que no se ha observado una mineralogía de alteración característica asociada a la mineralización de cobre. La única evidencia clara asociada mineralización la constituye la presencia de baritina, que precipitaría directamente a partir de los fluidos hidrotermales.

Los estudios geoquímicos realizados en las distintas unidades establecen que los elementos fueron removilizados a lo largo de la columna estratigráfica, fenómeno relacionado probablemente a la alteración hidrotermal. Los resultados revelan una disminución en elementos asociados a mineralización y alteración en las unidades superiores, lo que sugiere que la intensidad de los fluidos ha disminuido a medida que éstos evolucionan.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a las personas que hicieron posible realizar este trabajo, Carlos Marquardt, Salvador Morales y Diego Morata, fruto de su iniciativa se me ha permitido desarrollar la presente memoria. A la Empresa Minera Talcuna y, además, al Proyecto de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia de España CGL2006-02594/BTE "Modelización de los mecanismos de concentración y movilidad de cobre en yacimientos de tipo manto, epitermales, y asociados a ofiolitas".

Con mucho afecto quiero dar gracias a mi familia por su apoyo incondicional durante toda mi vida. A mis padres por su trabajo y esfuerzo, por darme mucho más de lo que pude necesitar y por entregarme los valores que han hecho de mí la persona que soy hoy, porque su gran afán fue educar a sus hijos y ahora termina ese ciclo, no puedo imaginar a cuanto renunciaron para hacerlo, siempre estaré agradecido. A mis hermanos, porque sus vidas han sido un ejemplo, porque me han brindado seguridad y confianza y esencialmente por permitirme ser un hermano menor, en especial al Coque, por cuidarme, por animarme, por su paciencia y enseñanzas.

Gracias a mis amigos, porque ellos me animaron cuando ya estaba rendido, porque me apoyaron cuando estaba solo, porque son los gestores de incontables alegrías. Sus distintos intereses, sus diferentes formas de ver la vida, de ellos he aprendido un montón de cosas, sin duda conocer a cada uno de ellos ha sido un regalo.

Gracias a la vida (Jah) por enseñarme que existimos para acumular experiencias, que es eso lo que nos hace crecer y por eso mismo vivir agradecidos y en paz.

## Tabla de Contenidos

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1    FORMULACIÓN DEL ESTUDIO.....	1
I.2    OBJETIVOS.....	2
I.3    METODOLOGÍA .....	3
I.4    UBICACIÓN Y ACCESOS.....	6
I.5    TRABAJOS ANTERIORES .....	7
CAPITULO II. MARCO GEOLÓGICO .....	10
II.1    GENERALIDADES .....	10
II.2    ESTRATIGRAFÍA DE LA FM. QUEBRADA MARQUESA (PAYNE, 1995) .....	13
II.2.1    Unidad 1 .....	16
II.2.2    Unidad 2 .....	17
II.2.2.1    Unidad 2a (Manto Talcuna).....	17
II.2.2.2    Unidad 2b (Manto Delirio) .....	17
II.2.3    Unidad 3 (Manto de Manganeso).....	19
II.2.4    Unidad 4.....	19
II.2.5    Unidad 5 .....	19
II.2.5.1    Unidad 5a.....	20
II.2.5.2    Unidad 5b.....	20
II.2.6    Unidad 6.....	20
II.2.7    Unidad 7.....	21
II.2.8    Unidad 8.....	21
II.2.9    Unidad 9.....	21
II.2.10    Unidad 10 .....	22
II.3    ROCAS INTRUSIVAS .....	23
II.4    GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	24
II.5    ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN .....	27
CAPITULO III. GEOQUÍMICA DEL DISTRITO MINERO TALCUNA.....	31
III.1    GENERALIDADES .....	31

III.2	CARACTERIZACIÓN LITOGEOQUÍMICA DE LAS UNIDADES DEL CERRO TAMBOR	32
III.2.1	<i>Diagramas de normalización</i> .....	34
III.2.2	<i>Matrices de correlación</i> .....	41
III.2.3	<i>Discusiones</i> .....	49
III.3	GEOQUÍMICA DE OCURRENCIAS MINERALES .....	52
III.3.1	<i>Petrografía</i> .....	54
III.3.2	<i>Estudio de la alteración mediante difracción de rayos - X</i> .....	59
III.3.3	<i>Geoquímica</i> .....	62
CAPITULO IV. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES .....		66
IV.1	LITOESTRATIGRAFÍA A PARTIR DE GEOQUÍMICA .....	66
IV.2	RELACIÓN ALTERACIÓN – MINERALIZACIÓN.....	71
IV.3	CONCLUSIONES .....	77
REFERENCIAS.....		79

Anexo A: Petrografía

Anexo B: Análisis químico de roca total

Anexo C: Análisis por difracción de rayos X

## Índice de Figuras

Figura I.1: Mapa carretero de la provincia del Elqui, IV Región Chile. ....	6
Figura II.1: Mapa geológico regional del área de estudio. ....	11
Figura II.2: Mapa geológico distrital de las 9 unidades definidas para la Fm. Quebrada Marquesa. ....	14
Figura II.3: Correlación litológica de las unidades mineralizadas en el distrito Talcuna.. ....	15
Figura II.4: Fotografía Unidad 2a, Manto Talcuna .....	18
Figura II.5: Fotografía Unidad 2b, Manto Delirio .....	18
Figura II.6: Fotografía Unidad 5b .....	20
Figura II.7: Principales fallas que controlan la mineralización hipógena ubicadas en Cerro Tambor. ....	25
Figura II.8: Estilos de vetas presentes en el yacimiento Coca Cola 2.....	28
Figura II.9: Fotografía a microscopio de luz reflejada. mineralogía de yacimiento estatoligado.....	30
Figura II.10: Fotografía con microscopio de luz reflejada de vetilla .....	30
Figura III.1: Ubicación de los puntos de muestreo para geoquímica de unidades sin mineralización .....	33
Figura III.2: Diagramas de normalización para rocas de la Unidad 1, Unidad 2a y Unidad 2b .....	37
Figura III.3: Diagramas de normalización para rocas de la Unidad 3, Unidad 4 y Unidad 5. ....	38
Figura III.4: Diagramas de normalización para rocas de la Unidad 6, Unidad 8 y Unidad 9 .....	39
Figura III.5: Diagrama de fraccionamiento alteracion. ....	46
Figura III.6: Diagrama de dispersión Sc -Ti.....	47
Figura III.7: Tabla de síntesis de concentraciones de los elementos químicos en las diferentes unidades. ....	50
Figura III.8: Mapa de ubicación de ocurrencias minerales interior mina Coca Cola 1..	52
Figura III.9: Mapa de ubicación de ocurrencias mineras en superficie.....	53
Figura III.10: Fotografía de minerales de alteracion en roca volcanoclástica (Unidad 2a) .....	55

Figura III.11: Fotografía de minerales de alteracion en roca volcánica de textura pilotaxítica (Unidad 2b).....	56
Figura III.12: Fotografía de minerales de alteracion en roca volcánica de textura pilotaxítica (Unidad 3).....	56
Figura III.13: Fotografía de minerales de alteracion en roca volcánica de textura pilotaxítica (Superficie) .....	57
Figura III.14: Fotografía de asociación de minerales supergenos en vetillas.....	57
Figura III.15: Abundancias relativas de fases minerales en superficie e interior mina (Coca Cola 1).....	60
Figura III.16: Variaciones de concentraciones de elementos con la altura relacionados a la mineralización.....	63
Figura III.17: Variaciones de concentraciones de elementos con la altura relacionados a la alteración .....	64
Figura IV.1: Concentraciones de Cu total [%], Ag [ppm], Pb [ppm] y Zn [ppm] en interior de mina y superficie .....	75

# Capítulo I. Introducción

## *1.1 Formulación del Estudio*

La Compañía Minera Talcuna realiza una campaña de exploración geoquímica en el distrito de Talcuna (UTM 6.696.000 N – 316.000 E y 6.691.000 N – 323.000 E), a unos 40 Km al NE de la ciudad de La Serena en la provincia del Elqui, IV Región de Coquimbo. La zona corresponde a la franja metalogénica del Cretácico Inferior y alberga depósitos estratoligados de cobre-plata y manganeso alojados en la Formación Quebrada Marquesa (Cretácico Inferior). La campaña tiene como objetivo caracterizar litogeoquímicamente la zona, poniendo énfasis en la mineralización y alteración asociada.

En este trabajo se analizan las rocas de la Formación Quebrada Marquesa y del yacimiento estratoligado de cobre Coca Cola 1, con el fin de establecer diferencias entre la mineralogía de ganga asociada a la mineralización de cobre y la mineralogía de metamorfismo de muy bajo grado existente en las rocas volcano-sedimentarias del Cretácico Inferior y de esta forma establecer una mineralogía característica a la mineralización presente en el distrito, para ello se evalúan las correlaciones existentes entre la mineralogías y las concentraciones de elementos metálicos.



## ***I.2 Objetivos***

### **Objetivo Principal**

Establecer la correlación existente entre la mineralización de cobre del Distrito Minero Talcuna y la mineralogía y geoquímica de alteración.

### **Objetivos Específicos**

Caracterizar desde el punto de vista geoquímico las unidades en el distrito de Talcuna y la posible alteración y la mineralización de cobre.

Determinar similitudes y diferencias mineralógicas y geoquímicas existentes entre la mineralización de cobre y alteración ocurrida en interior mina y la existente en superficie.

Determinar la movilidad/inmovilidad de elementos químicos y su posible relación con el proceso de mineralización.

### ***1.3 Metodología***

El trabajo de terreno fue realizado entre los meses de Diciembre del 2007 y Febrero del 2008 y corresponden a la obtención de 197 muestras de roca en superficie y al interior de la mina Coca Cola 1, las que corresponden a niveles mineralizados y vetas, además de 88 muestras de diferentes unidades de la Formación Quebrada Marquesa con el fin de establecer una caracterización litogeoquímica de ellas. El trabajo contempla un reconocimiento de la topografía y accesos y un levantamiento geológico puntual de algunos sectores, registrando parámetros como mineralización, estructuras y litología. El muestreo, consiste en una muestra de 1 a 2Kg, en el caso de las vetas corresponde a astillas a lo largo de 1m de esta y en afloramientos son astillas tomadas en forma aleatoria y no es una canaleta representativa.

Se analizaron 42 cortes transparentes al microscopio de muestras de niveles mineralizados y vetas, tanto de interior mina como en superficie, observando texturas, mineralogía hipógena y supergena.

Se efectuaron análisis químicos multielementales a la totalidad de las muestras. Dichos análisis fueron realizados en el laboratorio certificado ALS Chemex con sede en Coquimbo ([www.alschemex.com](http://www.alschemex.com)) e incluyen 33 elementos por digestión ácida con agua regia y analizada con el instrumento ICP AES. Los elementos corresponden a Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W y Zn. También se analizó el contenido de Cu total por digestión con cuatro ácidos mediante espectropía por absorción atómica y Cu soluble por digestión con ácido sulfúrico y analizado por AAS. La serie completa de elementos analizados y límites de detección para cada uno de ellos se presentan en la Tabla I.1. Respecto al control de calidad, además de los blancos y estándares realizados por el laboratorio, se reanalizaron 8 muestras para Cu total obteniendo diferencias que oscilan entre el 1 y 7%, que indica una buena precisión.

Se realizó un análisis mediante difracción de rayos - X a 33 muestras de superficie y 23 de interior mina. Los estudios fueron efectuados en los laboratorios del Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada usando el difractómetro de reflexión Phillips PW1710 con radiación  $\text{CuK}\alpha$  y rendija automática. La interpretación de los resultados se hizo empleando un programa informático desarrollado específicamente para tal fin (X Powder).

Elemento	Unidad	Límite de Detección
Ag	ppm	0.5
Al	%	0.01
As	ppm	5
Ba	ppm	10
Be	ppm	0.5
Bi	ppm	2
Ca	%	0.01
Cd	ppm	0.5
Co	ppm	1
Cr	ppm	1
Cu	ppm	1
Fe	%	0.01
Ga	ppm	10
K	%	0.01
La	ppm	10
Mg	%	0.01
Mn	ppm	5
Mo	ppm	1
Na	%	0.01
Ni	ppm	1
P	ppm	10
Pb	ppm	2
S	%	0.01
Sb	ppm	5
Sc	ppm	1
Sr	ppm	1
Th	ppm	20
Ti	%	0.01
Tl	ppm	10
U	ppm	10
V	ppm	1
W	ppm	10
Zn	ppm	2
Cu	%	0.01
Cu	%	0.001

Tabla I.1: Límite de detección de los distintos elementos en el Distrito Minero Talcuna ([www.alschemex.com](http://www.alschemex.com)).

Se realizó una comparación entre las muestras que pertenecen a las diferentes unidades de la Formación Quebrada Marquesa y se ejecutó una comparación petrográfica, mineralógica y geoquímica entre las muestras mineralizadas obtenidas en el interior de la mina Coca Cola 1 y superficie.

## I.4 Ubicación y accesos

El Distrito Minero Talcuna se encuentra ubicado en la Cordillera de la Costa, en la parte central de la provincia del Elqui, a unos 40 Km de La Serena, entre las quebradas Marquesa y Las Cañas (Figura I.1).

El acceso al distrito se realiza por la carretera pavimentada número 41, que une las ciudades de La Serena y Vicuña, hasta el pueblo de Marquesa y desde este punto se toma un desvío hacia el norte por la Quebrada Marquesa, camino a las localidades de Viñita Alta y Viñita Baja.

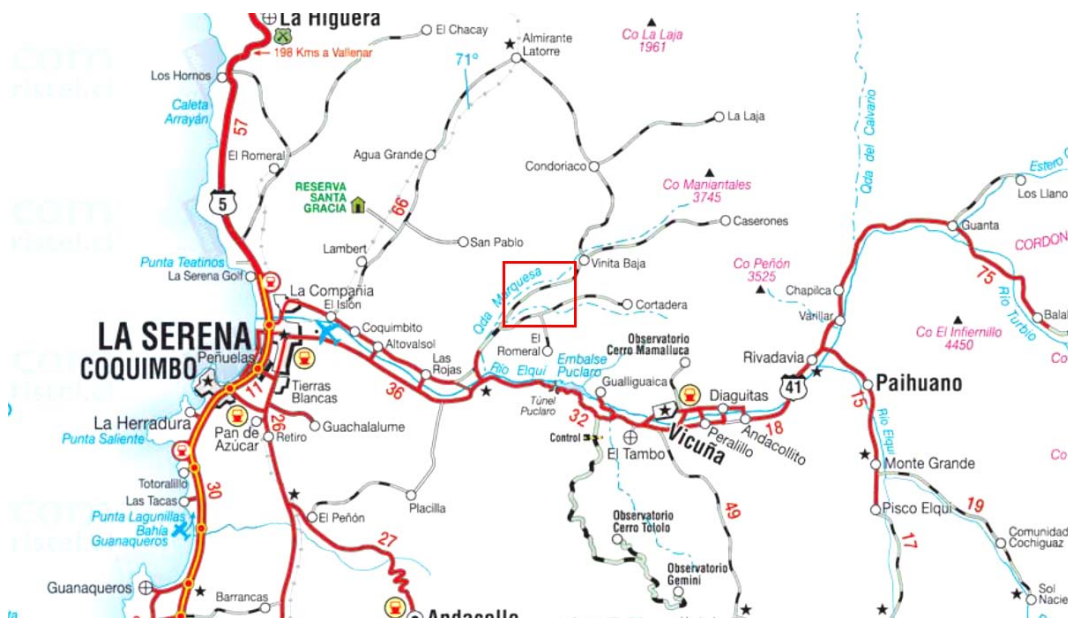


Figura I.1: Mapa carretero de la provincia del Elqui, IV Región Chile, zona de estudio en cuadro rojo.

## ***1.5 Trabajos anteriores***

El levantamiento geológico regional más importante correspondió a la elaboración del cuadrángulo Quebrada Marquesa (Aguirre y Egert, 1965) cuyo principal objetivo es la confección de la carta geológica 1:50.000 del cuadrángulo y describir sus recursos minerales. En este trabajo se divide la Formación Quebrada Marquesa en 4 unidades.

Peebles (1966) reconoce la presencia de yacimientos en forma de vetas y mantos en el Miembro 1 de la Formación Quebrada Marquesa y señaló un posible origen singenético así como epigenético o una combinación de ambos. Kamono y Boric (1982) sugieren un origen epigenético basados principalmente en las asociaciones minerales presentadas en ambas morfologías de mineralización. Estos autores establecen que los depósitos minerales del distrito serían de tipo epigenético hidrotermal y se habrían formado a bajas temperaturas cerca de la superficie. Conforme a estos autores, el cobre podría haber sido lixiviado de la secuencia volcánica neocomiana durante un metamorfismo de carga. Sin embargo, Boric (1985) postula que el cobre posiblemente provenga de fluidos hidrotermales derivados de intrusivos de edad Cretácico Superior - Terciario Inferior que afloran en las cercanías, los fluidos hidrotermales habrían sido atrapados al encontrar un nivel impermeable, caracterizado por lutitas y fangolitas asociadas a depósitos de Mn.

Camus (1986 y 1990) clasificó los yacimientos del Distrito Minero Talcuna como estratoligados en rocas sedimentarias que se enmarcan geológicamente en cuencas lacustres. La presencia de rocas sedimentarias volcánicas en los estratos indica que durante el desarrollo de estas cuencas el volcanismo se mantuvo activo. Finalmente, apoya un modelo epigenético para la génesis de este tipo de depósitos, aunque señaló que los episodios diagenéticos relacionados a enterramiento post-depósito no pueden ser descartados, como ya lo había establecido Levi, et al (1988) al indicar que la alteración asociada a la mineralización corresponde a facies metamórficas de muy bajo grado

indistinguible de la alteración regional en las secuencias volcánicas meso-cenozoicas de Chile Central.

Oyarzún et al. (1998), interpretaron que dentro del distrito existen dos eventos relacionados a la mineralización. El primero, de edad cretácica inferior, estaría relacionado a los mantos y provisto de una alteración de clorita, epidota, calcita, albita, prehnita y zeolita, y el segundo, de edad terciaria inferior, estaría confinado a las vetas y con desarrollo de una alteración local de clorita, calcita y sericita. El estudio de inclusiones fluidas en calcita de Oyarzún et al. (1998) indicó que los depósitos tipo manto se habrían formado de fluidos con salinidades entre 11 y 19% en peso de NaCl eq. a temperaturas entre 120° y 205°C, mientras que las vetas lo habrían hecho a temperaturas de 70° y 170°C con salinidades entre 3 y 27% de NaCl eq. Estos datos concuerdan con los obtenidos en isótopos de azufre con valores de -40 a -10 ‰ (Puig y Spiro, 1988), que sugieren un proceso de mineralización de baja temperatura.

Morata y Aguirre (2003) realizaron un estudio geoquímico y petrogenético del volcanismo del Cretácico Inferior en la Cordillera de la Costa a la latitud de La Serena (=29°S). En este estudio se destaca el alto y constante contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y bajo de MgO, que parecen ser las características generales de las rocas volcánicas Mesozoicas en el margen andino. Además, en términos de variaciones de elementos mayores, las lavas del Cretácico Inferior, los diques alimentadores e intrusivos andesíticos conformarían un único patrón sin diferencias químicas principales entre afloramientos. Basados en los estudios geoquímicos estos autores establecen la existencia de un cambio geodinámico de un régimen extensional durante el Cretácico Inferior a un régimen compresional durante el Cretácico Superior al Terciario.

Estudios geocronológicos recientes (Morata et al., 2008) han permitido constreñir mejor la duración del evento magmático extensional durante el Cretácico Inferior en la Cordillera de la Costa del centro y centro-norte de Chile. Se han obtenido edades <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar de 91,0±0,6 Ma a 114,1±0,5 Ma en diferentes coladas de lava de la Formación Arqueros y edades de 84,3±1,3 Ma en un dique de características geoquímicas similares a las rocas antes mencionadas.

Estos datos están de acuerdo con la existencia de una Provincia Magmática del Cretácico Inferior (119-84 Ma), que habría comenzado con un breve e intenso evento magmático en la zona central de la Cordillera seguido de pulsos magmáticos discretos hacia latitudes más septentrionales.

Actualmente el modelo epigenético hidrotermal es el más aceptado para los depósitos de Talcuna, aunque aún se desconoce el origen de los fluidos hidrotermales que provocan la mineralización en los yacimientos. También está en discusión la extensión vertical que tendría la mineralización, Cucurella et al. (2006) señaló que la mineralización traspasa niveles considerados sellos impermeables pudiéndose encontrar niveles mineralizados al NW del distrito Minero Talcuna.



## Capítulo II. Marco Geológico

### II.1 Generalidades

El margen pacífico chileno ha sido una zona de subducción continua desde el Jurásico hasta ahora, con variaciones en la naturaleza del magmatismo como consecuencia de las principales coacciones tectónicas. Durante el Cretácico Inferior en Chile central, un arco volcánico fue formado dentro del margen continental sobre rocas erosionadas jurásicas y pre-jurásicas conformando un cinturón de dirección NS de 1000 Km, de 100 a 150 Km, de ancho más y de 13 Km de espesor en algunas secciones (e.g., Vergara *et al.*, 1995). Gruesas secuencias, predominantemente volcánicas, afloran a lo largo del borde occidental del cinturón (Cordillera de la Costa), mientras que rocas sedimentarias con rocas volcánicas subordinadas aparecen al este (Cordillera de los Andes) (Aguirre, 1985). Una cuenca extensional de intra-arco, de altas tasas de subsidencia (100-300 m/M.a.), ha sido propuesta como régimen geodinámico para la Cordillera de la Costa durante el Cretácico Inferior (Vergara *et al.*, 1995) mientras que para la Cordillera de los Andes Vergara y Nyström (1996) han postulado un régimen de tras-arco para el mismo periodo.

Los registros del Cretácico Inferior en la Cordillera de la Costa (29-30°S), están caracterizados por secuencias volcánicas estratificadas (andesitas y andesitas basálticas) y rocas sedimentarias. Las rocas volcánicas dominan en la Formación Arqueros (Hauteriviano Barremiano; Aguirre y Egert, 1965), mientras que la sobreyacente Formación Quebrada Marquesa (Barremiano Superior Albiano; Aguirre y Egert, 1965), está compuesta principalmente de tobas y brechas con menores intercalaciones marinas, y rocas volcanoclásticas continentales y lavas andesíticas, presentes principalmente en sus unidades basales. La presencia de estructuras “pillow” en algunas de las lavas más antiguas de la formación Arqueros (Aguirre y Egert, 1965) indican un emplazamiento parcialmente subacuático. Sobre la Formación Quebrada Marquesa están depositadas de manera discordante rocas principalmente continentales clásticas, lavas y brechas de la Formación Viñita del Cretácico

Superior (Aguirre y Egert, 1965, 1970). De acuerdo a reconstrucciones paleogeográficas, una cuenca marina en norte y centro de Chile habría sido desarrollada durante el Barremiano Aptiano (Mourgues, 2004), en acuerdo con la presencia de litologías evaporíticas en los niveles superiores de la Formación Arqueros (Aguirre y Egert, 1965).

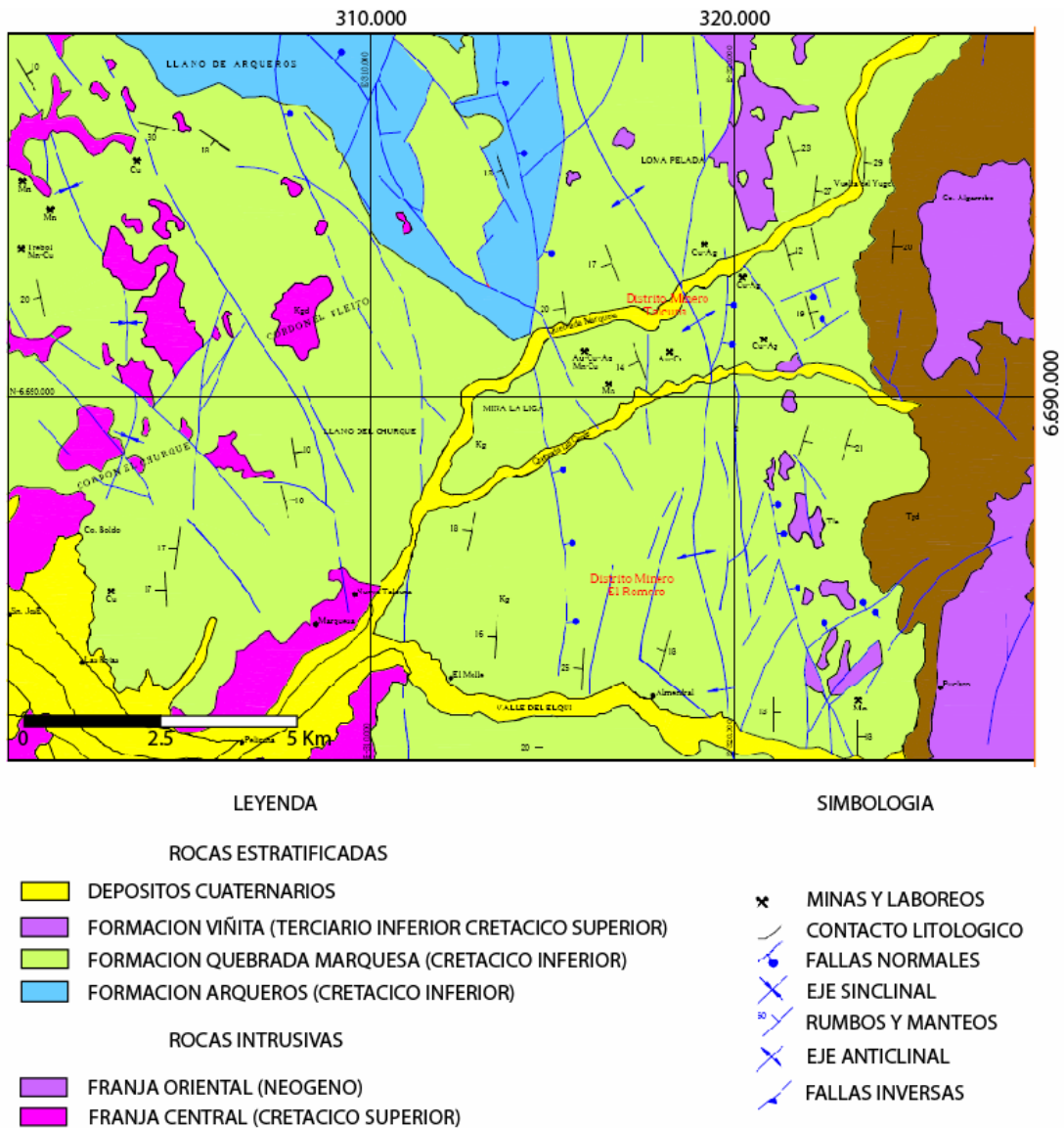


Figura II.1: Mapa geológico regional del área de estudio, tomado y modificado de Aguirre y Egert (1985); Emparan y Pineda (1999).

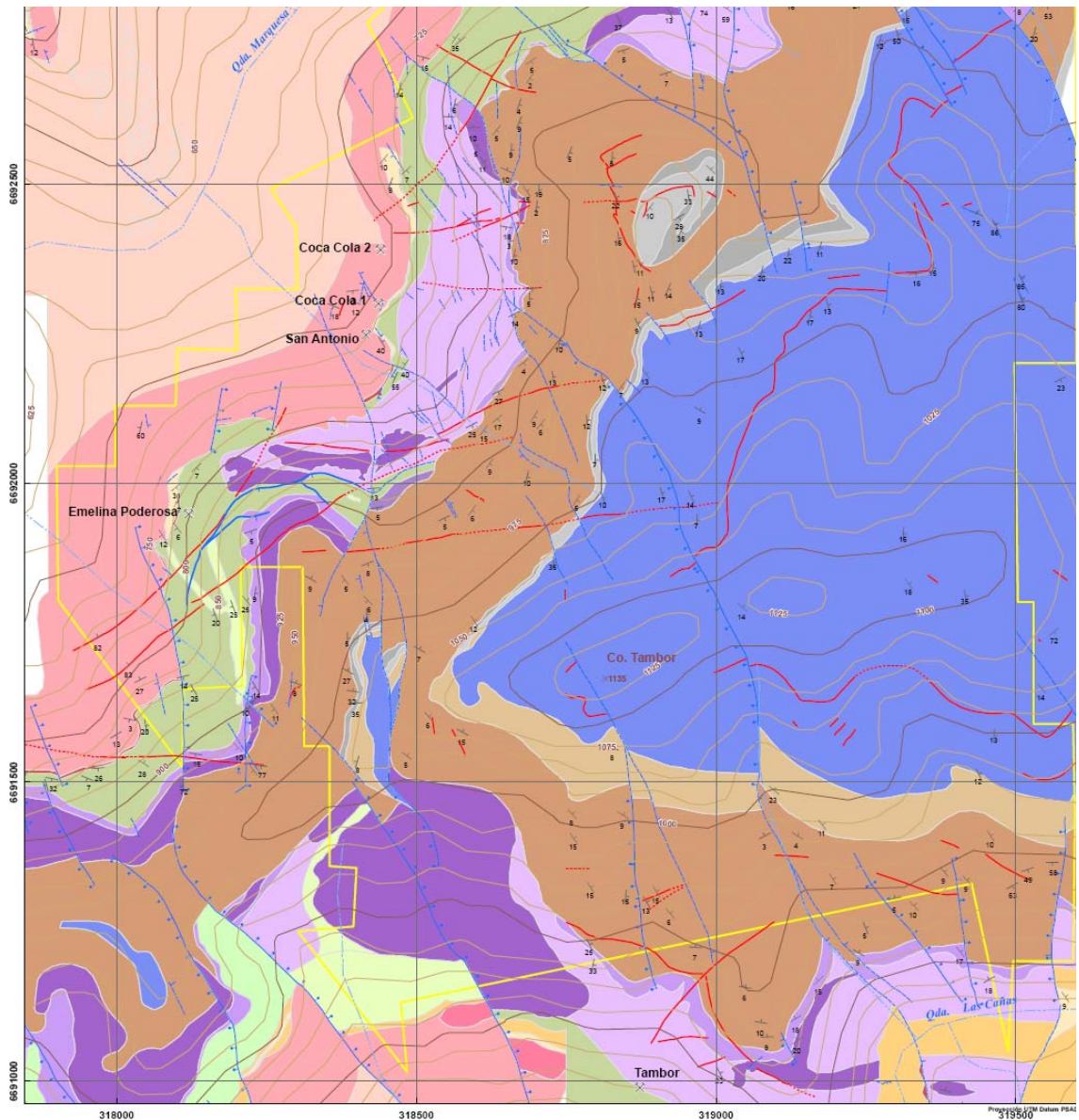
Las secuencias volcano-sedimentarias del Cretácico Inferior están ligeramente plegadas, falladas y localmente intruídas por granitoides calcoalcalinos. Las edades de los diferentes plutones van desde  $130\pm 3$  Ma to  $96\pm 3$  Ma las que han sido obtenidas en roca rotal y biotita (Emparan y Pineda, 2000).

Las mineralizaciones de Cu-Ag objeto de este estudio se albergan, como ya indicó anteriormente, en las secuencias volcano-sedimentarias de la Formación Quebrada Marquesa.

## ***II.2 Estratigrafía de la Fm. Quebrada Marquesa (Payne, 1995)***

Los yacimientos del distrito de Talcuna están emplazados en la Formación Quebrada Marquesa. Esta unidad fue definida por Aguirre y Egert (1962) en el cuadrángulo homónimo, donde se encuentra el distrito de Talcuna y corresponde a una secuencia de lavas andesíticas y rocas epi y piroclásticas continentales, que cerca de la base presenta intercalaciones de areniscas calcáreas marinas (Figura II.1). Por su contenido fosilífero y posición estratigráfica se ha asignado al Neocomiano superior – Aptiano (Aguirre y Egert, 1965).

La Formación Quebrada Marquesa posee más de 500 m de espesor y fue dividida por Kamono y Boric (1982) en siete unidades estratigráficas. En este estudio, se ha trabajado con moderadas modificaciones a dicha clasificación, sintetizando y corroborando el trabajo realizado de manera particular por la empresa Mineral Aurex (Payne, 1995), con el fin de adaptarlo al trabajo geoquímico posterior. El resultado es la división en 10 unidades litoestratigráficas principales (Figura II.2 y II.3).



**LEYENDA**

- |  |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <p><b>Unidad 9</b><br/>Secuencia de lavas andesíticas a andesíticas basálticas.</p> <p><b>Unidad 8</b><br/>Conglomerado en parte con clastos andesíticos y localmente intercalado con lavas andesíticas.</p> <p><b>Unidad 7</b><br/>Secuencia de tobas de cristales y lapilli, intercaladas con tuffas brechosas de composición andesíticas.</p> <p><b>Unidad 6</b><br/>Secuencia de tuffas finas a gruesas, areniscas y, en menor abundancia, conglomerados y calizas</p> | <p><b>Unidad 5</b> Secuencia de lavas y flujos mantos de composición andesítica, intercalados con rocas piroclásticas y volcanoclasticas.</p> <p><b>d</b> Domos y/o lavas andesíticas</p> <p><b>c</b> Conglomerado</p> <p><b>b</b> (Manto Superior) Tobas de lapilli</p> <p><b>a</b> Secuencia de tobas y tuffas gruesas y finas, areniscas y fangolitas</p> <p><b>Unidad 4</b> Secuencia volcanoclastica gruesa y masiva intercalada con areniscas y fangolitas.</p> <p><b>X</b> Brecha tobácea masiva, que contiene grandes bloques</p> <p><b>S</b> Areniscas de grano fino, finamente laminada</p> <p><b>Y</b> Fangolitas en partes calcareas</p> | <p><b>Unidad 3</b><br/>Fangolita laminada, con niveles o lentes ricos en manganeso</p> <p><b>Unidad 2</b> Secuencia de lavas, tobas y tuffas</p> <p><b>b</b> Manto Delirio, lavas andesíticas a andesíticas basálticas</p> <p><b>a</b> Manto Talcuna, Tobas de lapilli y areniscas</p> <p><b>Unidad 1</b> Secuencia de tobas y tuffas con domos intercalados.</p> <p><b>C</b> Toba de lapilli de grano fino a medio</p> <p><b>b</b> Domos andesíticos</p> <p><b>a</b> Tuffas, tobas, areniscas y fangolitas</p> |   |
| <p> Falla inversa</p> <p> Falla normal</p> <p> Falla inferida</p>  | <p> Dique</p> <p> Dique inferido</p>   | <p> Entrada Mina</p> <p> Rumbo y manto de la estratificación</p> <p> Curva de nivel Índice cada 100m</p>  | <p> Curva de nivel intermedia cada 25m</p> <p> Drenes</p> <p> Área límite de las propiedades mineras de la compañía</p> |

Figura II.2: Mapa geológico distrital de las 9 unidades definidas para la Fm. Quebrada Marquesa en el sector estudiado. (Marquardt et al 2008).

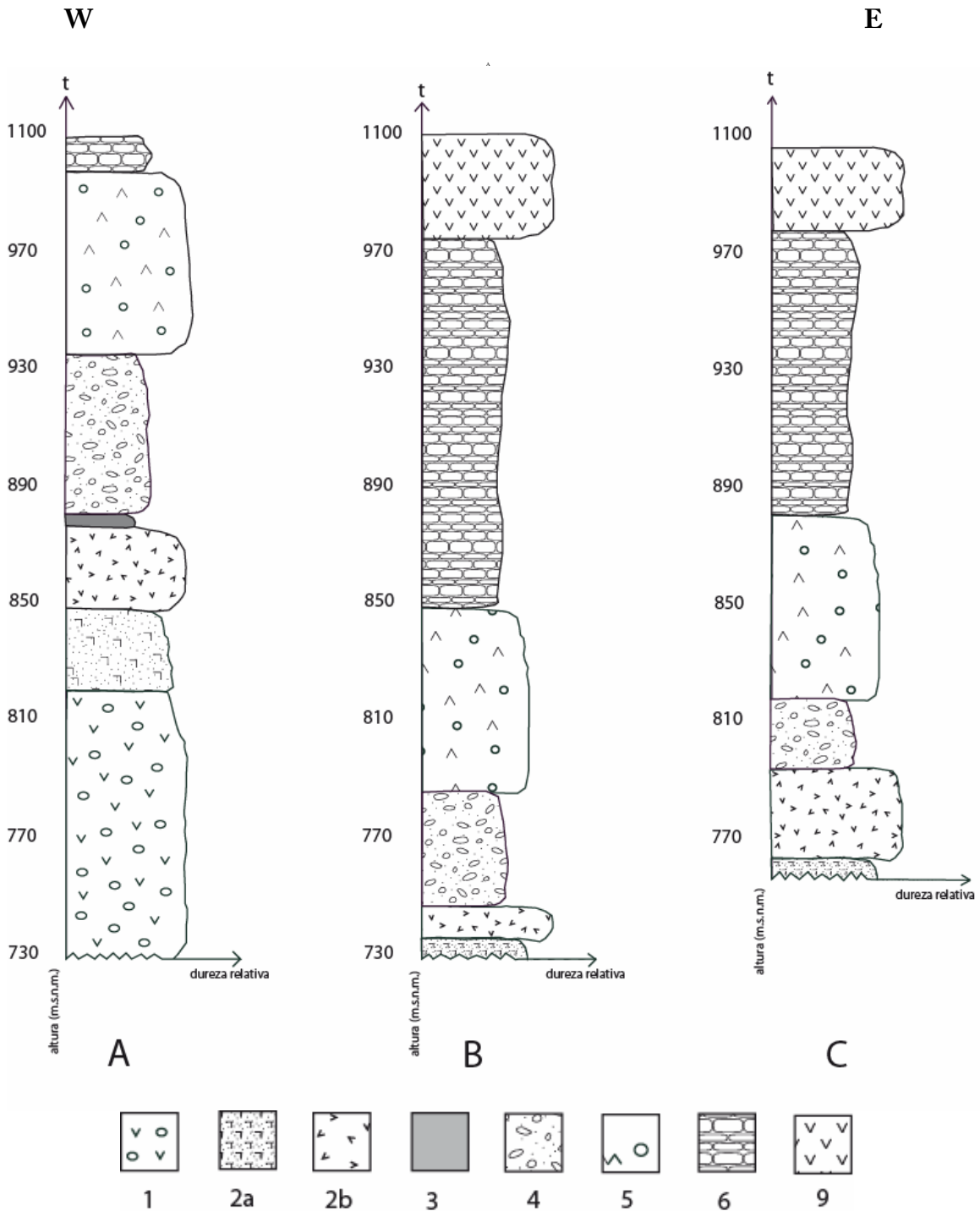


Figura II.3: Columnas estratigráficas del distrito Talcuna. 1 Secuencia de tobas, tufitas y domos. 2 Tobas andesíticas de grano fino a grueso con matriz de calcita y zonas de bornita y calcopirita. 2b Flujos de lavas andesíticos basálticos con mineralización de bornita y calcopirita. 3 Limolitas a areniscas ricas en óxidos de Fe y Mn. 4 Secuencia volcanoclástica con intercalaciones de areniscas y lutitas. 5 Secuencia de lavas y filones intercalados con rocas volcanoclásticas. 6 Secuencia de tufitas areniscas, conglomerados y calizas. 9 Secuencia de lavas andesíticas basálticas. Coordenadas de bases de columnas A= 6690466N – 318332E, B= 6692448N – 318478N, C= 6691085 - 319684.

## II.2.1 Unidad 1

La unidad 1 es un grueso horizonte estratigráfico que está expuesto al lado Oeste a lo largo de la Quebrada Marquesa. Su base no está expuesta, y su grosor es más de 300 metros. La parte inferior, con un espesor de 50-80 metros es un intervalo volcanosedimentario, compuesto por andesitas y tobas de tamaño lapilli a brechosas mal estratificadas y con intervalos de areniscas y limolitas bien estratificadas de grano medio a fino de 0,5 metros de espesor, de color marrón y clastos principalmente andesíticos. La parte superior de esta unidad tiene un espesor promedio de 30-50 metros, de color verde oscuro y textura abigarrada, está compuesta de domos brechosos y fragmentados asociados a generalmente a tobas de lapilli y tobas brechosas no estratificadas. Los clastos son de composición andesítica con un promedio de 2-5 cm y en forma dispersa clastos de 10 a 30 cm, con peor selección hacia el techo; la masa fundamental es de similar composición. Al techo, la unidad es una toba de lapilli fina a media de unos pocos metros de espesor y de color verde, debido a una alteración clorítica, y localmente el techo de la unidad es un estrato superior a los 2 metros de espesor de tobas y tobas de lapilli que en algunos lugares gradan a rocas bien estratificadas de la Unidad 2a. El contacto superior de la Unidad 1 es relativamente plano con relieves locales de unos pocos metros.

Los productos lávicos de esta unidad tienen fenocristales de plagioclasa, hornblenda y biotita en una masa fundamental de plagioclasa. El moderadamente abundante feldespató potásico puede ser en una parte de origen hidrotermal. La presencia de fenocristales alterados de feldespato en muchas muestras sugiere que la roca es de una composición andesítica a andesítica latítica (Payne, 1995).

## **II.2.2 Unidad 2**

La Unidad 2 contiene 2 subunidades principales (Unidad 2a y 2b) que se relacionan a través de un cambio de facies. En general, cuando se encuentran juntas la Unidad 2a aparece bajo la Unidad 2b.

### **II.2.2.1 Unidad 2a (Manto Talcuna)**

El Manto Talcuna posee un espesor de 2 a 15 metros y consiste en tobas de lapilli de composición andesítica a andesita latítica bien estratificada (Figura II.4). Los fragmentos son predominantemente angulosos, bien seleccionados y afaníticos, con variaciones en el tamaño que van desde toba de lapilli fina a gruesa. La matriz está dominada por calcita, que es más abundante en las capas más seleccionadas. También, en la mayor parte del área de la mina Coca Cola 1, la matriz contiene una diseminación de bornita y/o calcopirita; la abundancia de minerales de cobre tiene fuerte correlación con el tamaño de fragmentos de la toba. Trabajos anteriores han subdividido esta subunidad en 3 niveles estratigráficos; “Manto Ilusión”, se encuentra en disconformidad con la Unidad 1, está formada por intercalaciones de tobas finas a medias, bien estratificadas, caracterizadas por su color verde a verde oscuro y termina en una capa fina con similares características llamada “Manto Intermedio”. Al techo, la subunidad es denominada “Manto Castellano” y está representada por tobas de lapilli, con fragmentos verde claro de tamaño 0.7 a 1.5 cm y con un espesor promedio de 2-4 metros.

### **II.2.2.2 Unidad 2b (Manto Delirio)**

El Manto Delirio tiene un espesor de hasta 60 metros, el cual disminuye hacia el Norte. Está constituido por flujos de andesita a andesita basáltica, que comúnmente posee márgenes amigdaloidales y localmente “pillows”, en general fuertemente amigdaloidales, y un distintivo flujo brechoso en el techo. Algunas secciones muestran secuencias alternadas de intervalos amigdaloidales y masivos, de un promedio de 1-3 metros de espesor. Las amígdalas están rellenas principalmente por calcita, siendo menos abundante clorita, cuarzo y ceolitas y, localmente, sulfuros de Cu (Figura II.5).





Figura II.4: Unidad 2a, Manto Talcuna. Secuencias de tobas de lapilli en una matriz de carbonatos.



Figura II.5: Unidad 2b, Manto Delirio, Lavas andesíticas amigdaloidales, amígdalas rellenas con calcopirita y bornita principalmente y calcita como ganga.

### **II.2.3 Unidad 3 (Manto de Manganeso)**

La Unidad 3 consiste en un nivel estratigráfico de unos pocos metros de potencia de limolitas y pizarras, de color negro y gris-amarillo a café oscuro, que comúnmente posee lentes o capas ricas en óxidos-hidróxidos de manganeso, las que pueden llegar a tener 20 cm de espesor. En algunas áreas, capas interdigitadas de tobas medias a gruesas y lapilli contienen minerales cobre diseminado, rocas que representan facies de transición entre las unidades 2 y 3. La unidad 3 representa el techo de la principal zona de mineralización de cobre en el distrito, representada por la Unidad 2.

### **II.2.4 Unidad 4**

La Unidad 4 es predominantemente sedimentaria clástica, con un espesor de hasta 30 metros, siendo mayores hacia el Sur. Está formada por areniscas medias a gruesas de color rojo-café a conglomerados con fragmentos heterolíticos de composición principalmente andesítico y, hacia su base, bloques y guijarros de la Unidad 2. En algunas áreas aflora un horizonte estratigráfico de 6 metros de espesor constituida por capas delgadas de limolitas y fangolitas amarillas a amarillas verduscas y, localmente, intervalos de capas amarillas de calizas y grises interdigitadas con areniscas finas. Comúnmente, cerca del techo, la Unidad presenta areniscas finas de 1 a 3 metros de espesor en planos estratificados lenticulares. Su color varía de un gris rojizo a un rojo parduzco.

### **II.2.5 Unidad 5**

La Unidad 5 contiene 2 subunidades estratigráficas. La inferior (Unidad 5a) es moderadamente similar a la Unidad 1, y la superior (Unidad 5b) es similar a la Unidad 2a.

### **II.2.5.1 Unidad 5a**

La Unidad 5a esta constituida por una serie de “plugs” y domos de pocos centenares de metros, que fueron emplazados en la superficie o cerca de ella. Los contactos con las rocas de la Unidad 4 son, en general, subverticales.



Figura II.6: Unidad 5b, en donde se muestra una textura compuesta principalmente por líticos de color café rojizo a verdes, en una matriz de carbonato.

### **II.2.5.2 Unidad 5b**

La Unidad 5b, llamada “Manto Superior” por Kamono y Boric (1982), tiene un espesor promedio de 3 a 5 metros, aunque llega a tener 20 metros. Esta Unidad consiste en una secuencia de tobas de lapilli, bien estratificadas, que en algunos lugares es similar en composición, textura y modo de origen a las rocas del “Manto Castellano” de la Unidad 2a (Figura II.6). La matriz comúnmente contiene abundante calcita y, localmente, sulfuros de Cu o minerales oxidados de cobre. El contacto con la Unidad 6 es gradacional, con intercalaciones con tobas retrabajadas en la base de dicha Unidad.

### **II.2.6 Unidad 6**

La Unidad 6 es una secuencia variable de tobas tamaño lapilli, guijas y guijarros, areniscas y, en forma menor, conglomerados, la mayor parte de ellas con hematita. Esta Unidad varía ampliamente en espesor siendo más potente hacia el Sur, sobrepasando los 100 metros. Posee niveles de alrededor de 3

metros en donde alternan rocas resistentes, que tienden a ser tobas finas a medias y areniscas, con una buena estratificación, con intervalos de peor estratificación, comúnmente constituidas por tobas gruesas a guijarrosas. En la parte Sur del distrito, esta Unidad está dominada por capas de calizas café claro a gris de aproximadamente 1 metro de espesor intercaladas en areniscas finas a medias y lentes de tobas y chert.

### **II.2.7 Unidad 7**

La unidad 7 corresponde a una secuencia de tobas latíticas cristalinas ricas en plagioclasas, masivas y de color rosado, tobas de lapilli cristalinas finamente estratificadas de color rojo oscuro y tobas gruesas mal estratificadas de color crema a gris claro, con conglomerados guijarrosos. Posee un espesor máximo aproximado de hasta 15 metros al Noreste del distrito y disminuye drásticamente al Sur llegando a estar ausente. En gran parte de la región el contacto es concordante sobre la Unidad 6, pero al Noreste, donde la ésta está ausente, cubre rocas de la unidad 5a.

### **II.2.8 Unidad 8**

La unidad 8 corresponde a un conglomerado mal estratificado, lenticular y de color café rojizo. Aflora en la parte Oeste y Sur del Cerro Tambor. Los clastos corresponden principalmente a andesitas porfíricas y contiene una cantidad moderada a abundante de guijarros y pocos bloques. Al sur del Cerro Tambor, los conglomerados poseen un grosor de 30 metros y al techo de esta Unidad existen intercalaciones de flujos andesíticos y basálticos brechosos, pertenecientes a la parte inferior de la unidad 9.

### **II.2.9 Unidad 9**

La Unidad 9 está compuesta por flujos y brechas de andesitas a andesitas basálticas. La parte inferior de la unidad está dominada por flujos brechosos de andesitas basálticas de color verde oscuro a negro y contiene fragmentos de

un tamaño promedio de 2-10 cm y localmente 50 cm en una matriz de 10-40% de calcita. Además de calcita, también aparece prehnita y mineralización supergena de Cu diseminada. Localmente, al Oeste del Cerro Tambor, esta Unidad es una toba fina mal estratificada de color verde oscuro con fragmentos en la matriz reemplazados fuertemente por calcita. Al techo, la Unidad es un flujo andesítico afanítico a ligeramente porfírico, lajado, de color gris claro, que meteorizado toma una textura fragmentada e irregular con un color crema gris.

### **II.2.10      Unidad 10**

En la cima del Cerro Tambor, se presenta un afloramiento de pocas decenas de metros de una caliza micrítica masiva de color café, que contiene parches de gruesos granos de calcita y remplazamiento fósil de naturaleza incierta (Payne 1995). Esta Unidad correspondería a la base de la Formación Viñita.

### **II.3 Rocas Intrusivas**

En la mayor parte de la región, cerca del contacto entre la Unidad 5b y la Unidad 6 se emplaza un sill andesítico a andesítico basáltico de 15 metros de grosor. Posee un núcleo afanítico a grano fino de 5 metros de espesor, de color verde claro a verde, en parte masivo y otras finamente lajado. Hacia la base, presenta una textura brechosa, la que puede ser delgada o encontrarse ausente y en otras partes la zona brechosa ocupa completamente el espesor del sill.

Una serie de diques ocurren también en la parte Este del Cerro Tambor y al Sur de la Quebrada Las Cañas. La mayoría de ellos presenta un manteo suave no superando los 15° al Sureste y un ángulo ligeramente mayor a la estratificación. Los diques son uniformes en composición y textura, de color verde oscuro a verde-amarillo claro, de grano fino a afaníticos. Los espesores promedio son de 5-7 metros y poseen un núcleo microdiorítico masivo englobado por una zona marginal de enfriamiento. Los diques subverticales presentan diversas orientaciones, las mas comunes son 060-090° y 030-045°, la mayoría son continuos, de núcleos masivos, su mineralogía consiste principalmente en plagioclasa como fenocristales y masa fundamental y no se reconocen máficos.

## **II.4 Geología Estructural**

El rasgo estructural más claro a escala geológica regional es un pliegue simétrico que domina el distrito denominado “Anticlinal Talcuna”, Figura II.1 (Aguirre y Egert, 1965). Este pliegue posee una orientación del eje axial NNW-SSE y un manteo promedio de 20° para ambos flancos, que tienen como consecuencia el basculamiento de diferentes bloques (Toledo, 2004).

El distrito se encuentra afectado por numerosas fallas de distintas características y variadas orientaciones, algunas controlan la mineralización hipógena y otras no controlan ningún tipo de mineralización.

En general las fallas que controlan la mineralización hipógena son fallas normales que poseen 2 rumbos preferenciales (Figura II.7). Fallas con rumbos N30°-40°W con manteos de 65°-85° al Noreste, con desplazamientos promedio de 15 m, espaciamientos promedio de 70 m y corridas reconocidas de hasta 1.000 m. Fallas NS con manteos de 65°-85° al Este y Oeste presentan desplazamientos menos importantes con una media de 1 m. El espaciamiento de estas fallas varía de 10 a 80 m y sus corridas alcanzan una longitud media de 60 m.

Las fallas que no controlan la mineralización hipógena son menos frecuentes y son de movimiento inverso. Los rumbos preferenciales son N85°E a N43°E con manteos entre los 18° y 20° al Sur. En estas fallas se han emplazado diques microdioríticos con una potencia media de 1m. También se reconocen sistemas de diaclasas con 3 rumbos preferenciales N75°/90, N25°E/45°NW, NS/20°E.

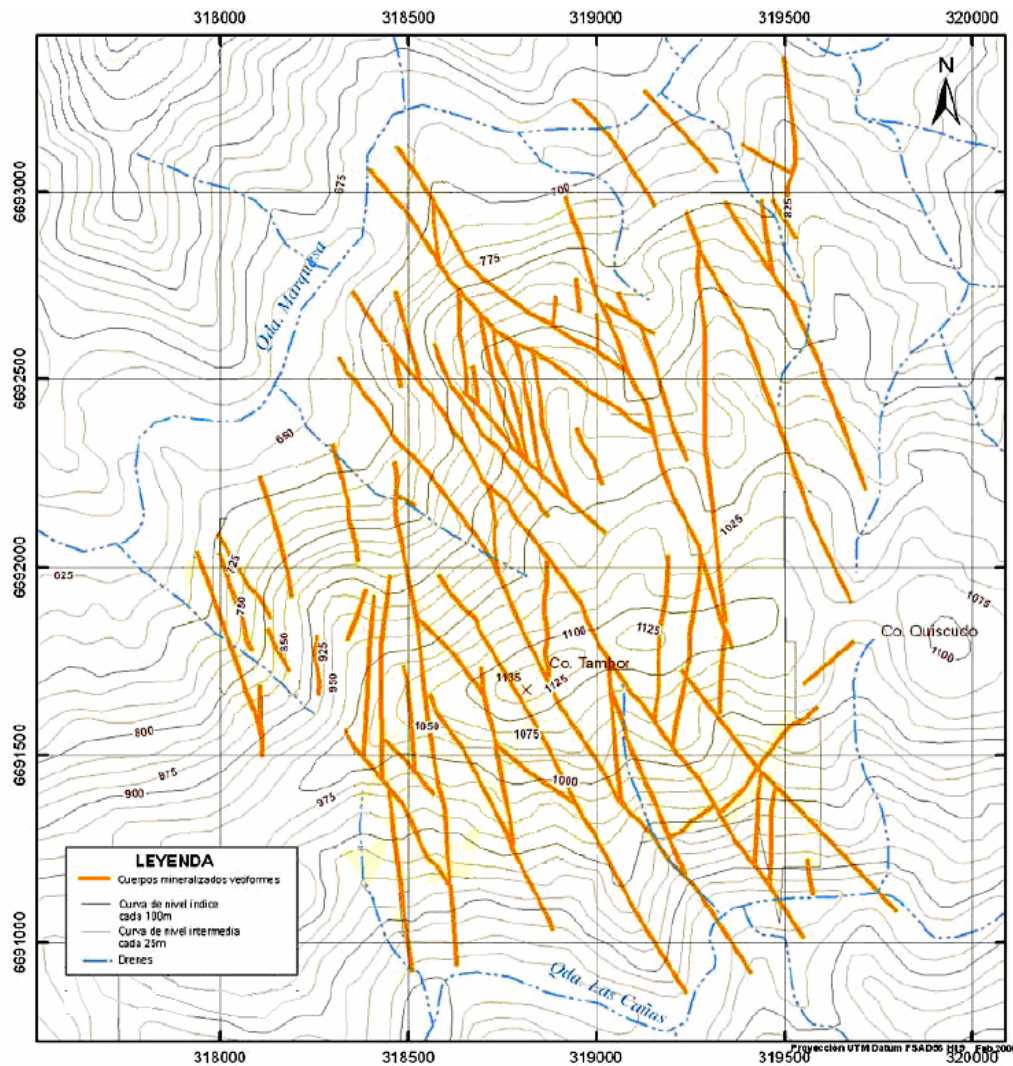


Figura II.7: Principales fallas que controlan la mineralización hipógena ubicadas en Cerro Tambor. (Marquardt et al 2008).

Salgado (2004), en base a características geométricas y cinemáticas, establece que existen dos episodios de deformación asociados a eventos de mineralización y un tercer evento postmineral. Conforme a este autor, los episodios de deformación - mineralización serían.

(I) Transcurrencia sinistral-normal. Tendría un carácter pre-mineral (probablemente sin-mineral) y sería el causante de la generación de las primeras fallas del Distrito. A este episodio le corresponde la formación de mineralización bandeada. Estas estructuras se habrían formado bajo un régimen transtensional de rumbo aproximado NS. Según Salgado (2004), las



estructuras que se formaron con rumbos cercanos a la dirección de compresión serían las más favorecidas por estar sometidas a máxima extensión presentando mejor desarrollo de mineralización de cobre.

(II) Fallamiento normal-dextral. Es el responsable de la generación de brechas hidrotermales y corta a la mineralización bandeada. Este episodio habría reactivado las estructuras formadas durante el primer evento, provocando una mayor extensión que es reflejado en la generación de brechas hidrotermales. Por lo tanto, las estructuras con mayor extensión son aquellas que presentan rumbos cercanos a NS. Por otro lado, como la dirección de máximo esfuerzo fue subvertical, las estructuras que presentan un mayor manteo tuvieron más extensión.

(III) Fallamiento dextral-normal. Claramente post-mineral, sería el episodio responsable de la generación de fallas y emplazamiento de diques. Aunque se desconoce una relación cronológica entre ambas estructuras, es probable que los diques sean posteriores, pues algunos han ocupado fallas pre-existentes para su emplazamiento.

## **II.5 Alteración y Mineralización**

La alteración hidrotermal en el distrito comúnmente es incipiente, y en general las rocas conservan las texturas ígneas primarias, por lo que no se diferencia del metamorfismo de muy bajo grado presente en las secuencias volcánico sedimentarias del Cretácico Inferior. Afecta tanto la masa fundamental de las rocas como los minerales y también se manifiesta en amígdalas, sheeted veins y brechas hidrotermales.

Se han reconocido dos tipos de alteración en el distrito, cloritización y albitización. La albitización afecta a todas las unidades del distrito, principalmente como reemplazo de feldspatos. La cloritización también está presente en todo el distrito, va desde un reemplazo incipiente a completo de la masa fundamental y fenocristales de las rocas y es más importante en las unidades mineralizadas. Los demás minerales de alteración reconocidos son: calcita, la más frecuente, está en el cemento y fragmentos de rocas clásticas y en amígdalas y vetillas; celadonita, en la matriz de rocas volcánoclasticas y en amígdalas; baritina, principalmente en vetillas; epidota, alterando a fenocristales (piroxeno, plagioclasa) y en las amígdalas de andesitas; sericita, en fenocristales de plagioclasa; y ceolitas, corresponde a analcima y está en el cemento, en los fragmentos de rocas volcánoclasticas y en las vetillas de las zonas mineralizadas. A pesar que la alteración no presenta una zonación o distribución, las unidades mineralizadas, en general, presentan una mayor cloritización.

La mineralización metálica del distrito se encuentra alojada en depósitos estratoligados y vetas bandeadas y brechosas (Figura II.8), siendo la mineralogía similar en los estilos de mineralización y está integrada principalmente por bornita, calcopirita, calcosina, galena, pirita, tetrahedrita y blenda, además de ocasional malaquita. La mineralización no presenta una zonación característica en los depósitos estratoligados y la cantidad de óxidos no es importante, además no existen evidencias de enriquecimiento secundario. En tanto las vetas se componen de sulfuros de cobre al interior de

la mina Coca Cola y mayoritariamente de minerales oxidados de cobre en superficie.

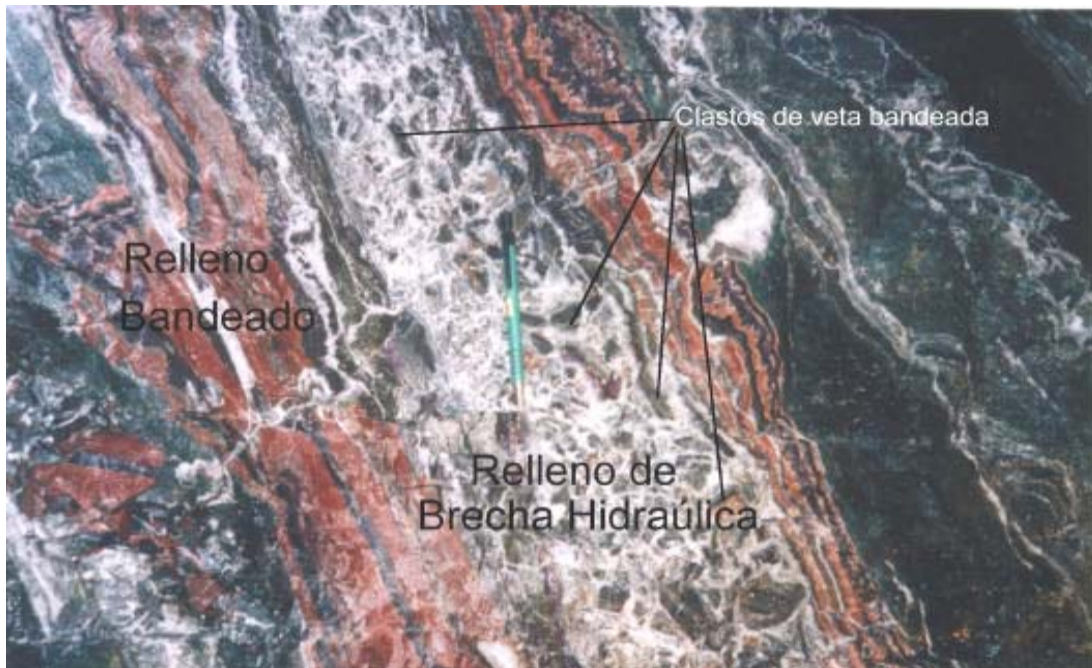


Figura II.8: Estilos de vetas presentes en el yacimiento Coca Cola 2, vetas con textura bandeada, compuestas de sulfuros de cobre, baritina y calcita, y brecha hidrotermal compuesta de sulfuros de cobre y calcita. Salgado (2004).

Los depósitos estratoligados corresponden a las unidades 2a y 2b. Estos niveles volcano-sedimentarios son de rumbo E-W y un manteo que va de una posición cercana a la horizontal hasta unos 20° tanto al sur como al norte. Los niveles no son homogéneos en cuanto a la distribución de la mineralización metálica y esto se debe principalmente a diferencia de receptividad que existe entre los componentes de este estrato, siendo la mineralización más rica en las capas de grano más grueso, que en las capas de grano más fino.

Los depósitos vetiformes se formaron por la precipitación de fluidos hidrotermales que ascendieron por fallas normales y transcurrentes, las orientaciones preferenciales son N50°W-S50°E a N10°E-S10°W y los manteos son cercanos a la vertical, en general son estrechas, con potencia que no exceden los 2 m, pero es común la presencia de vetas menores sub-paralelas y vetillas de algunos centímetros, las que en conjunto forman un cuerpo

mineralizado de 10-20m. Peebles (1966) separa a las vetas en dos grupos, de acuerdo con su relleno. Vetas que han relleno fracturas muy brechizadas, en donde la mineralización de mena y ganga se presenta rodeando los fragmentos de una brecha. Los minerales de mena son principalmente calcopirita y bornita y, en menor grado, calcosina y galena, la ganga es principalmente calcita. Vetas de relleno de fisuras, en las cuales los minerales se han depositado en forma simétrica en las paredes de las fracturas, observándose un conjunto de bandas compuestas por calcita y baritina. Los minerales de mena son bornita, calcopirita y galena, con menores contenidos de calcosina. En superficie las vetas son de centímetros y contienen una mineralización que consiste en malaquita, azurita y linarita (Cucurella, 2006), asociadas con calcita y en menor proporción sulfuros de cobre, que pone en evidencia el efecto de una alteración supergena.

Cucurella (2006) a través del estudio de secciones en vetas, reconoce al menos cuatro fases de mineralización que se suceden en el tiempo; en la primera etapa abundante pirita, entrecrecida con galena, escasa arsenopirita y abundante magnetita, la pirita es reemplazada por calcopirita I dominante, la cual está entrecrecida con bornita y esfalerita (Figura II.9); esta última es abundante y reemplaza a la pirita. La segunda etapa incluye bornita dominante, que reemplaza a la calcopirita I y está entrecrecida con calcosina y calcopirita II (Figura II.10). La tercera etapa está definida por tetraedrita-tenantita que reemplaza calcopirita I y pirita. Una cuarta etapa representada por la asociación de digenita dominante, djurleita, covelina en exsolución con digenita que reemplazan a la bornita, destacando en esta última etapa la presencia de plata nativa.

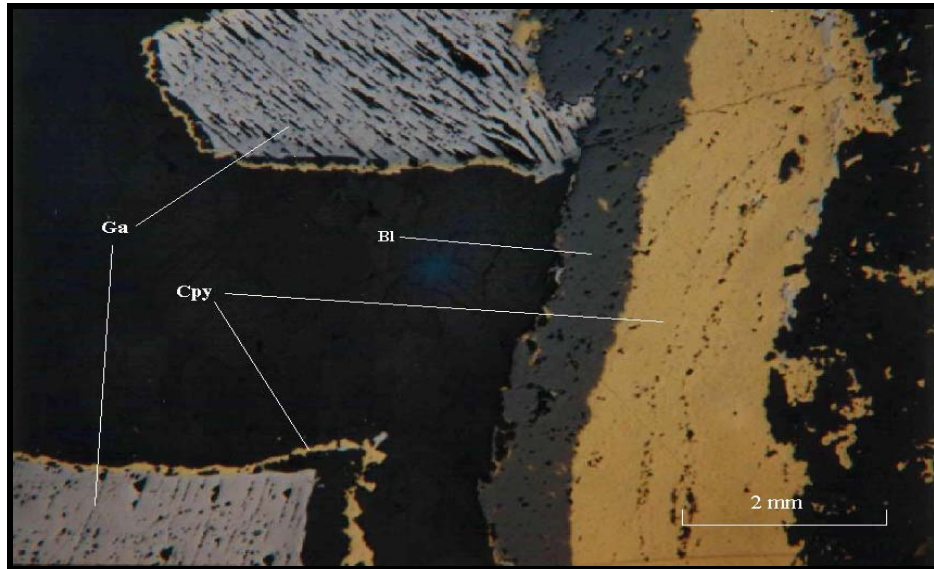


Figura II.9: Galena (Ga), rodeada de calcopirita (Cpy) e intercrecimiento simple entre calcopirita y esfalerita (Bl). Observación con microscopio de luz reflejada. N //. 20X (Toledo 2004).

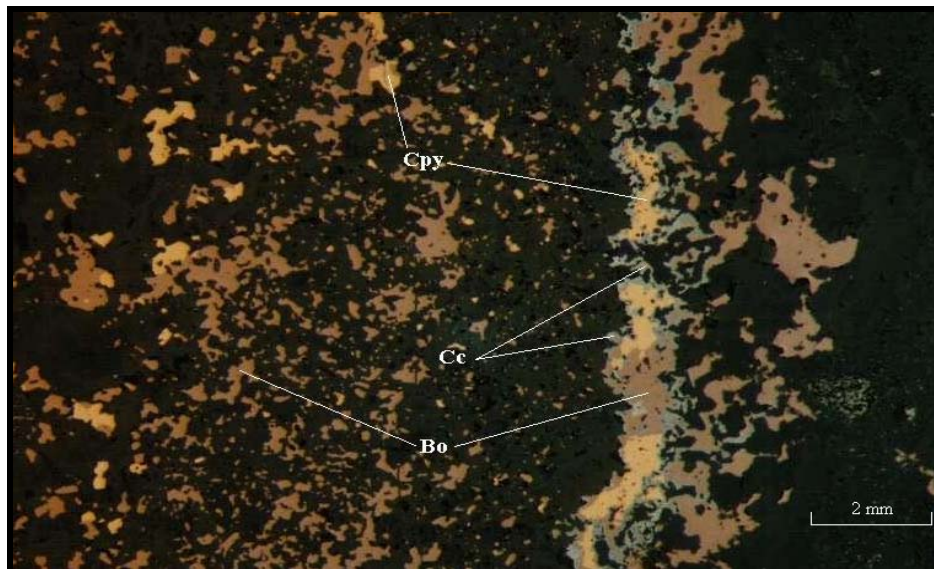


Figura II.10: Vetilla de calcopirita (Cpy) en entrecrecimiento simple con bornita (Bo) y reemplazo de calcosina (Cc) y diseminada calcopirita y bornita. Observación con microscopio de luz reflejada. N //. 10X (Toledo 2004).

## **Capítulo III. Geoquímica del Distrito Minero Talcuna**

### ***III.1 Generalidades***

Los estudios litogeoquímicos nos permiten caracterizar con mayor precisión la estratigrafía química, determinar grados y tipos de alteración en las rocas y encontrar elementos trazadores geoquímicos de mineralización. El estudio geoquímico del Distrito Minero Talcuna está basado en el análisis unidades de estratigráficas y ocurrencias minerales en el Cerro Tambor. El término ocurrencia mineral hace referencia a mantos mineralizados o a vetas y vetillas, cuyos datos son analizados en forma separada dentro de este capítulo.

En una primera parte se realizó una caracterización geoquímica de las unidades litoestratigráficas del Cerro Tambor mediante análisis multielementales que incluyen 33 elementos. Para ello se realizó un muestreo de mano a cada unidad cuidando que no exhiban mineralización evidente. Además, este estudio es un aporte en la comprensión en la movilidad de los elementos dentro del Distrito producida durante la mineralización y procesos de metamorfismo.

La segunda parte de este capítulo se basa en el análisis de muestras de ocurrencias minerales obtenidas en el interior de la mina y en superficie. Los análisis se basan en estudios petrográficos, análisis multielementales y de difracción de rayos X. El objetivo de esta parte del trabajo es obtener información con respecto a la movilidad de los elementos a lo largo de la evolución del sistema mineralizado y encontrar minerales asociados a la alteración y mineralización existente.

### ***III.2 Caracterización Litogeoquímica de las unidades del Cerro Tambor***

Identificar la textura y mineralogía de las rocas muchas veces resulta complicado debido a que estas características quedan oscurecidas por procesos de alteración y metamorfismo, por lo que determinar la identidad geoquímica de las diferentes unidades resulta una herramienta útil para identificar la estratigrafía.

Para la realización del estudio geoquímico de las unidades litoestratigráficas del Distrito minero se realizó un análisis multielemental a 92 muestras, cuya ubicación se observa en la Figura III.1. Para establecer qué elementos a utilizar en la caracterización, se realizó un chequeo de integridad de datos, es decir, que para cada elemento, por lo menos el 50% de las muestras tengan valores sobre el límite de detección. De los 33 elementos analizados mediante ICP-AES, 12 no cumplen esta condición (Ag, Bi, Ga, Cd, La, Mo, Sb, Th, Tl, U, W) por lo que no serán tomados en cuenta dentro de la caracterización geoquímica.

La caracterización geoquímica de las unidades del Cerro Tambor está basada principalmente en un estudio comparativo de elementos. En una primera parte se establecerán las características geoquímicas de las unidades litoestratigráficas. En una segunda etapa se determinará cuales fueron los elementos aportados, removidos y cuáles pueden ser considerados como inertes en el curso de las transformaciones minerales provocadas por la alteración y mineralización.

Para realizar el estudio anteriormente mencionado, dos enfoques diferentes han sido utilizados. (1) Diagramas de normalización con relación a una muestra lo más fresca y representativa posible. La comparación de las muestras revela el aporte, empobrecimiento o inmovilidad de los elementos químicos. (2) Diagramas de dispersión y matrices de correlación, en los que se comparan

dos elementos (teóricamente conservativos) correspondientes a un conjunto de muestras de una serie cogenética de rocas. Según Grant (1986) y Maclean (1990), si estos elementos se encuentran bien correlacionados, se dice que se comportan de manera conservativa.

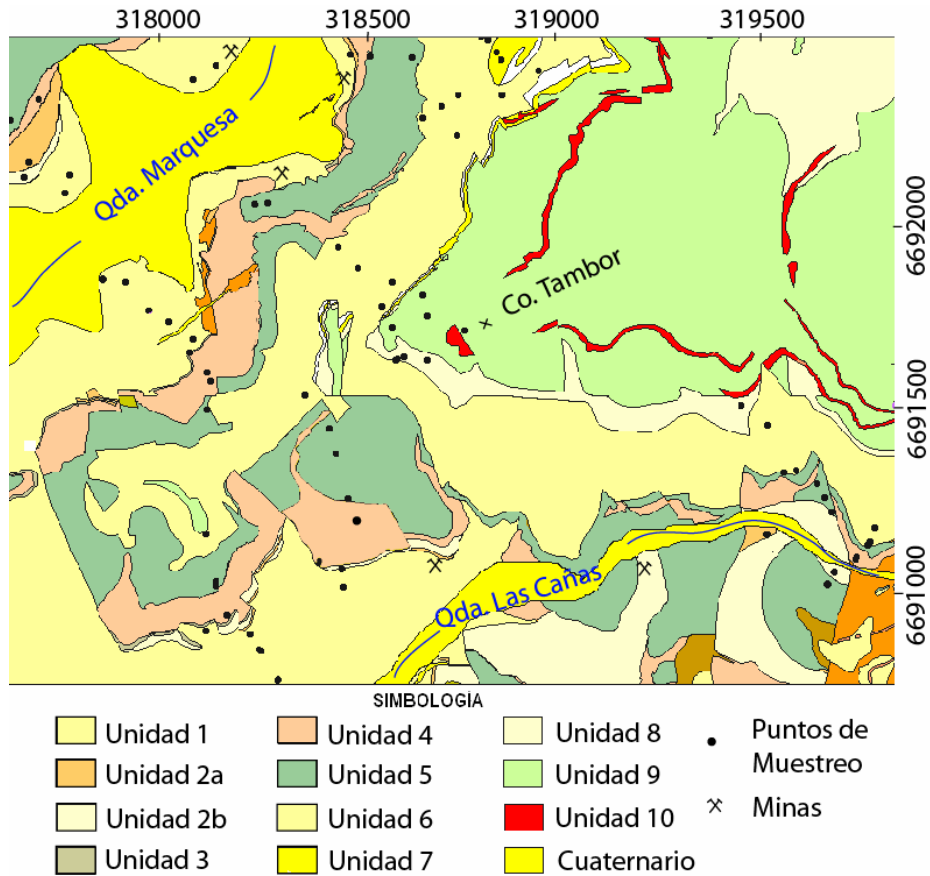


Figura III.1: Mapa geológico de la zona de estudio simplificado de Payne (1995) con la ubicación de los puntos de muestreo para geoquímica de unidades sin mineralización.



### **III.2.1 Diagramas de normalización**

Los diagramas de normalización establecen de manera comparativa el enriquecimiento o empobrecimiento de elementos, los que en caso de existir cambios volumétricos de las rocas no son totalmente representativos. El ideal es utilizar rocas de la misma mineralogía primaria y composición química. Para su realización, se utilizó una muestra de roca volcánica, sin alteración, libre de calcita y vesículas de la Formación Quebrada Marquesa (Muestra ARQ009), analizada en el trabajo de Morata y Aguirre (2003). La inducción de error producida por no ser una roca de la misma formación no debería representar un problema mayor, debido a que el volcanismo Cretácico Inferior es bastante homogéneo en la zona central y centro-norte de Chile (Vergara et al. 1995, Morata y Aguirre, 2003).

Los elementos químicos exhiben globalmente dos tipos de comportamiento sobre los diagramas de normalización (Figuras III.2, III.3 y III.4). Un primer grupo de elementos presenta variaciones importantes mientras que un segundo es relativamente constante. Teniendo como hipótesis que las rocas en cada unidad pertenecen a la misma serie magmática, las variaciones observadas para el primer grupo de elementos químicos serán interpretadas como fenómenos post-magmáticos. Los elementos del segundo grupo estarán considerados como inmóviles en el curso de alteraciones, pero se reconocerá la existencia de empobrecimientos o aportes a cada unidad.

El primer grupo de elementos está constituido por elementos comúnmente móviles, tales como, Ba, Na, Ca, K, Mg, Mn, Pb y Zn, y metales de transición como lo son Co, Cr, Cu y Ni, de los cuales se pueden distinguir aquellos que varían en forma sistemática en cada una de las unidades estudiadas y los que varían de manera singular en algunas de ellas. Dichas variaciones sistemáticas hacen referencia a la posible evolución del sistema hidrotermal que produce la alteración en la zona de estudio y la movilidad de los elementos, lo que será

discutido más adelante, mientras que las variaciones singulares representan características únicas reflejo de las condiciones originales de las unidades.

Los elementos que presentan un comportamiento sistemático corresponden a elementos relacionados a mineralización tales como el Co, Cu, Pb y Zn y a alteración como es el caso de K y Mg, los que muestran una tendencia general a disminuir su concentración a medida que se asciende en la columna estratigráfica. El Co se presenta constante en las unidades inferiores, mientras que desde la Unidad 4 en adelante se presenta concentraciones variables con tendencia a estar empobrecido teniendo los menores valores en las unidades 5 y 6. El Cu se encuentra enriquecido de forma variable en la mayoría de las unidades, especialmente en las unidades inferiores hasta la Unidad 5, donde presenta concentraciones variables; la mayor concentración se observa en la unidad 2a. Los contenidos de Pb son variables en las diferentes unidades, con altas concentraciones en las unidades inferiores especialmente en la Unidad 2, exhibe empobrecimientos importantes desde la Unidad 6, para estar en bajas concentraciones en las unidades superiores. El Zn se presenta muy enriquecido en las unidades inferiores, particularmente en la unidad 1. Este comportamiento se mantiene hasta la Unidad 4 en la que se observan los primeros empobrecimientos, de manera muy variable en las unidades medias para terminar empobrecido en la zona superior. El K se presenta en bajas concentraciones en todas las unidades con una tendencia a disminuir en las unidades intermedias. Un comportamiento similar lo presenta el Mg.

De los elementos que no presentan un comportamiento sistemático a lo largo de la columna estratigráfica se pueden diferenciar aquellos que ostentan comportamientos variables dentro de las unidades y los que se presentan variables a lo largo de la columna estratigráfica, así como aquellos que presentan anomalías particulares en ciertas unidades. El Ba se presenta de en concentraciones variables en la mayoría de las unidades excepto en las unidades 2b y 3, presentando un ligero enriquecimiento en la última, y mostrando un comportamiento netamente empobrecido desde la Unidad 6 en

adelante. El Ca se encuentra variable en la mayor parte de las unidades, observándose ligeramente empobrecido en las unidades 1, 4, 8 y 9. El Cr se presenta variable en diferentes medidas en la mayoría de las unidades, especialmente en las unidades 2a, 5 y 6 y en altas concentraciones en las unidades 2b, 8 y 9. El Mn se presenta variable en gran parte de las unidades con una alta concentración en la Unidad 3 y un empobrecimiento en las unidades 8 y 9. El Mo presenta pequeñas variaciones en casi todas las unidades, la mayoría de las veces más empobrecido, como las unidades 2a y 8. Los valores más altos se encuentran en la Unidad 3. El Na presenta pequeñas variaciones en todas las unidades sin presentar un comportamiento claro a lo largo de éstas. El Ni tiene un comportamiento variable en la mayoría de las unidades, con enriquecimiento en las unidades 2b, 8 y 9. Un comportamiento similar presenta el P, enriquecido levemente en la Unidad 9. El Fe y Sr se encuentran empobrecidos en todo el sector de manera variable.

Los elementos que presentan un comportamiento relativamente constante corresponden a Al, Be, Co, Sc, Ti y V, la mayoría de ellos empobrecidos.

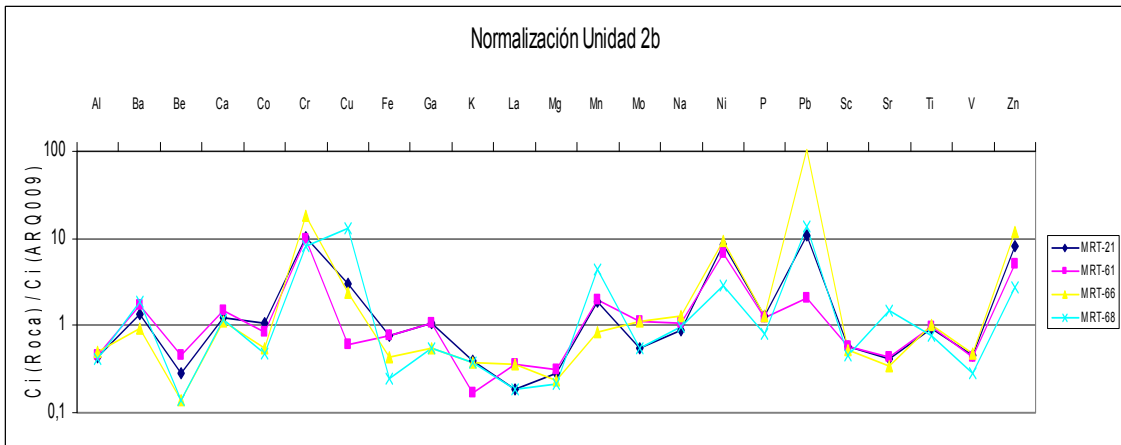
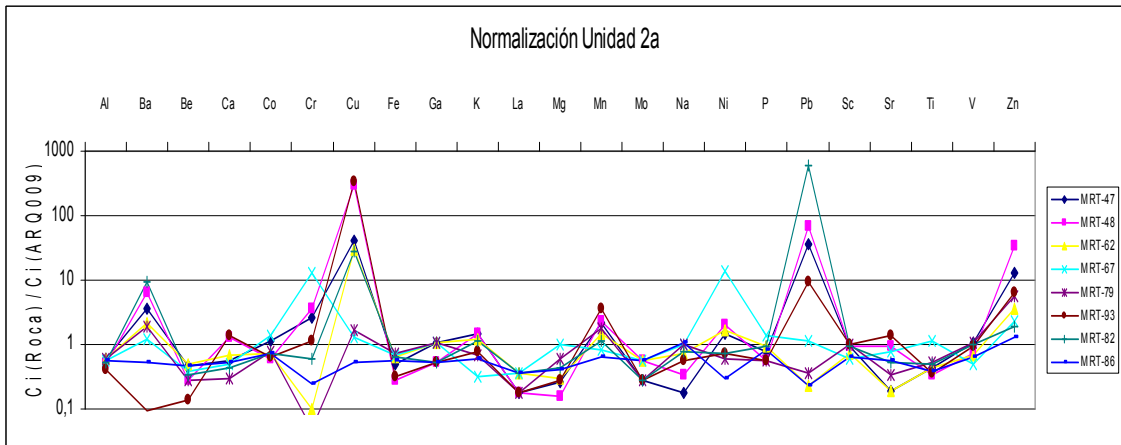
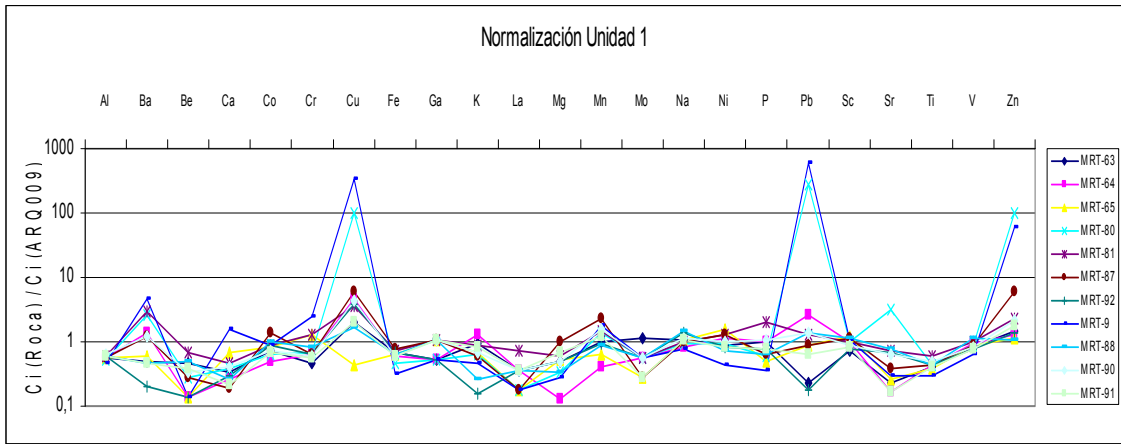


Figura III.2: Diagramas de normalización para rocas de la Unidad 1, Unidad 2a y Unidad 2b, muestra de referencia ARQ009 ( $C_i$  = concentración en elemento i).

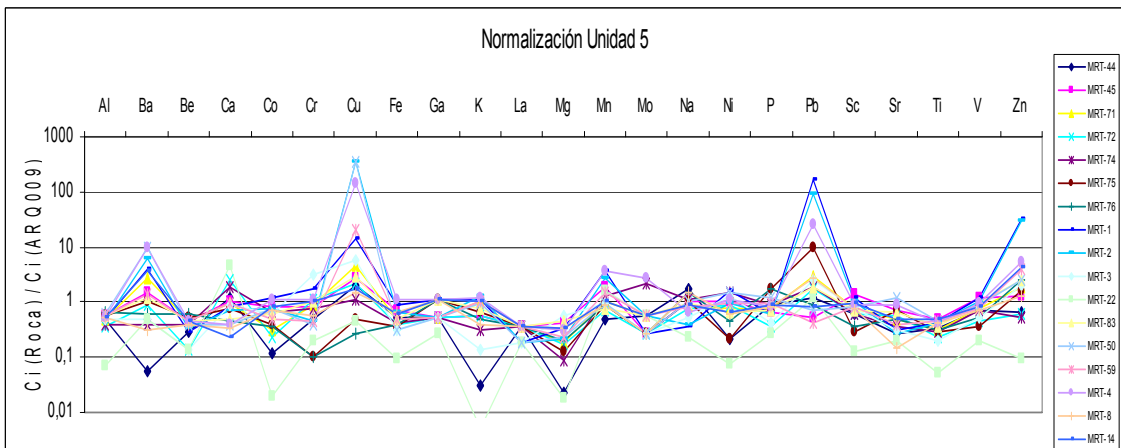
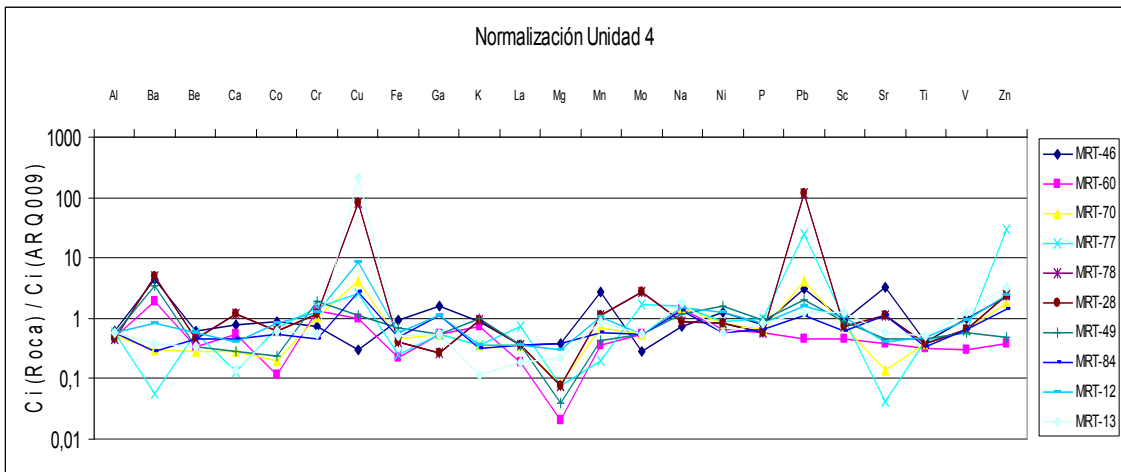
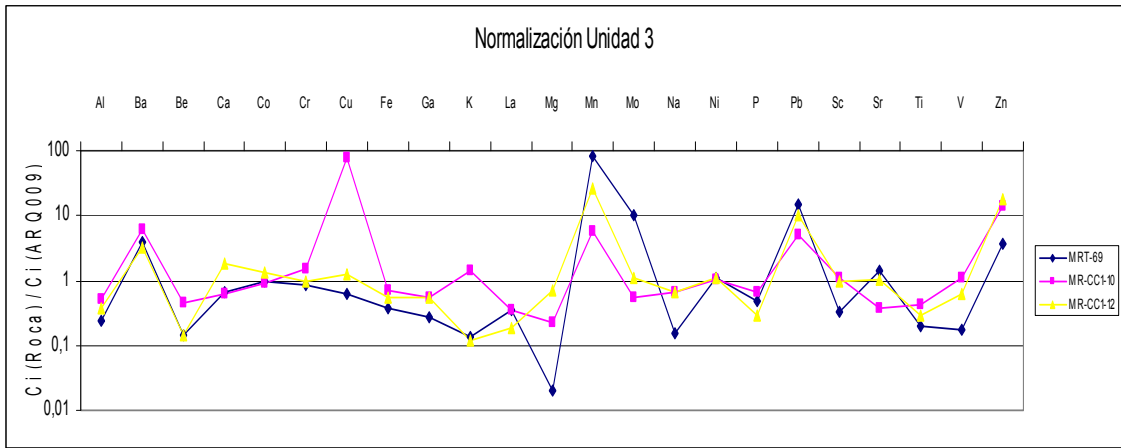


Figura III.3: Diagramas de normalización para rocas de la Unidad 3, Unidad 4 y Unidad 5, muestra de referencia ARQ009 ( $C_i$  = concentración en elemento  $i$ ).

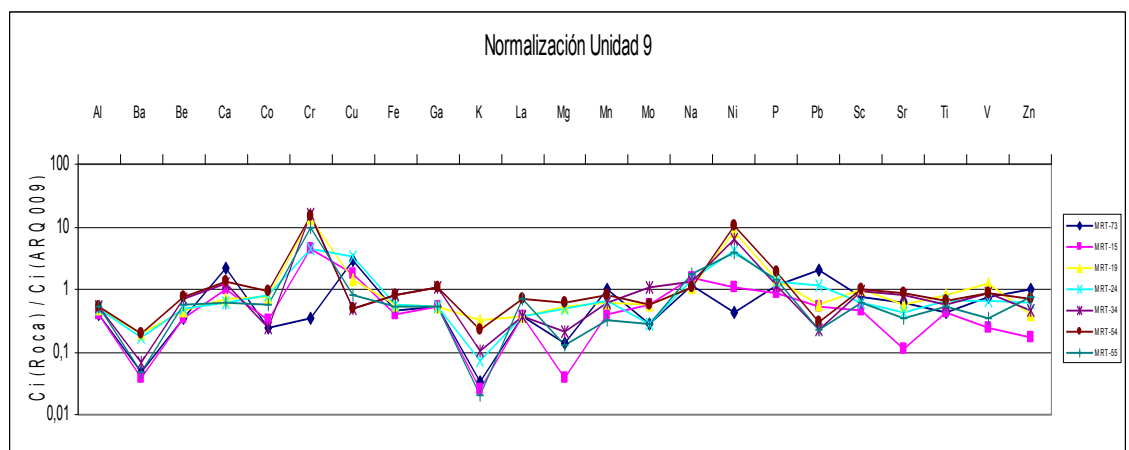
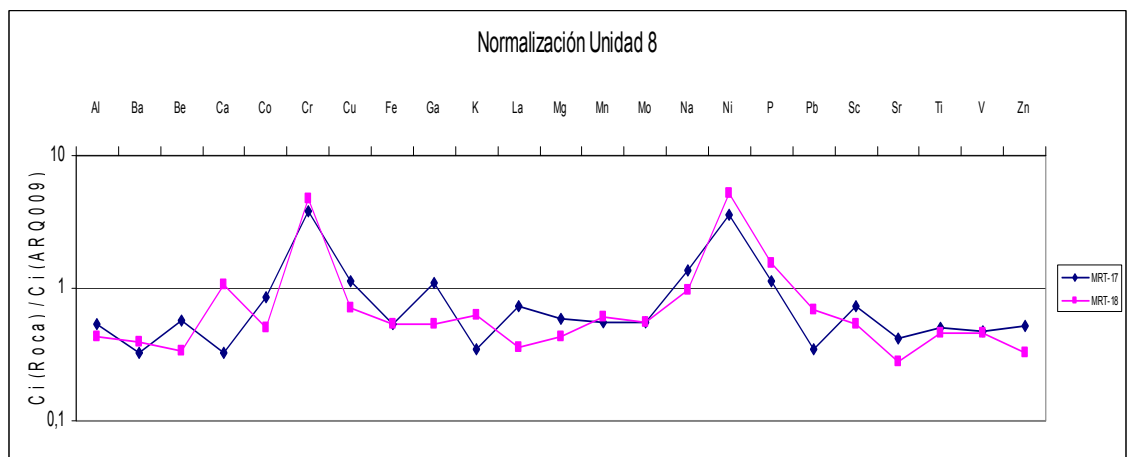
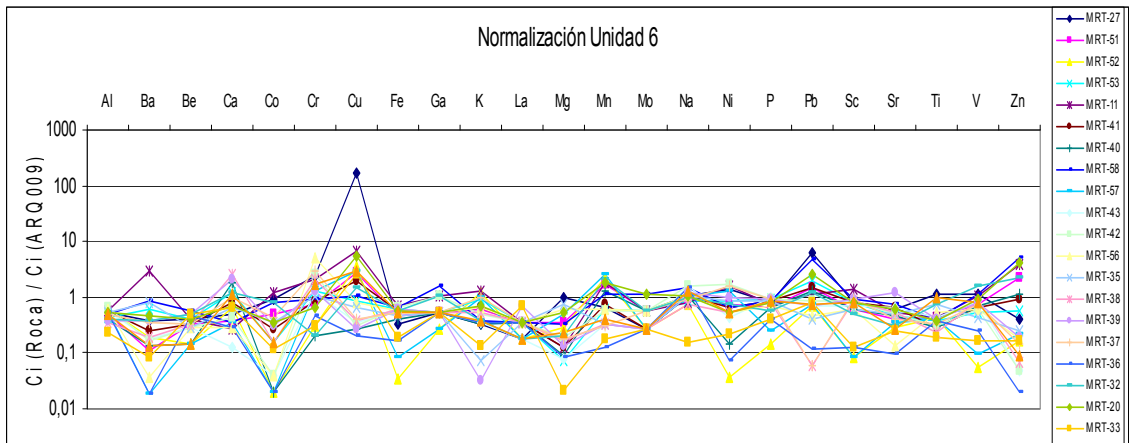


Figura III.4: Diagramas de normalización para rocas de la Unidad 6, Unidad 8 y Unidad 9, muestra de referencia ARQ009 (Ci = concentración en elemento i).

En general, los diagramas de normalización muestran un comportamiento sistemático en las concentraciones de ciertos elementos, las que tienden a disminuir a medida que asciende la columna estratigráfica. Es el caso de elementos propios de mineralización metálica y comunes elementos trazadores geoquímicos de mineralización en yacimientos de Cu tales como Pb, Zn y el mismo Cu. Lo mismo ocurre con el K, posiblemente reflejo de una disminución en la alteración asociada a la mineralización. También es posible reconocer, en algunas unidades, elementos anómalamente enriquecidos con respecto a los contenidos de la muestra ARQ-009. Sin embargo, la mayoría de los elementos se encuentran en forma variable en gran parte de las unidades. Igualmente es posible reconocer empobrecimientos generalizados de algunos elementos en la mayor parte de las unidades, características probablemente efecto de cambios volumétricos en las rocas. Los elementos que se comportan de modo menos móvil son estudiados a continuación con el objeto de establecer posibles caracterizaciones en las unidades.

### III.2.2 Matrices de correlación

Las matrices de correlación tienen como finalidad establecer la movilidad de los elementos dentro de cada unidad. Para ello se comparan elementos (teóricamente conservativos) correspondientes a un conjunto de muestras de una serie cogenética de rocas (Grant, 1986 y Maclean, 1990), si se encuentran bien correlacionados, se dice, que se comportan de manera conservativa.

Por sus características geoquímicas, y por los minerales en los cuales estos se albergan existe una serie de elementos que son considerados como inmóviles durante procesos de alteración. Estos son los llamados HFSE (*High Field Strength Element*). En este grupo se incluyen todas las tierras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) además de Sc, Y, Th, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta y P. Aparte de de estos elementos el V, Ni, Co y Cr pueden ser considerados también como inmóviles (Rollinson, 1993)

Como ya se había establecido previamente, dos elementos teóricamente inmóviles efectivamente se comportan de manera conservativa si existe una alta correlación entre ellos es decir, se comportarán de manera lineal. Según Maclean y Barret (1993), un par de elementos pueden ser considerados como inmóviles cuando presentan una correlación entre 0.99 y 0.90.

Se analizaron los elementos considerados tradicionalmente como conservativos y los elementos que no presentan una gran variación en los diagramas de normalización realizados anteriormente. Éstos elementos corresponden al Al, Ba, Co, Cr, Ni, Fe, P, Sc, Sr, V y Ti. Debido al tratamiento estadístico de los datos, no se han considerado en esta clasificación, por el bajo número de muestras la Unidad 3, la Unidad 7 y la Unidad 8. En las Tablas III.1 a III.4 se presentan las correlaciones entre los elementos anteriormente mencionadas para las diferentes unidades estudiadas.



UNIDAD 1

	Al	Ba	Co	Cr	Fe	Ni	P	Sc	Sr	Ti	V
Al	1,00	-0,65	0,04	-0,65	0,68	0,27	0,48	-0,31	-0,22	0,60	0,41
Ba	-0,65	1,00	-0,03	0,80	-0,68	-0,26	0,07	0,32	0,25	-0,05	-0,34
Co	0,04	-0,03	1,00	0,13	0,43	0,13	-0,11	0,48	-0,18	0,08	0,15
Cr	-0,65	0,80	0,13	1,00	-0,61	-0,24	-0,16	0,47	-0,13	-0,36	-0,36
Fe	0,68	-0,68	0,43	-0,61	1,00	0,59	0,47	-0,09	-0,33	0,57	0,44
Ni	0,27	-0,26	0,13	0,13	0,59	1,00	0,36	0,40	-0,04	0,49	0,36
P	0,48	0,07	-0,11	-0,16	0,47	0,36	1,00	-0,23	-0,07	0,89	0,29
Sc	-0,31	0,32	0,48	0,47	-0,09	0,40	-0,23	1,00	0,03	-0,08	0,37
Sr	-0,22	0,25	-0,18	-0,36	-0,33	-0,04	-0,07	0,03	1,00	0,21	0,15
Ti	0,60	-0,05	0,08	-0,36	0,57	0,49	0,89	-0,08	0,21	1,00	0,47
V	0,41	-0,34	0,15	-0,36	0,44	0,36	0,29	0,37	0,15	0,47	1,00

UNIDAD 2a

	Al	Ba	Co	Cr	Fe	Ni	P	Sc	Sr	Ti	V
Al	1,00	-0,02	0,41	-0,05	0,76	0,06	0,31	-0,34	-0,97	0,19	0,07
Ba	-0,02	1,00	-0,30	-0,22	-0,09	-0,29	-0,02	0,21	-0,17	-0,26	0,19
Co	0,41	-0,30	1,00	0,78	0,42	0,78	0,71	-0,61	-0,27	0,81	-0,30
Cr	-0,05	-0,22	0,78	1,00	0,08	0,97	0,71	-0,72	0,21	0,88	-0,72
Fe	0,76	0,42	0,42	0,08	1,00	0,26	0,55	-0,40	-0,68	0,52	0,04
Ni	0,06	-0,29	0,78	0,97	0,26	1,00	0,81	-0,82	0,12	0,94	-0,76
P	0,31	-0,02	0,71	0,71	0,55	0,81	1,00	-0,89	-0,22	0,85	-0,60
Sc	-0,34	0,21	-0,61	-0,72	-0,40	-0,82	-0,89	1,00	0,20	-0,75	0,84
Sr	-0,97	-0,17	-0,27	0,21	-0,68	0,12	-0,22	0,20	1,00	-0,01	-0,22
Ti	0,19	-0,26	0,81	0,88	0,52	0,94	0,85	-0,75	-0,01	1,00	-0,57
V	0,07	0,19	-0,30	-0,72	0,04	-0,76	-0,60	0,84	-0,22	-0,57	1,00

Tabla III.1 Correlaciones entre elementos teóricamente inmóviles para las unidades 1 y 2a. En rojo valores de correlación  $r > 0,9$ , en amarillo  $r > 0,8$  y azul  $r > 0,7$ .

UNIDAD 2b

	Al	Ba	Co	Cr	Fe	Ni	P	Sc	Sr	Ti	V
Al	1,00	-0,93	-0,07	-0,38	0,07	-0,40	-0,24	0,75	-0,45	-0,63	0,90
Ba	-0,93	1,00	-0,07	0,23	-0,10	0,20	0,07	-0,73	0,54	0,52	-0,90
Co	-0,07	-0,07	1,00	-0,15	0,91	0,30	0,49	0,58	-0,59	0,08	0,38
Cr	-0,38	0,23	-0,15	1,00	-0,06	0,89	0,76	-0,49	-0,28	0,91	-0,38
Fe	0,07	-0,10	0,91	-0,06	1,00	0,36	0,60	0,67	-0,76	0,18	0,47
Ni	-0,40	0,20	0,30	0,89	0,36	1,00	0,96	-0,22	-0,53	0,92	-0,20
P	-0,24	0,07	0,49	0,76	0,60	0,96	1,00	0,06	-0,73	0,82	0,03
Sc	0,75	-0,73	0,58	-0,49	0,67	-0,22	0,06	1,00	-0,69	-0,50	0,95
Sr	-0,45	0,54	-0,59	-0,28	-0,76	-0,53	-0,73	-0,69	1,00	-0,24	-0,70
Ti	-0,63	0,52	0,08	0,91	0,18	0,92	0,82	-0,50	-0,24	1,00	-0,52
V	0,90	-0,90	0,38	-0,38	0,47	-0,20	0,03	0,95	-0,70	-0,52	1,00

UNIDAD 4

	Al	Ba	Co	Cr	Fe	Ni	P	Sc	Sr	Ti	V
Al	1,00	-0,10	0,61	-0,50	0,53	0,47	0,27	0,65	0,34	0,61	0,45
Ba	-0,10	1,00	0,17	0,06	0,45	0,52	-0,31	-0,04	0,59	0,05	-0,08
Co	0,61	0,17	1,00	-0,47	0,44	0,27	0,20	0,66	0,51	0,49	0,63
Cr	-0,50	0,06	-0,47	1,00	-0,25	0,26	0,46	-0,27	-0,45	-0,18	-0,48
Fe	0,53	0,45	0,44	-0,25	1,00	0,64	0,16	0,39	0,74	0,32	0,56
Ni	0,47	0,52	0,27	0,26	0,64	1,00	0,25	0,38	0,26	0,53	0,06
P	0,27	-0,31	0,20	0,46	0,16	0,25	1,00	0,44	-0,14	0,27	0,32
Sc	0,65	-0,04	0,66	-0,27	0,39	0,38	0,44	1,00	0,06	0,92	0,79
Sr	0,34	0,59	0,51	-0,45	0,74	0,26	-0,14	0,06	1,00	-0,09	0,34
Ti	0,61	0,05	0,49	-0,18	0,32	0,53	0,27	0,92	-0,09	1,00	0,59
V	0,45	-0,08	0,63	-0,48	0,56	0,06	0,32	0,79	0,34	0,59	1,00

Tabla III.2 Correlaciones entre elementos teóricamente inmóviles para las unidades 2b y 4. En rojo valores de correlación  $r > 0,9$ , en amarillo  $r > 0,8$  y azul  $r > 0,7$ .

UNIDAD 5

	Al	Ba	Co	Cr	Fe	Ni	P	Sc	Sr	Ti	V
Al	1,00	0,22	0,39	0,01	0,37	0,21	0,65	0,38	0,46	0,70	0,45
Ba	0,22	1,00	0,62	-0,01	0,46	0,48	0,02	0,42	0,64	0,47	0,51
Co	0,39	0,62	1,00	0,35	0,76	0,71	-0,05	0,74	0,30	0,68	0,79
Cr	0,01	-0,01	0,35	1,00	0,17	0,53	-0,50	0,35	-0,14	-0,09	0,19
Fe	0,37	0,46	0,76	0,17	1,00	0,34	-0,08	0,70	0,12	0,68	0,76
Ni	0,21	0,48	0,71	0,53	1,00	0,34	-0,23	0,62	0,28	0,35	0,24
P	0,65	0,02	-0,05	-0,50	-0,08	1,00	0,37	-0,30	0,35	1,00	0,82
Sc	0,38	0,42	0,74	0,35	0,70	0,62	0,37	1,00	0,17	0,78	0,91
Sr	0,46	0,64	0,30	-0,14	0,12	0,28	0,23	0,17	1,00	0,35	0,24
Ti	0,70	0,47	0,68	-0,09	0,68	0,38	0,23	0,78	0,35	1,00	0,82
V	0,45	0,51	0,79	0,19	0,76	0,60	-0,15	0,91	0,24	0,82	1,00

UNIDAD 6

	Al	Ba	Co	Cr	Fe	Ni	P	Sc	Sr	Ti	V
Al	1,00	0,33	0,42	0,23	0,80	0,25	0,83	0,77	0,51	0,85	0,58
Ba	0,33	1,00	0,73	0,07	0,39	0,41	0,22	0,60	0,23	0,39	0,32
Co	0,42	0,73	1,00	0,04	0,37	0,47	0,24	0,57	0,29	0,42	0,69
Cr	0,23	0,07	0,04	1,00	0,35	0,47	0,38	0,40	-0,08	0,46	0,10
Fe	0,80	0,39	0,37	0,35	1,00	0,35	0,87	0,88	0,49	0,90	0,69
Ni	0,25	0,41	0,47	0,47	0,35	1,00	0,39	0,53	0,29	0,46	0,25
P	0,83	0,22	0,24	0,38	0,87	0,39	1,00	0,84	0,55	0,94	0,54
Sc	0,77	0,60	0,57	0,40	0,88	0,53	0,84	1,00	0,58	0,94	0,65
Sr	0,51	0,23	0,29	-0,08	0,49	0,29	0,55	0,58	1,00	0,57	0,38
Ti	0,85	0,39	0,42	0,46	0,90	0,46	0,94	0,94	0,57	1,00	0,63
V	0,58	0,32	0,69	0,10	0,69	0,25	0,54	0,65	0,38	0,63	1,00

Tabla III.3 Correlaciones entre elementos teóricamente inmóviles para las unidades 5 y 6. En rojo valores de correlación  $r > 0,9$ , en amarillo  $r > 0,8$  y azul  $r > 0,7$ .

UNIDAD 9

	Al	Ba	Co	Cr	Fe	Ni	P	Sc	Sr	Ti	V
Al	1,00	0,55	0,38	0,13	0,55	0,16	0,54	0,20	0,20	0,26	0,03
Ba	0,55	1,00	0,37	-0,18	-0,03	0,01	0,46	-0,19	0,14	0,06	-0,22
Co	0,38	0,37	1,00	-0,12	0,51	0,12	-0,20	0,63	0,09	<b>0,77</b>	0,59
Cr	0,13	-0,18	-0,12	1,00	0,16	<b>0,93</b>	0,22	-0,14	0,41	0,37	0,09
Fe	0,55	-0,03	0,51	0,16	1,00	0,17	-0,10	<b>0,81</b>	0,37	0,55	<b>0,71</b>
Ni	0,16	0,01	0,12	0,16	0,17	1,00	0,32	-0,11	0,50	0,53	0,17
P	0,54	0,46	-0,20	0,22	-0,10	0,32	1,00	-0,48	0,15	-0,25	-0,45
Sc	0,20	-0,19	0,63	-0,14	<b>0,81</b>	-0,11	-0,48	1,00	0,14	0,61	<b>0,91</b>
Sr	0,20	0,14	0,09	0,41	0,37	0,50	0,15	0,14	1,00	0,35	0,28
Ti	0,26	0,06	<b>0,77</b>	0,37	0,55	0,53	-0,25	0,61	0,35	1,00	<b>0,77</b>
V	0,03	-0,22	0,59	0,09	<b>0,71</b>	0,17	-0,45	<b>0,91</b>	0,28	<b>0,77</b>	1,00

Tabla III.4 Correlaciones entre elementos teóricamente inmóviles para las Unidad 9. En rojo valores de correlación  $r > 0,9$ , en amarillo  $r > 0,8$  y azul  $r > 0,7$ .

De los diagramas realizados se observa para la mayoría de los elementos un comportamiento aleatorio en su movilidad independiente de su carácter teórico. De esta forma, elementos supuestamente inmóviles se presentan móviles y viceversa. Dichas propiedades permiten caracterizar algunas de las unidades litoestratigráficas. En la mayoría de los casos se observa una gran diversidad en las correlaciones de los elementos, lo que sería indicativo de diferentes procesos o grados de alteración que movilizan diferentes elementos en las distintas unidades estratigráficas. Sin embargo, es posible establecer ciertas generalidades. De los elementos estudiados, tres de ellos permanecen inmóviles a través de las unidades, presentando sólo variaciones locales. Estos elementos corresponden a Ti, V y Sc y en algunos casos Cr, Ni y P. Los demás elementos son aleatorios entre las unidades.

### DIAGRAMA DE FRACCIONAMIENTO-ALTERACIÓN.

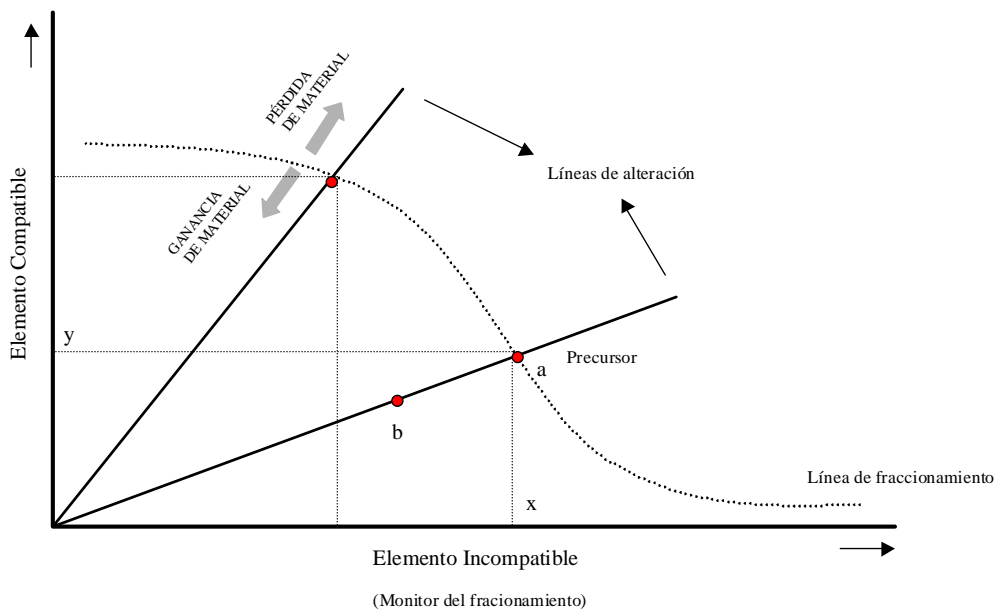


Figura III.5: El elemento incompatible es utilizado como monitor del fraccionamiento, es decir, a medida que progresa la diferenciación del magma, este elemento aumenta en su concentración, mientras que disminuye la cantidad del elemento compatible el cual va siendo paulatinamente incorporado a la estructura cristalina de los minerales formados.

Las variaciones en las concentraciones de elementos inmóviles permiten calcular los cambios químicos sufridos por alteración en rocas cogenéticas. Maclean (1990) define un tipo de diagrama que es útil para trabajar con series

de rocas alteradas (Figura III.5). Este consiste en proyectar un elemento conservativo incompatible (Zr, Nb, Hf, etc) versus otro, también inmóvil pero compatible ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , etc). A partir de este gráfico se pueden determinar series de rocas cogenéticas, *trends* de fraccionamiento y líneas de alteración, así como, se pueden también localizar precursores hipotéticos, sobre éstas. Para Estos tipos de diagramas, en un sistema derivado de un precursor individual, la disolución y concentración de elementos inmóviles se expresa como arreglos lineales los cuales son extrapolados hacia el origen. Si existen dos poblaciones de puntos, se supone la existencia de dos sistemas precursores y así sucesivamente.

En la figura III.6 se muestra la distribución de las muestras de todas las unidades en un gráfico Ti v/s Sc. Realizando una inspección preliminar del diagrama se observan tres series de rocas, una inferior que corresponde a la Unidad 2b, una media que corresponde a la Unidad 9 y otra superior que agrupa a las unidades 1, 2a, 4, 5 y 6. Estas diferencias pueden estar asociadas a las características evolutivas de los magmas originarios de las unidades volcánicas, estando las unidades 2b y 9 más diferenciadas en un proceso de cristalización fraccionada.

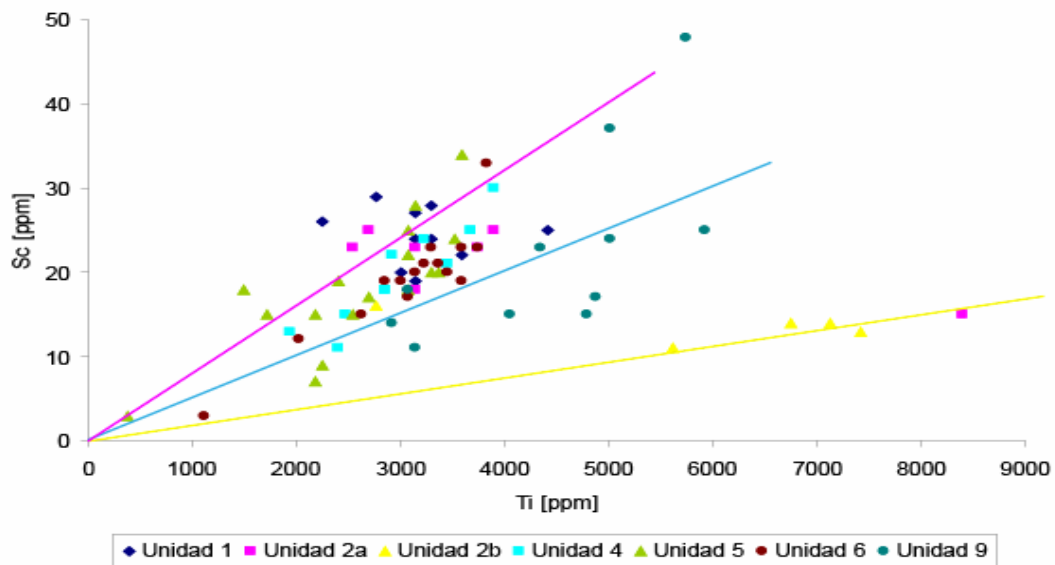


Figura III.6: Diagrama de dispersión Sc -Ti, en donde se representan todas las muestras por unidades del Distrito Minero Talcuna.

Considerando todas las unidades se puede apreciar que los valores de correlación más altos corresponden a las unidades 2a y 2b. Resulta contradictorio que las unidades mineralizadas, que muestran mayor alteración, presenten las más altas correlaciones. Las unidades mineralizadas, a pesar de su evidente cloritización, no presentan una removilización de Mg, como lo establecen las correlaciones, pero si se observa movilizado en las demás unidades. Tampoco presentan una movilidad de K, a pesar de los signos de albitización. Las unidades que presentan una menor correlación corresponden a las unidades 1 y 4 que representan unidades bastante heterogéneas con componentes sedimentarios.

### **III.2.3      Discusiones**

Al analizar las concentraciones de los elementos tomando como referencia una muestra no afectada por la alteración y mineralización de la zona de estudio y, a través de estudios de correlación entre elementos dentro de cada unidad, se pueden realizar las siguientes observaciones: (a) existen elementos que han sido movilizados sistemáticamente dentro de las unidades estudiadas siendo aportados o empobrecidos y mostrando un cierto sentido de la movilidad de los elementos; (b) en otros elementos el sentido de la movilidad de los elementos puede variar dependiendo de la unidad en la que se encuentre de manera singular; (c) finalmente, otros no se ven afectados permaneciendo relativamente constantes o con ligeras variaciones.

Como es posible observar en la Figura III.7 existe un enriquecimiento en la mayor parte de las unidades de Cu, Pb y Zn, acompañado de un empobrecimiento en todas las unidades de elementos tales como Al, Be, Fe, Mg, Sr, Ti y V. Sin embargo, estas características no son necesariamente resultado de propiedades heredadas, anteriores a la mineralización, o provocadas por los procesos de metamorfismo y alteración que afectan la zona de estudio, esto debido principalmente, al cambio de proporciones en elementos sufridos en las rocas al introducir nuevos elementos, por lo que es recomendable realizar un balance de masas y determinar factores de enriquecimiento para determinar con exactitud el real empobrecimiento y/o enriquecimiento en cada muestra, ejemplo de ello son los empobrecimientos de Al y Ti con respecto a la muestra ARQ-009, que indican que existe un aumento de volumen en las muestras alteradas.

Como se ha podido comprobar, existe un empobrecimiento de K en todo el distrito que tiende a ser más intenso en las unidades superiores. El comportamiento de este elemento es complejo de analizar, debido a su alta movilidad en procesos de alteración de baja temperatura pudiendo ser concentrado o lixiviado de las rocas alteradas. Su comportamiento puede ser explicado por la sustitución por Ba, proceso común durante metamorfismo,



cuyo enriquecimiento está asociado a depósitos sedimentarios de Mn en zonas de intensa actividad biológica en fracturas del suelo oceánico, o por su alta solubilidad, ser lixiviado debido al ambiente marino superficial; lo mismo puede suceder con el Mg y Na. Sin embargo, estos escenarios no explican el empobrecimiento hacia las unidades superiores, lo que asociaría este comportamiento a una posible disminución en la intensidad de la alteración a medida que ascienden de los fluidos hidrotermales que provocaron la mineralización.

	Unidad 1	Unidad 2a	Unidad 2b	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Unidad 6	Unidad 8	Unidad 9
Al	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Ba	↕	↑	▬	↑	↕	↕	↓ ↓	▬	↓ ↓
Be	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Ca	↓	↓	▬	↑	↓	↑	↑ ↑	↓	↑
Co	▬	▬	▬	▬	↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓
Cr	↕	↕ ↕	↑ ↑	▬	↕	↕ ↕	↕ ↕	↑ ↑	↑ ↑
Cu	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	▬	↑ ↑	↕ ↕	↕	▬	↑
Fe	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓ ↓	↓	↓
Ga	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
K	↓	↓	↓	↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓	↓ ↓
La	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Mg	↓	↓	↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓ ↓	↓	↓
Mn	↕	↕	↕	↑ ↑	↕ ↕	↕	↕	↓	↓
Mo	↓	↓	↓	↑	↕	↕	↓	↓	↓
Na	▬	↓	▬	↓	↕	↕	↕	↑	↑
Ni	▬	↕	↕ ↕	▬	↕	↓	↓	↑	↑
P	↕	↕	↕	↓	↕	↕	↕	↑	↕
Pb	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↕	↓	↕
Sc	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬	▬
Sr	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓
Ti	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
V	▬	▬	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Zn	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑	↑	↕	↓	↓

Figura III.7: Tabla de síntesis de concentraciones de los elementos químicos en las diferentes unidades con respecto a la muestra ARQ-009. Las flechas indican la concentración relativa de los elementos, el número de flechas simboliza la intensidad.

Asociado con una menor alteración existe una disminución en la mineralización que es puesta en evidencia en las menores concentraciones de elementos metálicos como lo son Cu, Pb y Zn que encuentran sus más altos valores en las unidades 1 y 2a y se presentan moderadamente enriquecidos hasta la

Unidad 3 y en parte de la 5, para encontrarse disminuidos a empobrecidos en las unidades superiores.

Un hecho destacable es que las mayores correlaciones de elementos inmóviles las presentan las unidades mineralizadas. Este hecho podría ser indicativo de: (i) el proceso fue lento y afectó de manera homogénea a las rocas; (ii) que represente un sistema cerrado; (iii) que el sistema es abierto se recargó de manera continua; o (iv) que las alteraciones observadas no son lo suficientemente diferenciadas para distinguir un metamorfismo de bajo grado de una alteración hidrotermal.

### III.3 Geoquímica de ocurrencias minerales

Con el objetivo de conocer las características geoquímicas de la mineralización en el sector se ha realizado un estudio comparativo entre las ocurrencias minerales que se encuentran dentro de la mina Coca Cola 1 (que corresponden a las unidades inferiores de la Formación Quebrada Marquesa) y muestras de superficie, que representan las unidades superiores. De este modo, la comparación entre ellas revelaría información acerca de la evolución de los fluidos hidrotermales, pero hay que tomar en cuenta los procesos supergenos y de meteorización. Los trabajos de geología de minas se desarrollaron principalmente en labores subterráneas entre las cotas 600 y 800 m. Los trabajos de superficie se desarrollaron principalmente entre las cotas 700 y 1.135 m.

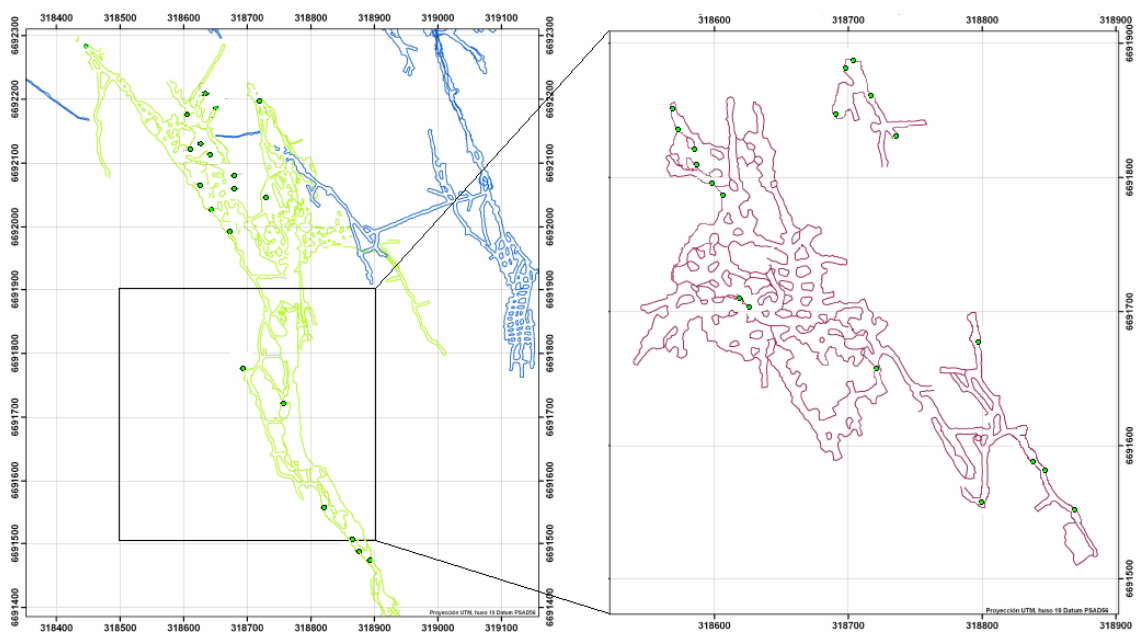


Figura III.8: Mapa de ubicación de ocurrencias minerales interior mina Coca Cola 1, en verde los niveles 705 a 715m y en púrpura los niveles 720 a 725m, en azul niveles superiores a 725m.

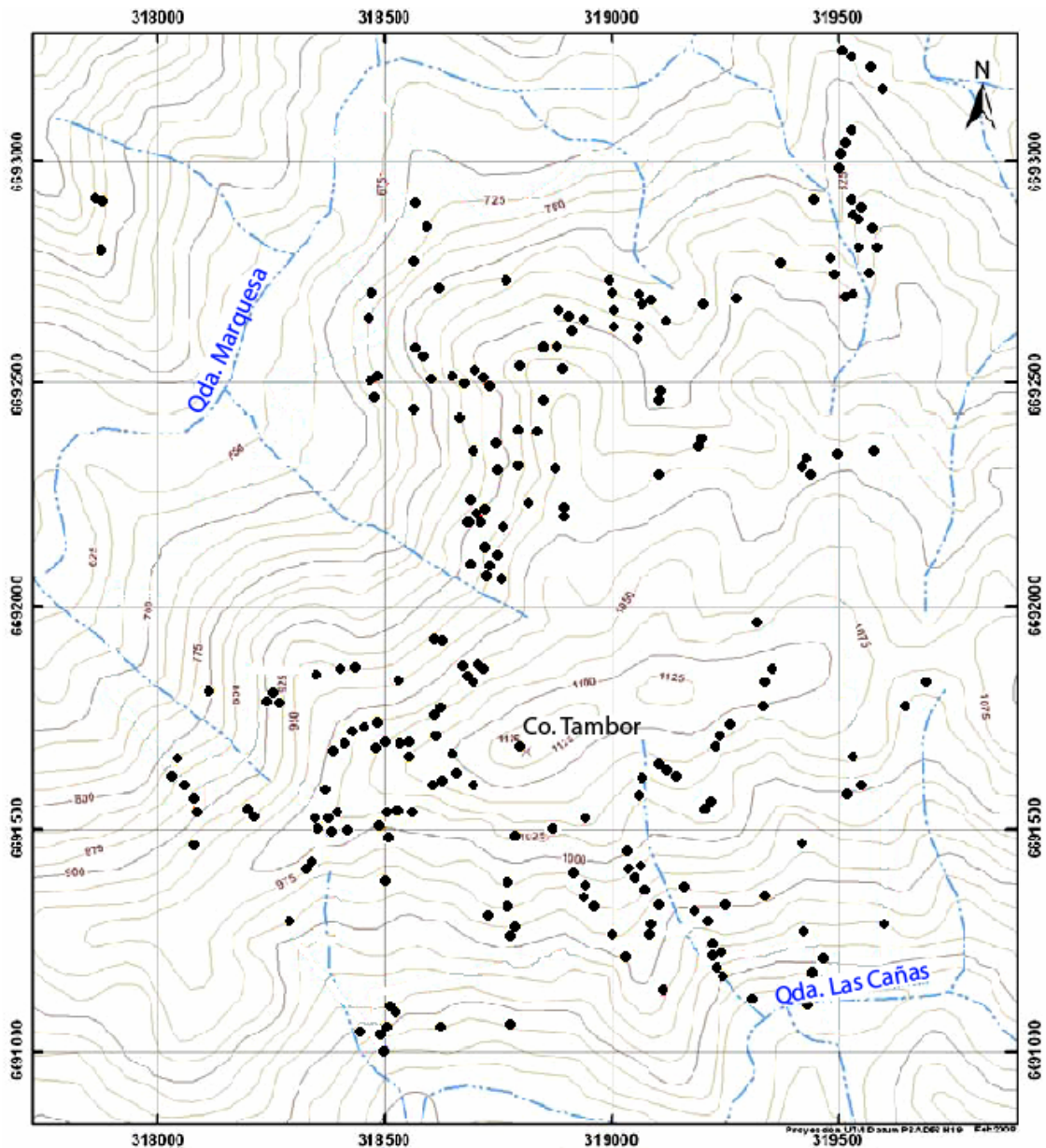


Figura III.9: Mapa de ubicación de ocurrencias minerales en superficie.

Como ya se había indicado anteriormente el estudio consistió en determinaciones petrográficas, análisis multielementales y difracción de rayos X. La recolección de muestras se realizó de forma irregular y orientada a determinar los cuerpos estratoligados o vetiformes de interés económico. La totalidad de las muestras puede observarse en las figuras III.8 y III.9.

### **III.3.1 Petrografía**

El estudio petrográfico estuvo centrado en las transformaciones minerales acaecidas durante los procesos de mineralización y alteración hidrotermal. El conjunto de las muestras analizadas en este estudio se encuentran, en grados diversos, afectadas por transformaciones secundarias que se materializan por la cristalización de un cierto número de minerales secundarios de baja temperatura. Estos minerales, repartidos de manera muy heterogénea, aparecen (1) en relleno de amígdalas y de vetillas, (2) como reemplazos totales o parciales de minerales primarios y (3) en la matriz de las rocas piroclásticas en forma de manchas o recristalizaciones más completas.

Estas transformaciones mineralógicas (y químicas) son caracterizadas por la ausencia total de deformación penetrativa en las rocas. Las texturas magmáticas se encuentran sistemáticamente conservadas. Además, poseen un carácter incompleto, como lo subraya la presencia de reemplazos parciales de minerales máficos y la presencia de cristales de plagioclasa limpios y parcialmente alterados, albitizados, cloritizados o seritizados.

En la paragénesis secundaria a menudo existen varias generaciones de minerales, pero su cronología relativa es difícil de establecer. Demostrar el equilibrio eventual entre fases de la misma generación es también problemática, una cuestión clásica de la petrografía metamórfica particularmente para las facies de grado muy bajo.

Los estudios petrográficos muestran que la mineralogía primaria, tanto en lavas como en tobas, está compuesta principalmente de abundante plagioclasa, escaso clinopiroxeno y minerales opacos, en cantidad variable en la masa fundamental, reflejando un carácter intermedio de las unidades volcánicas.

La paragénesis secundaria presente en las muestras de interior mina está constituida por los siguientes minerales: Albita, calcita, celadonita, clorita, prenhita, epidota, feldespato potásico, sericita, granate. Estos minerales esencialmente se reparten en amígdalas, como pseudomorfos de minerales primarios, como manchas en la masa fundamental y de minerales primarios, dependiendo principalmente de la litología perturbada. Calcita y clorita son muy comunes en la paragénesis de alteración, mientras que la sericita se encuentra de manera incipiente a pervasiva en plagioclasas generalmente albitizadas. La prenhita, epidota y las ceolitas se presentan en menos abundantes en las muestras descritas. De modo muy accesorio el granate está presente en una muestra (Anexo A). Acompañan a la asociación mencionada minerales supergenos como minerales oxidados de cobre y minerales oxidados de hierro y manganeso, estos últimos en la Unidad 3, denominada “Manto de manganeso” (Figuras III.10, III.11 y III.12).

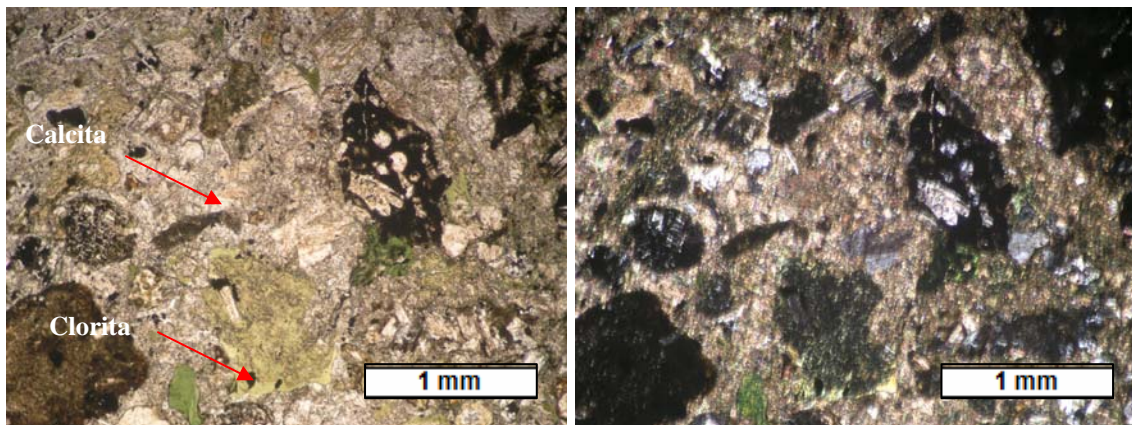


Figura III.10: Roca volcanoclástica formada principalmente por líticos y cristales en una matriz de calcita, las plagioclasas están albitizadas, o con parches de calcita y clorita, que también se muestran como manchas en la matriz, que en forma menor posee feldespato potásico. Textura típica de la Unidad 2a. (Der. N // 10X, Izq. N X 10X).

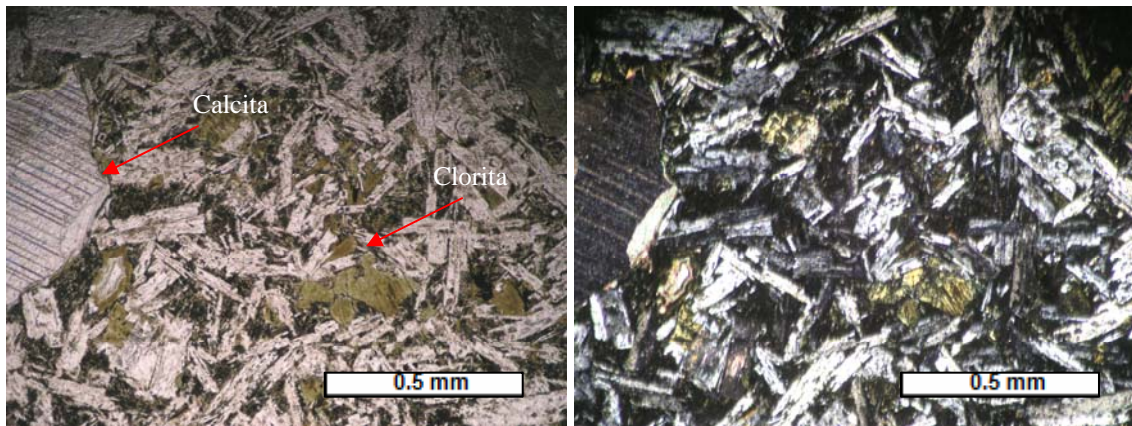


Figura III.11: Roca volcánica de textura pilotaxítica compuesta principalmente por cristales de plagioclasa en una matriz de calcita y en forma menor minerales opacos. Las plagioclasa alteradas presentan comúnmente parches de calcita y clorita. Los minerales secundarios se observan también en vesículas. Textura típica de la Unidad 2b (Der. N // 5X, Izq. N X 5X).

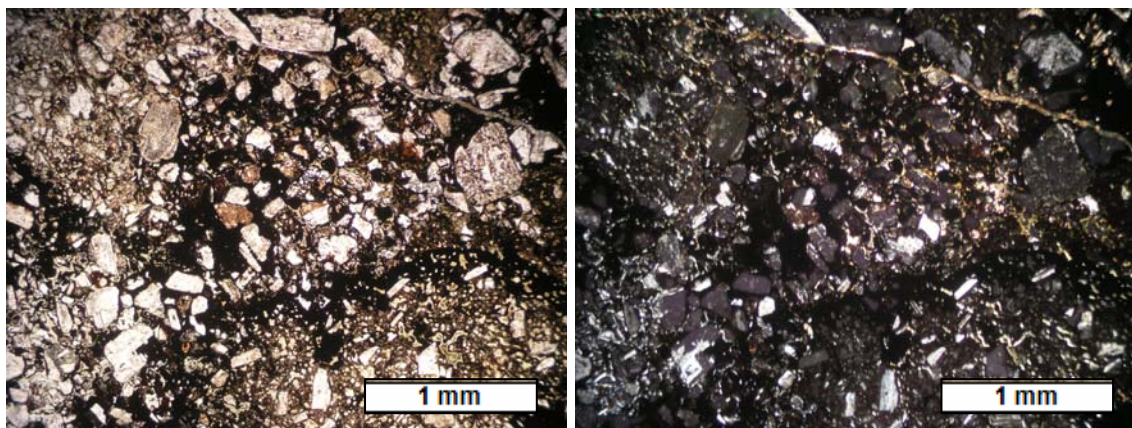


Figura III.12: Roca formada por cristales anhedrales a euhedrales de plagioclasa y líticos andesíticos en una masa fundamental opaca compuesta por minerales de hierro y manganeso. Clorita se exhibe en vetillas y relleno de amígdalas. Textura típica de la unidad 3 (Der. N // 10X, Izq. N X 10X).

En superficie las ocurrencias minerales están compuestas por la siguiente mineralogía secundaria: Albita, calcita, clorita, cuarzo, prenhita, sericita, minerales opacos, zeolitas, granate. Estos minerales esencialmente se reparten en el amígdalas, vetillas y en la masa fundamental. Las plagioclasas se encuentran en su gran mayoría albitizadas y las zeolitas son poco comunes presentándose en amígdalas (Figura III.13). Acompaña a la mayoría de las

asociaciones minerales la presencia de minerales oxidados de cobre, principalmente crisocola y malaquita (Figura III.14).

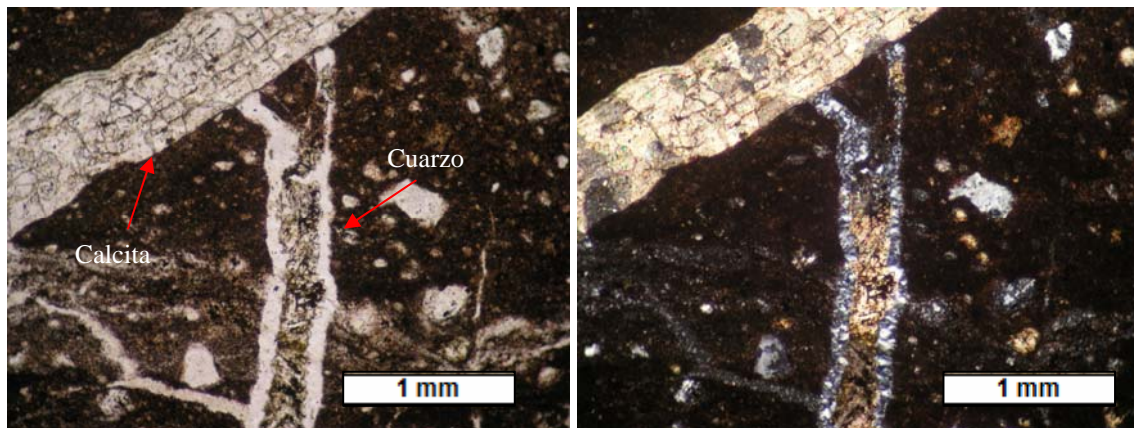


Figura III.13: Muestra constituida fundamentalmente por la plagioclasa, en una matriz compuesta de microlitos de plagioclasa, algunos cristales limpios de piroxeno abundante opaco diseminado y carbonato en forma de micrita y cristales anhedrales. Las vetillas se componen de calcita y cuarzo (Der. N // 10X, Izq. N X 10X).

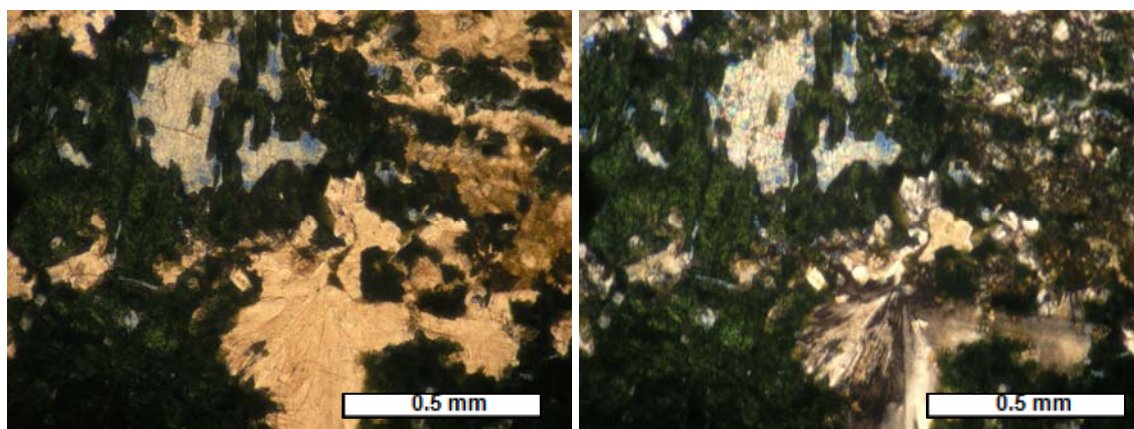


Figura III.14: Asociación de minerales supergenos en vetillas. Se observan intercrecimientos de minerales oxidados de cobre (crisocola y malaquita) junto con sílice y calcita (Der. N // 5X, Izq. N X 5X).

La mineralogía presente no refleja una zonación característica a escala vertical producto de la alteración hidrotermal a medida que los fluidos evolucionan, diferenciándose en mayor medida en la intensidad. En este aspecto, la textura de las rocas ha demostrado ser un factor importante en la alteración de las rocas, ya que la mineralogía primaria de las diferentes unidades es muy similar.



Las lavas presentan una textura porfírica pilotaxítica y su masa fundamental está compuesta casi en su totalidad de minerales opacos; alteración y mineralización se presentan principalmente en vesículas y vetillas. Sin embargo, las tobas presentan texturas clásticas con una masa fundamental compuesta por proporciones variables de calcita, clorita, sílice y minerales opacos, la que puede llegar a formar el 40% de la roca.

La paragénesis secundaria observada no permite, en general, definir facies metamórficas en las unidades volcánicas estudiadas. Las asociaciones minerales diagnósticas de las diferentes facies (zeolita, prenhita-pumpeyita, prenhita-actinolita, pumpeyita-actinolita, esquistos verdes) no ha sido observada en el seno de un microdominio o a la escala de una lámina delgada. La cronología relativa de los diferentes minerales es difícil de poner en evidencia. En general, se puede determinar que la sílice es posterior a la calcita por relaciones de corte de vetillas.

El estudio de cortes transparentes muestra, además, la mayor presencia de minerales oxidados de cobre en las muestras de superficie, reflejado por la presencia de crisocola y posiblemente malaquita en vetillas de calcita, evidencia inequívoca de una alteración supergena en superficie.

### **III.3.2 Estudio de la alteración mediante difracción de rayos - X**

El análisis de difracción de rayos X se efectuó en 23 muestras de interior mina (unidades inferiores de la Formación Quebrada Marquesa) y 33 de superficie (unidades superiores de la formación Quebrada Marquesa), correspondiendo a unidades mineralizadas mantiformes y vetiformes (Ver anexo C). De los datos obtenidos se ha podido reconocer 12 fases minerales, las que se encuentran en forma variable en ambos grupos de muestras. Las fases minerales reconocidas corresponden a:

Albita, analcima, estilbita, baritina, calcita, cuarzo, hematita, feldespato potásico, clorita, mica blanca, caolinita, esmectita e Illita interestratificada.

Los resultados muestran en superficie el dominio de; albita y calcita, que se distribuyen homogéneamente tanto en vetas como en depósitos estratoligados y sin presentar variaciones con la altura. El cuarzo, en algunas ocasiones, puede llegar a superar el 50% de volumen de la muestra, pero su concentración no es homogénea. También es destacable la presencia de hematita presente en todas las muestras de superficie, claramente de origen supergeno. Fases asociadas a alteración que se encuentran presentes son principalmente clorita y en forma escasa, mica blanca, caolinita y estilbita; también es importante notar la completa ausencia de minerales tales como baritina, feldespato potásico, esmectita interestratificada y analcima.

Las muestras mineralizadas en las unidades inferiores se caracterizan por presentar cuatro fases principales, presentes en diversos grados en casi la totalidad de las muestras: albita, calcita, feldespato potásico y analcima y en menor grado baritina, clorita y sericita y en forma muy escasa aparece cuarzo, caolinita, esmectita interestratificada, estilbita y hematita. El cuarzo, aunque en un muy bajo volumen porcentual, tiende a incrementarse en las unidades superiores y principalmente en vetas, estando completamente ausente en la Unidad 2a; la hematita se encuentra casi exclusivamente en la Unidad 3; la baritina en mayor cantidad en la unidad 2a en forma muy heterogénea, con un

promedio de 6% del volumen de la muestra alcanzando un máximo de un 41% en veta y 25% en manto con una tendencia a disminuir en los niveles superiores; de manera similar ocurre con el feldespatos potásico, principalmente en mantos y de forma más homogénea como se observa en la figura III.15.

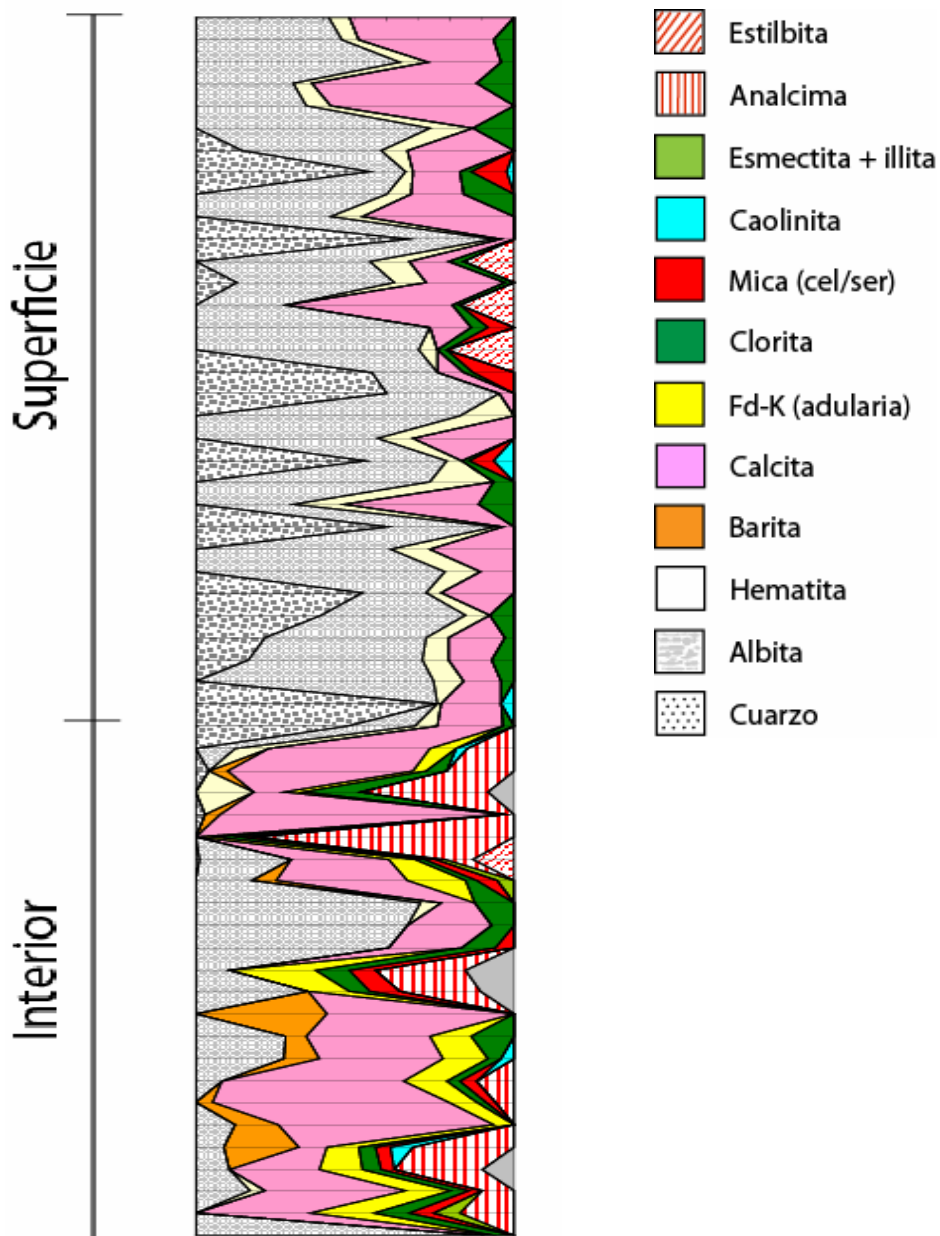


Figura III.15: Abundancias relativas de fases minerales en superficie e interior mina (Coca Cola 1). Las muestras de interior han sido ordenadas de forma estratigráfica y las de superficie por cota.

Las diferencias más notorias entregadas por los resultados son la ausencia de baritina, feldespato potásico, esmectita interestratificada y analcima en las muestras de superficie y la menor presencia de caolinita y mica blanca, fases relacionadas directamente con la presencia de fluidos hidrotermales y alteración. También es posible apreciar el mayor volumen porcentual en las muestras de superficie de cuarzo y hematita, mientras que clorita, calcita se distribuyen de manera casi homogénea en ambos grupos de muestras. De esta forma, hay una zonación de las fases minerales, caracterizada por la mineralogía de ganga anteriormente mencionada.

La presencia de baritina junto a feldespato potásico requiere de condiciones de pH diferentes en ambos minerales (ácidas para la baritina y neutras a alcalinas para el feldespato potásico), indicando que estos minerales se formaron en distintas etapas de mineralización.

### **III.3.3 Geoquímica**

Para la realización del estudio geoquímico de ocurrencias minerales se realizó un análisis multielemental a 60 muestras interior mina, que corresponden a y 136 muestras de superficie, las que corresponden a depósitos estratoligados y vetiformes (ver resultados análisis en anexo B). El chequeo de integridad de datos expone las primeras diferencias entre las muestras obtenidas al interior de la mina y las de superficie. Para las primeras, de los 33 elementos analizados, seis poseen más del 50% de los resultados bajo el límite de detección y dos tienen un alto porcentaje de sus valores en el límite de detección. En las de superficie, siete elementos tienen más del 50% concentraciones bajo el límite de detección y 3 tienen elementos tienen más del 50 % en el límite de detección.

Para ilustrar la variación en la concentración de los diferentes elementos químicos se han utilizado gráficos de altura-concentración (Figuras III.16 y III.17 en los que se muestran con mayor precisión los cambios en la concentración de los mismos en la secuencia estratigráfica. Si existen cambios continuos o presentan concentraciones anómalas en las cuales existan niveles receptivos de mineralización y se podrá determinar las tendencias en la variación de los elementos en la vertical. Con el fin de establecer un realce en el comportamiento de los elementos se han graficado de manera conjunta los datos de ambos grupos de muestras; las de interior de mina han sido ordenadas según el orden estratigráfico de las unidades muestreadas, mientras que las muestras de superficie han sido ordenadas según la altura.

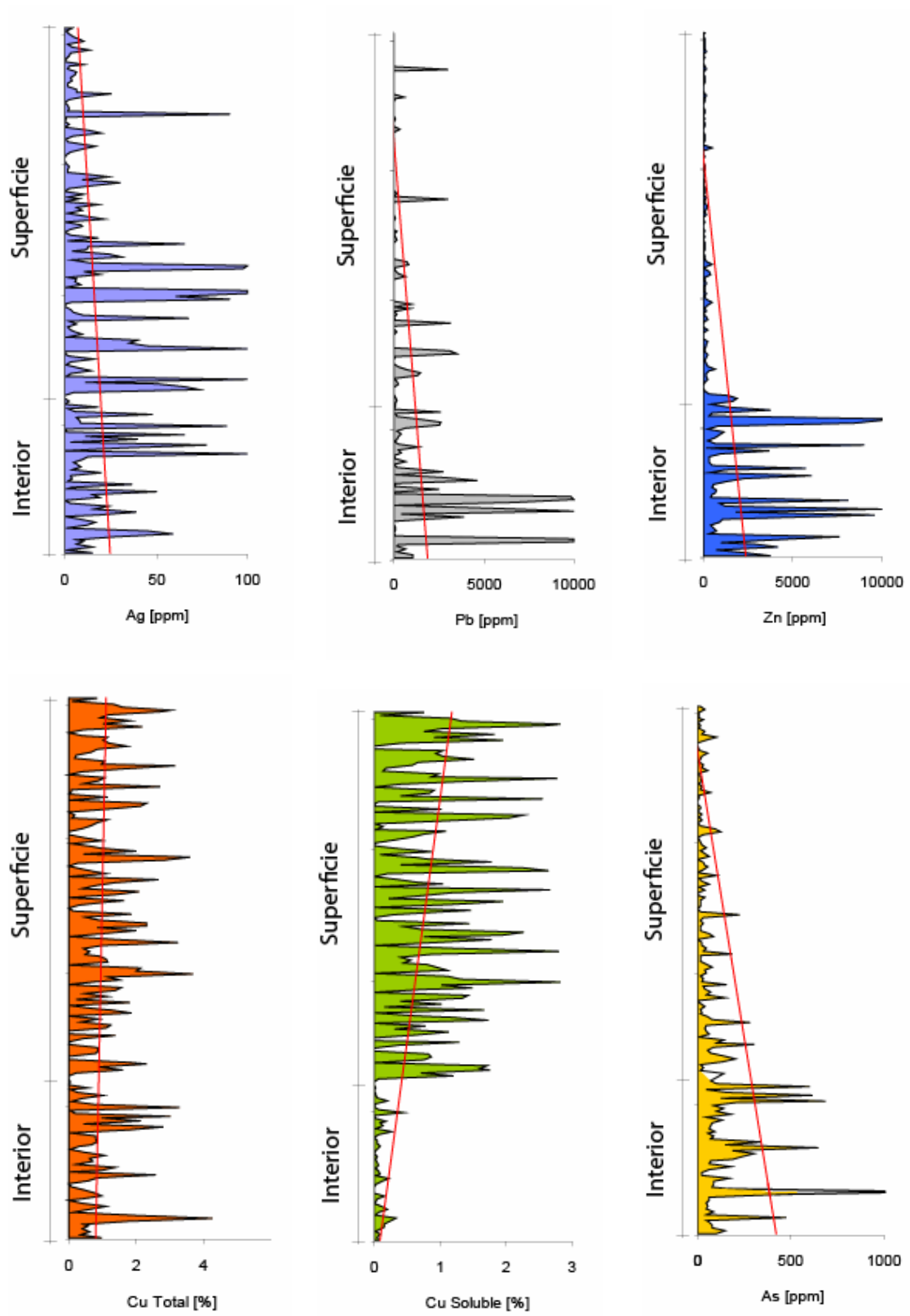


Figura III.16: Variaciones de concentraciones de elementos con la altura relacionados a la mineralización. En rojo línea de tendencia lineal del variación de los elementos.

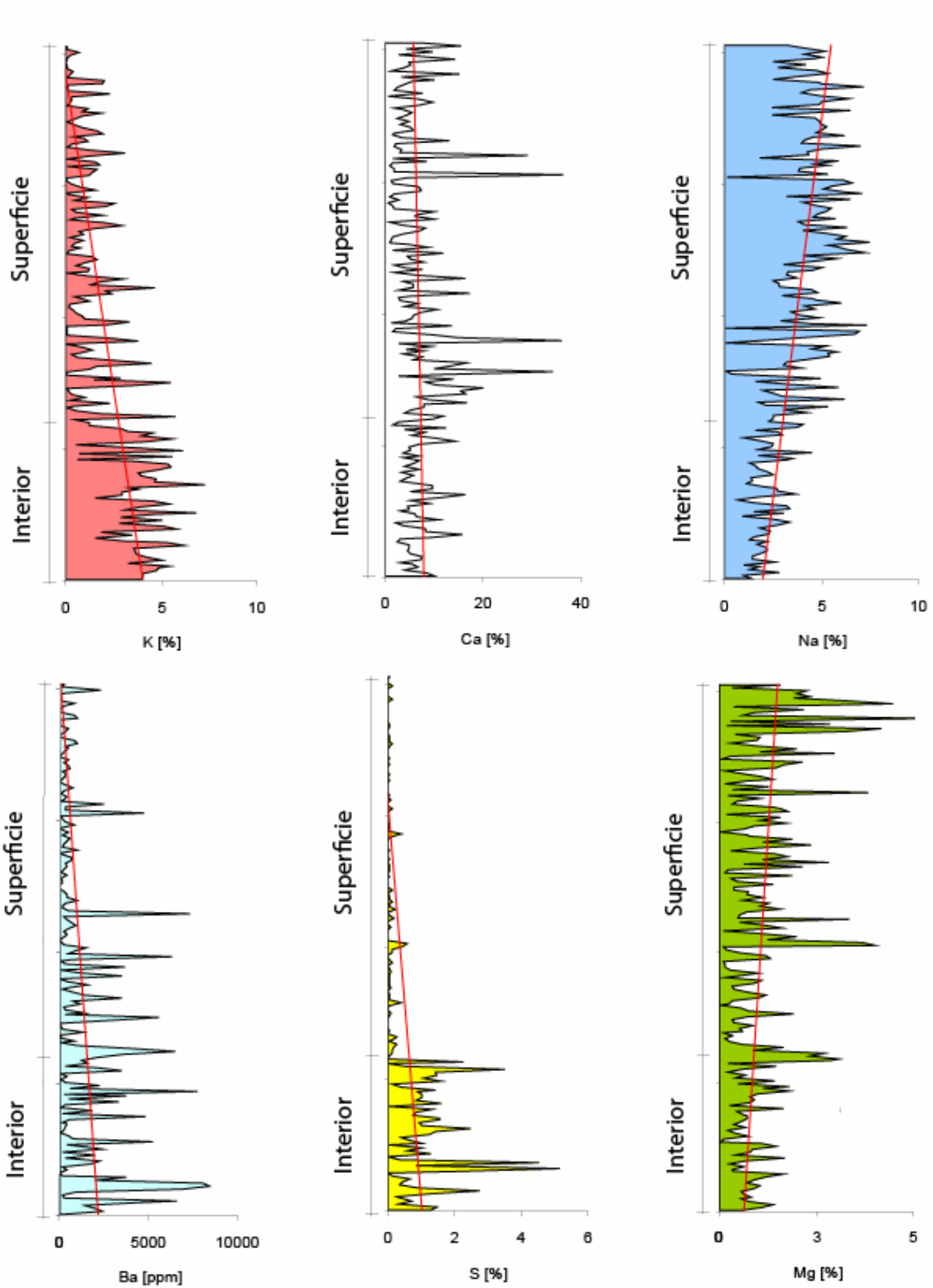


Figura III.17: Variaciones de concentraciones de elementos con la altura relacionados a la alteración. En rojo línea de tendencia lineal del variación de los elementos

En general, ambos grupos de muestras estudiados presentan una gran variabilidad en los valores de las concentraciones de los elementos; sin embargo, es posible apreciar las diferencias en las concentraciones de elementos entre los dos grupos de muestras, que en algunos casos resultan ser sistemáticas, mientras que en otras resultan ser aleatorias. En forma preliminar se puede apreciar un aumento con la profundidad en As, Ba, K, Mn, Pb, S, Sr y Zn junto con una disminución de Be, Na, Cr, Ni, P y Cu soluble, mientras que Ag, Al, Co, Cu, Fe, Mg, Sc, Ti y V no muestran variaciones significativas.

Elementos tales como K, Ba y Sr muestran una tendencia a disminuir su concentración hacia la porción superior de la secuencia estratigráfica, lo que se pone de manifiesto al comparar los valores de superficie que presentan la misma tendencia, pero este grupo de muestras presenta una mayor dispersión, especialmente en Ba. De manera sistemática se observa un aumento en las concentraciones de Na y Mg, en tanto que Ca presenta variaciones que no permiten dilucidar una tendencia clara, con dos zonas de acumulación en superficie, que corresponden, al parecer, a unidades sedimentarias. Por su parte las concentraciones de Al se presentan bastante homogéneas y constantes.

Elementos metálicos como Ag, Pb y Zn, frecuentemente trazadores geoquímicos de mineralización de Cu, tienen una tendencia a disminuir sus concentraciones a medida que aumenta la altura. Sin embargo, las concentraciones de Cu permanecen casi constantes, pero su forma de mineralización corresponde en superficie a óxidos, como lo muestran las concentraciones de S y Cu soluble.



## Capítulo IV. Discusiones y Conclusiones

### *IV.1 Litoestratigrafía a partir de geoquímica*

La caracterización litogeoquímica resulta una herramienta útil para identificar litologías basados en las concentraciones anómalas de algunos elementos, especialmente en la diferenciación de unidades volcánicas, sin embargo, no es posible establecer una diferencia en tipos o intensidades de alteración en las rocas muestreadas.

#### *Unidad 1*

La unidad 1 presenta variaciones importantes en la composición que pueden ser atribuidos a la movilidad de elementos producida por alteración hidrotermal o metamorfismo. Se observan empobrecimientos en Be, Ca, Sr, K, y Mg elementos que presentan un comportamiento similar y enriquecimientos en Na. La albitización de la plagioclasa es explicativa del empobrecimiento en Ca que está acompañado de un enriquecimiento en Na, lo que es confirmado por la correlación negativa entre estos elementos. Este mismo proceso podría ser responsable del empobrecimiento en Al. Esta serie de rocas muestra una gran ganancia de elementos metálicos principalmente Cu, Pb y Zn, particularmente en las muestras MRT-9 y MRT 80.

Los diagramas de dispersión muestran bajas correlaciones de los elementos teóricamente inmóviles. Las mayores correlaciones las presenta el Ti especialmente con el P, teniendo un valor de correlación de 0,88. Las bajas correlaciones reflejan que los elementos fueron movilizados, debido probablemente a procesos de alteración hidrotermal y metamorfismo regional

## *Unidad 2a*

La petrografía de la unidad muestra feldespato potásico, calcita, clorita y minerales cálcicos como lo son epidota, y zeolitas. Dicha asociación se ve reflejada sólo en un ligero aumento de la concentración de Ca, mientras que las concentraciones de Mg permanecen constantes, a pesar de la pervasiva cloritización.

El diagrama de normalización muestra una concentración de elementos semejante a la Unidad 1, presentando altas concentraciones de Cu y Pb. Se encuentra enriquecida en Zn y Ba, principales características de la unidad, además de concentraciones variables de Cr y Ni, además de un bajas concentraciones de Na y Ca.

La unidad 2a presenta altas correlaciones entre los elementos generalmente considerados inmóviles. Las mayores correlaciones en esta unidad las presentan dos grupos, el Cr, Ni y Ti con correlaciones de de valores alrededor de 0,9 y el Sc, V y P con correlaciones de alrededor de 0,85, las altas correlaciones indican que los procesos encargados de movilizar elementos fueron lentos.

## *Unidad 2b*

Las rocas de la unidad 2b presentan concentraciones de elementos similares a las unidades anteriores. El diagrama de normalización muestra un ligero empobrecimiento en Be, K, Mg y Sr. Si bien presenta un enriquecimiento en Cu, Pb y Zn la concentración de estos es más variable dentro del grupo de muestras, reflejo de una mineralización más heterogénea, principalmente en amígdalas. La escasa movilidad de elementos considerados comúnmente móviles como lo son el Ca y Na puede originarse por una compensación producida por albitización de la plagioclasa a la vez que se produce una cristalización de minerales cálcicos como calcita epidota y ceolitas en un sistema cerrado o debido a una constante recarga de del sistema. La principal

característica que diferencia a la Unidad 2b de las unidades descritas anteriormente la representa el enriquecimiento en Cr y Ni, observado sólo nuevamente en las unidades 8 y 9.

Los elementos comúnmente inmóviles están presentan correlaciones ( $r > 0,9$ ) en dos grupos, al igual que la Unidad 2a. Ti, Cr y Ni y V, Sc y en forma moderada el Al, con valores de correlación de 0,9 aproximadamente. Elementos móviles presentan valores de correlación moderados que confirman la menor movilidad de los elementos observada en los diagramas de normalización, los que incluyen Ca, Mg, K y en menor proporción Na.

### *Unidad 3*

Los diagramas de normalización muestran que la Unidad 3 presenta empobrecimientos en Be y Na de K y Mg y enriquecimientos en Ba, Mn, Mo, Pb y Zn. Se caracteriza además por la concentración anómalamente alta de As.

Es posible encontrar altas concentraciones de Cu, como la muestra MR-CC1-10 que corresponden a facies entre las litologías de las unidades 2 y 3. El Pb y Zn se encuentran en menores concentraciones que las unidades anteriores.

### *Unidad 4*

La Unidad 4 exhibe características similares a la Unidad 3 en los diagramas de normalización, diferenciándose por una menor concentración de Mn y una mayor concentración de Cu, que se muestra en forma variable. De esta forma posee una ganancia en Cu y Pb, un ligero empobrecimiento en Ca y Co que se presenta variables y, en forma moderada, de Mg y K.

La Unidad 4 presenta, en general, bajos valores de correlación entre los elementos, destacando la alta correlación entre Ti y Sc y V y Sc con un valor de correlación sobre 0,9 y 0,78 respectivamente. Los demás elementos no

presentan correlaciones importantes, siendo inferiores a 0,65. Esto es atribuido al carácter sedimentario y gran heterogeneidad de la unidad constituida por fragmentos de naturaleza volcánica principalmente.

#### *Unidad 5*

Las muestras de esta unidad presentan importantes variaciones en las concentraciones de elementos con respecto a la norma. Esto ocurre debido al carácter heterogéneo de las litologías que incluyen lavas, tobas y rocas sedimentarias. De esta manera, es posible reconocer muestras con valores concentraciones de elementos agrupados, que indican características geoquímicas diferentes para las rocas de esta unidad. Este grupo de muestras corresponde al “Manto Superior” y se caracteriza por presentar enriquecimientos en Ba, Ca, Cu, Pb y Zn, acompañado de empobrecimientos en Al, K y Mg, mientras que las demás muestras presentan valores variables, pero similares a la norma.

Esta unidad presenta, en general, valores correlación de 0,6, pero a pesar de la poca homogeneidad de las litologías y presentar diferentes grupos de concentraciones de elementos, se presentan correlaciones altas entre elementos inmóviles, como es el caso de V y Sc ( $r=0,91$ ) y en forma menor Ti y Co. Al contrario los elementos Ba, Cr, P, Sr y Ni se presentan muy variables.

#### *Unidad 6*

Las concentraciones de los elementos de la Unidad 6 se presentan variables sobre el diagrama de normalización, lo que se debe a que agrupa diferentes litologías de carácter volcanosedimentario que van desde tobas, flujo de detritos a calizas. En ellos es posible reconocer empobrecimientos en Ba, Co, Fe, K Mg, Ni y Sr y concentraciones variables de metales tales como Cu, Pb y Zn.

Producto de la variación presentada por los elementos los valores de correlación entre elementos inmóviles son inferiores a 0,9 a excepción de Ti y Sc con un valor de 0,90.

### *Unidad 8*

Solo 2 muestras son estudiadas en esta Unidad y corresponden principalmente a la matriz y cemento. Las principales características son un empobrecimiento en elementos metálicos como Cu, Pb y Zn que se manifiesta en la ausencia de minerales de mena y un ligero enriquecimiento en Cr y Ni.

### *Unidad 9*

A través de los diagramas de normalización se distinguen empobrecimientos en Co, Mn y Zn, Ba, K y Mg y un enriquecimiento en Cr y Ni, principal característica de la unidad. El empobrecimiento de Zn y el las concentraciones variables del Pb son probablemente muestra de la menor mineralización de esta unidad con respecto a las unidades inferiores. El empobrecimiento en K se ve reflejado en la ausencia de feldespatos potásicos, filosilicatos y anfíbolos, la menor sericitización de las plagioclasas y la menor alteración en general que, junto a la escasez de ferromagnesianos, explicaría la carencia de Mg en las muestras analizadas.

La unidad 9 presenta valores de correlación sobre 0,9 para los elementos Sc y V. Las demás correlaciones son moderadas (inferiores 0,8) para los elementos tradicionalmente inmóviles, estas corresponden al Ti, Fe y Co Ni P.

## **IV.2 Relación alteración – mineralización**

Los datos geoquímicos presentados en este trabajo, sugieren una disminución en la alteración y la mineralización en las unidades superiores de la Formación Quebrada Marquesa, ya que se existe una menor concentración de elementos metálicos, observado tanto en las muestras obtenidas en la caracterización litogeoquímica como en las muestras que presentan mineralización, y las diferencias en la mineralogía de ganga asociada.

La disminución en las concentraciones de elementos metálicos propone un empobrecimiento de los fluidos hidrotermales a medida que estos evolucionaron. Tal es el caso de Ag, Pb y Zn, en el caso de los dos últimos disminuyen drásticamente sus concentraciones en las unidades superiores (Figura III.24). Sin embargo, es posible observar altas concentraciones de Cu total, las que se expresan principalmente como minerales oxidados, reconocidos en petrografía y muestras de mano, asociados directamente a cuerpos vetiformes, por lo que efectos supergenos y de meteorización afectan directamente a las rocas y el empobrecimiento antes mencionado no es completamente cierto.

La mineralogía exhibida en las unidades inferiores de la Formación Quebrada Marquesa muestra que los principales minerales de ganga son albita, calcita, clorita, feldespato potásico y analcima y en menor grado baritina y micas blancas, existiendo asociaciones entre albita y clorita, feldespato potásico, micas blancas, esmectita y ceolitas y baritina y caolinita, en tanto que calcita no se relaciona directamente a otro mineral (Tabla IV.1). La parte superior de la Formación está dominada por albita, calcita, clorita, cuarzo y menor, mica blanca, caolinita, estilbita y hematita, hematita, albita y clorita se encuentran correlacionados, pero dichas correlaciones son bajas.

La asociación mineral de feldespato potásico, micas blancas, esmectita y ceolitas se encuentra ligada a un incremento en las concentraciones de As, K y Mo, pero se acompaña en una disminución en las concentraciones de Ag, Cu,

Pb y Zn (Tabla IV.2). La asociación mineral de clorita y albita se encuentra directamente relacionada a la mineralización en la Unidad 2b, asociada a incrementos en las concentraciones de Ag, Cu, Pb y Zn, al contrario de la Unidad 2a, donde se presenta de manera pervasiva y ligada más bien a disminución en la concentración de dichos elementos. Mientras que en superficie es indiferente a la mineralización y se ve relacionada con incrementos de Fe, Co, Mg, Mn y Ni. Esta heterogeneidad de la asociación mineral apunta a una diferencia en los procesos originarios de dicha asociación mineral, que sugiere un origen hidrotermal, al menos en parte, en las unidades inferiores y a un origen metamórfico en superficie. La baritina se encuentra asociada, dependiendo de la unidad, a aumentos en la concentración de Cu, Ag, Pb y Zn (Tabla IV.2), en tanto que calcita se presenta de manera homogénea independiente de los cuerpos de mena.

Los datos entregados indican que las menas se encuentran asociadas a una albitización, cloritización y carbonatización. Aunque cloritización no solamente asociada a menas, en tanto, que carbonatización se presenta independiente de ellas y presentándose también en rocas porosas. Para tal efecto es necesaria una adición de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O a los minerales de las rocas y probablemente una adición de K, Ba, Na y Ca. Esto muestra que la alteración presente en el Distrito Minero Talcuna no necesariamente está relacionada a un evento hidrotermal, pero tampoco dice lo contrario, ya que los  $\delta^{34}\text{S}$  negativos obtenidos por Puig y Spiro (1988) indican una gran fraccionamiento de las razones isotópicas S en los sulfuros, sugiriendo un proceso de mineralización de baja temperatura (Munizaga et al., 1994), como también lo establecen los estudios de inclusiones fluidas en calcitas de mantos y vetas con temperaturas de homogenización entre 75 y 205°C (Oyarzún et al., 1998), concordante con las asociaciones mineralógicas de ganga, por lo que establecer una relación entre alteración y mineralización no es directo.

	Cuarzo	Albita	Hematites	Barita	Calcita	Fd-K (adularia)	Clorita	Mica (cel/ser)	Caolinita	Esmec+Intere	Analcima	Estilbita
Superficie												
Cuarzo	1,00	-0,72	-0,60	/	-0,39	/	-0,32	0,34	0,47	/	/	-0,23
Albita	-0,72	1,00	0,60	/	-0,29	/	0,20	-0,28	-0,44	/	/	0,10
Hematites	-0,60	0,60	1,00	/	-0,04	/	0,22	-0,43	-0,26	/	/	-0,09
Barita	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Calcita	-0,39	-0,29	-0,04	/	1,00	/	-0,05	-0,23	-0,20	/	/	-0,01
Fd-K (adularia)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Clorita	-0,32	0,20	0,22	/	-0,05	/	1,00	0,00	-0,12	/	/	-0,04
Mica (cel/ser)	0,34	-0,28	-0,43	/	-0,23	/	0,00	1,00	0,41	/	/	-0,11
Caolinita	0,47	-0,44	-0,26	/	-0,20	/	-0,12	0,41	1,00	/	/	-0,09
Esmectita	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Analcima	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Estilbita	-0,23	0,10	-0,09	/	-0,01	/	-0,04	-0,11	-0,09	/	/	1,00
Interior												
Cuarzo	1,00	-0,18	-0,10	-0,08	0,45	-0,27	-0,40	-0,22	-0,10	0,01	-0,12	0,39
Albita	-0,18	1,00	0,30	-0,33	-0,47	-0,46	0,36	-0,28	-0,11	-0,21	-0,39	0,03
Hematites	-0,10	0,30	1,00	-0,18	-0,12	-0,14	0,29	-0,17	-0,11	-0,13	-0,15	-0,08
Barita	-0,08	-0,33	-0,18	1,00	0,29	-0,20	-0,47	-0,32	0,42	-0,12	-0,16	-0,13
Calcita	0,45	-0,47	-0,12	0,29	1,00	-0,14	-0,61	-0,42	-0,17	0,05	-0,48	-0,03
Fd-K (adularia)	-0,27	-0,46	-0,14	-0,20	-0,14	1,00	0,25	0,63	0,08	0,40	0,24	-0,04
Clorita	-0,40	0,36	0,29	-0,47	-0,61	0,25	1,00	0,28	-0,10	0,15	0,17	-0,17
Mica (cel/ser)	-0,22	-0,28	-0,17	-0,32	-0,42	0,63	0,28	1,00	-0,03	0,38	0,50	0,02
Caolinita	-0,10	-0,11	-0,11	0,42	-0,17	0,08	-0,10	-0,03	1,00	-0,12	0,13	-0,07
Esmectita	0,01	-0,21	-0,13	-0,12	0,05	0,40	0,15	0,38	-0,12	1,00	-0,05	0,21
Analcima	-0,12	-0,39	-0,15	-0,16	-0,48	0,24	0,17	0,50	0,13	-0,05	1,00	-0,04
Estilbita	0,39	0,03	-0,08	-0,13	-0,03	-0,04	-0,17	0,02	-0,07	0,21	-0,04	1,00

Tabla IV. 1: Correlaciones entre fases minerales observadas mediante difracción de rayos - x



	Cuarzo	Albita	Hematites	Barita	Calcita	Fd-K (adularia)	Clorita	Mica (cel/ser)	Caolinita	Esmectita	Analcima	Estibita
Superficie												
Ag	0,24	-0,16	0,06	/	-0,16	/	0,08	0,01	0,13	/	/	-0,17
Cu	-0,14	0,15	0,08	/	-0,09	/	0,41	0,26	-0,08	/	/	-0,13
Fe	-0,33	0,07	0,54	/	0,17	/	0,74	-0,05	0,00	/	/	-0,19
Mn	-0,10	-0,24	-0,02	/	0,32	/	0,49	0,07	0,10	/	/	0,01
Pb	-0,10	-0,18	-0,28	/	0,32	/	-0,04	-0,04	-0,01	/	/	0,50
S	-0,04	-0,03	0,10	/	0,10	/	-0,10	0,02	0,09	/	/	-0,09
Zn	0,06	-0,16	0,08	/	-0,02	/	0,53	0,13	0,34	/	/	-0,17
Cu Sol	-0,05	0,19	0,12	/	-0,24	/	0,16	0,36	0,01	/	/	-0,18
Cu Tot	-0,06	0,19	0,13	/	-0,22	/	0,17	0,35	0,02	/	/	-0,19
Unidad 2b												
Ag	-0,43	0,56	0,70	0,04	-0,26	-0,05	0,65	0,10	/	0,04	-0,42	-0,31
Cu	-0,19	0,33	0,45	0,36	0,07	0,16	0,31	0,24	/	0,29	-0,56	-0,23
Fe	-0,16	-0,25	-0,41	-0,18	-0,14	-0,31	0,15	0,20	/	-0,54	0,61	-0,60
Mn	0,17	-0,40	-0,46	-0,43	-0,09	-0,39	-0,11	-0,05	/	-0,60	0,73	-0,09
Pb	0,71	-0,53	-0,26	0,78	0,94	0,13	-0,75	-0,22	/	0,20	-0,31	-0,26
S	-0,05	-0,08	0,13	0,83	0,33	0,59	-0,15	0,32	/	0,67	-0,48	-0,25
Zn	0,48	-0,61	-0,31	0,95	0,78	0,45	-0,72	0,05	/	0,46	-0,21	-0,30
Cu Sol	-0,38	0,55	0,87	0,00	-0,29	-0,04	0,63	-0,08	/	0,05	-0,38	-0,22
Cu Tot	-0,35	0,62	0,67	-0,16	-0,26	-0,28	0,70	0,04	/	-0,18	-0,40	-0,27
Unidad 2a												
Ag	/	-0,16	0,47	0,72	0,16	-0,43	-0,41	-0,31	0,19	-0,25	-0,17	/
Cu	/	0,19	0,32	0,42	0,06	-0,42	-0,36	-0,42	0,32	-0,33	-0,25	/
Fe	/	-0,05	-0,14	-0,56	-0,05	0,46	0,26	0,41	-0,38	0,15	0,16	/
Mn	/	-0,56	0,06	-0,20	0,63	0,16	-0,38	0,16	-0,40	0,09	-0,02	/
Pb	/	-0,28	-0,12	0,78	0,46	-0,54	-0,62	-0,45	-0,17	-0,12	-0,38	/
S	/	0,01	0,15	0,47	0,14	-0,40	-0,50	-0,45	0,57	-0,21	-0,13	/
Zn	/	-0,19	-0,18	0,04	0,14	-0,06	-0,18	-0,19	0,07	-0,15	0,18	/
Cu Sol	/	0,03	0,26	0,55	0,02	-0,24	-0,07	-0,34	-0,03	-0,29	-0,29	/
Cu Tot	/	-0,07	0,46	0,66	0,13	-0,43	-0,39	-0,31	0,27	-0,25	-0,18	/

Tabla IV.2: Correlaciones mineral/elemento para las unidades inferiores y superiores de la Formación Quebrada Marquesa. Valores de correlación  $r > 0,9$  = rojo,  $r > 0,8$  = amarillo,  $r > 0,7$  = azul y  $r > 0,6$  = verde.

Por otra parte, las mineralizaciones metálicas de Ag, Cu, Pb y Zn no se encuentran relacionadas entre sí (Figura IV.1), tanto en las muestras al interior de la mina Coca Cola 1 y en superficie, por lo que establecer como elementos trazadores geoquímicos de mineralización de cobre a Ag, Pb y Zn no es una herramienta eficaz en este caso.

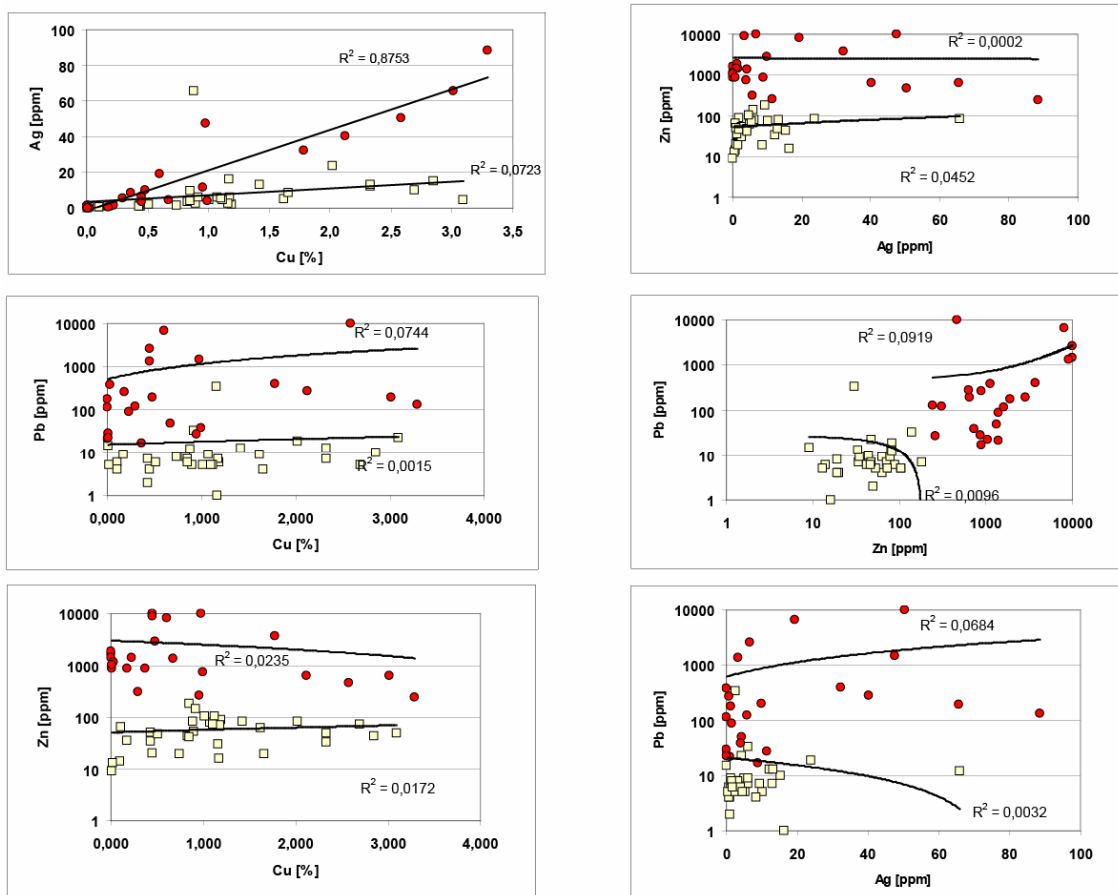


Figura IV.1: Concentraciones de Cu total [%], Ag [ppm], Pb [ppm] y Zn [ppm]. En rojo muestras de interior de mina Coca Cola 1 y en amarillo muestras de superficie, se indican los valores de correlación para cada par de elementos.

La mineralización de plata se presenta en forma heterogénea en el distrito y se encuentra directamente relacionada a la mineralización de cobre en las unidades inferiores de la Fm. Quebrada Marquesa, al interior de la mina Coca Cola 1. Sin embargo, en superficie no ocurre de igual manera como se aprecia en la Figura IV.1. Esta diferencia en ambas zonas se ve también reflejada en la ganga asociada: la plata se ve ligada a baritina en la Unidad 2a, y a albita y

clorita en la Unidad 2b, mientras que en superficie la mayor correlación la presenta con el cuarzo. Con respecto a las asociaciones con mineralizaciones de Pb y Zn, éstas presentan bajas correlaciones que indican que no existe una conexión entre las altas concentraciones de Ag y estos elementos.

La mineralización de cobre se distribuye en forma de sulfuros en las muestras de profundidad y mayoritariamente como óxidos en superficie. Al igual como ocurre con la plata está ligada a las asociaciones minerales de baritina en la Unidad 2a y a albita y clorita en la Unidad 2b, en tanto que en superficie no presenta correlaciones con mineral alguno. Tampoco existen correlaciones significativas entre el cobre y las concentraciones de Pb y Zn.

La mineralización de plomo se encuentra concentrada en las unidades inferiores, especialmente en la Unidad 2a y se muestra asociada Ba y, en forma moderada, a Ca. En superficie las concentraciones son muy bajas y las asociaciones minerales principales corresponden a calcita y estilbita. El Pb no presenta correlación con Ag, Cu o Zn.

La mineralización de zinc se extiende en todas las unidades inferiores y se muestra empobrecida en las unidades superiores, en forma similar al Pb. En cuerpos de mena se encuentra asociado a baritina, calcita, feldespatos potásico y esmectita, mientras que en superficie se asocia a clorita.

En menor o mayor medida la mineralización metálica desarrollada en el Distrito Talcuna está asociada a baritina, lo que sugiere que este mineral precipitó directamente a partir de los fluidos hidrotermales. La ausencia de baritina en las muestras de superficie se ve asociada a la disminución de las concentraciones de Pb y Zn y no a Cu como lo indican las altas concentraciones de Cu total en superficie, hecho que está relacionado con el tipo de mineralización observado y que corresponde en gran parte a minerales oxidados de cobre.

### **IV.3 Conclusiones**

El Distrito Minero Talcuna aloja depósitos estratoligados de Cu-Ag de origen epigenético originado por soluciones hidrotermales que circularon a través de las discontinuidades preexistentes. Este tipo de ocurrencia está estrechamente ligado a un control estructural y litológico donde secuencias volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Quebrada Marquesa fueron receptivas a la mineralización.

Los datos geoquímicos obtenidos indican que la mineralización de cobre en el Distrito está asociada a altas concentraciones de Ag, Pb y Zn, pero estos elementos no se encuentran correlacionados, a excepción de Ag y Cu en las unidades inferiores. Conforme a estos resultados Pb y Zn no representarían elementos trazadores geoquímicos de mineralización de cobre necesariamente. Esto ocurre tanto en las muestras inferiores, donde la mineralización es principalmente hipógena, como en las unidades superiores, donde la mineralización es principalmente supergena.

Los estudios petrográficos y de difracción de rayos X permiten establecer una asociación de minerales de alteración de bajo grado, dominada por la presencia de clorita, albita y calcita, que se distribuye de manera homogénea a través de las diferentes unidades, siendo casi imposible distinguir entre una alteración hidrotermal (albitización, cloritización y carbonatización) asociada a la mineralización de cobre y un metamorfismo regional de muy bajo grado. Además, esta asociación de minerales se correlaciona a diferentes elementos químicos en las unidades inferiores de la Formación Quebrada Marquesa (Unidad 2a y 2b) y en las unidades superiores, lo que sugiere que en la zona superior ésta sería de origen metamórfico mientras que en la zona inferior estaría relacionada a fluidos hidrotermales, lo que podría ser confirmado con un estudio geoquímico mineral de las cloritas.

Las correlaciones mostradas entre los minerales de ganga con las concentraciones de elementos metálicos muestran diferencias significativas,

tanto entre las unidades inferiores de la Formación Quebrada Marquesa, como con las muestras de las unidades superiores en superficie, que pone de manifiesto la importancia de la litología en el control de la mineralización. En la Unidad 2a existe una directa relación de la mineralización de cobre a baritina, en la Unidad 2b se encuentra asociada a clorita, en tanto que en superficie la mineralización no presenta correlaciones con la ganga asociada. Este hecho sugeriría orígenes diferentes para las asociaciones minerales existentes.

El estudio litogeoquímico de las diferentes unidades del Distrito Minero, muestra que las concentraciones de Pb y Zn se concentran en las unidades inferiores de la Formación Quebrada Marquesa y esta disminuye hacia las unidades superiores en forma gradual, lo que concuerda con los resultados obtenidos con las muestras de ocurrencias minerales. Por otro lado, las concentraciones Cu, altas en las unidades inferiores, son variables en las unidades superiores, lo que sugiere una disminución en la intensidad de la mineralización de Cu.

## Referencias

Aguirre, L.; Egert, E. 1962. Las formaciones manganesíferas de la región de Quebrada Marquesa, Provincia de Coquimbo. *Revista Minerale*s, No. 76, p. 25-37. Santiago.

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

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.

Camus, F. 1986. Yacimientos estratoligados de Cu, Pb-Zn y Ag de Chile: In: Frutos, R Oyarzún, M Pincheira (eds.) *Geología y Recursos Minerale*s 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 (Editores) *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.

Chávez, W. 1974. Metamorfismo de contacto y alteración regional de rocas volcánicas en Santa Gracia. In *Coloquio sobre Fenómenos de Alteración y Metamorfismo en Rocas Volcánicas Intrusivas*. Universidad de Chile., Departamento de Geología., Publ. No. 41, p. 139-196.

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.

Emparan, C.; Pineda, G. 1999. Área Condoriaco-Rivadavia. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 12, escala 1:100.000.

Grant, J.A., 1986. The isocon diagram—a simple solution to Gresens equation for metasomatic alteration. *Econ. Geol.* 81, pp. 1976–1982.

Kamono, H. y Boric, R. 1982. Inventario Polimetálico y estudio geológico, distrito minero de Talcuna. SERNAGEOMIN, Santiago de Chile; 144 p.

Levi, B., Nyström, J., Padilla, H. y Vergara, M. 1988. Facies de alteración Regional en las secuencias volcánicas mesozoicas y cenozoicas de Chile Central. *Revista Geológica de Chile*, Vol 15, N°1; pp: 83-88.

MacLean, W.H., 1990. Mass change calculations in altered rock series. *Mineralium Deposita*, 25: 44-49.

MacLean, W.H. and Barrett, T.J., 1993. Lithogeochemical methods using immobile elements. *Journal of Exploration Geochemistry*, 48: 109-133.

Marquardt, C; Ponce, E; Hohf.,M; 2008. Recursos Inferidos en Cerro Tambor Distrito Minero Talcuna Región de Coquimbo. Informe Interno.

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 Sciences* 16: 459-476.

Morata, D.; Féraud, G.; Aguirre, L.; Arancibia, G.; Belmar, M.; Morales, S.; Carrillo, J. 2008. Geochronology of the Lower Cretaceous volcanism from the Coastal Range (29°20'-30°S), Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol 35, N°1; pp: 123-145.

Mourgues, F.A. 2004. Advances in ammonite biostratigraphy of the marine Atacama basin (Lower Cretaceous) northern Chile, and its relationship with Neuquén basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 17: 3-10

Munizaga, F.; Reyes, J.C.; Nystrom, J.O. 1994 Razones isotópicas de S de los sulfuros del distrito minero de Cerro Negro: un posible indicador de los depósitos estratoligados de Cu hospedados en rocas sedimentarias lacustres. *Revista Geológica de Chile*, Vol 21, N°1; pp: 189-195.

Oyarzun, R.; Ortega, L.; Sierra, J.; Lunar, R.; Oyarzun, J. 1998. Cu, Mn and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita* (1998) 33: 547-559

Payne, J. 1995. Geology Progress Report on the Talcuna District Region III, Chile. Informe Interno.

Peebles, F. 1966. Estudio geológico del distrito cuprífero de Talcuna. Instituto de Investigaciones Geológicas. Publicación especial. Santiago; 100 p.

Puig, A.; Spiro, B. 1988. The source of sulphur in polymetallic deposits in the Cretaceous magmatic arc, Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 1, No. 3, p.261-266

Rollinson, H.G. 1993. *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical. 352 p. Essex.

Salgado, C. 2004. El sistema estructural de los yacimientos del Distrito Minero de Talcuna, Provincia del Elqui, IV región de Coquimbo. Chile. 92 p. Universidad de Concepción. Chile. Tesis de Grado.

SERNAGEOMIN, 1982. Mapa Geológico de Chile, escala 1:1,000,000.

Thomas, H. 1967. Geología de la Hoja de Ovalle, Provincia de Coquimbo. *Inst. Invest. Geol. (Chile), Bol.*, No. 23, 58 p.



Toledo, A. 2004 Modelo Geológico Estructural con aplicación a la actividad en las minas Coca-Cola I y II Distrito Minero de Talcuna IV Región – Coquimbo Chile. Universidad de Concepción. Chile. Tesis de Grado.

Vergara, M.; Levi, B.; Nystrom, J.; Cancino, A. 1995. Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of central Chile. The Geological Society of America Bulletin 107: 1427-1440.

Vergara, M.; Nystrom, J. 1996. Geochemical features of Cogen Cretaceous back-arc lavas in Andean Cordillera, Central Chile (31-34°S). Revista Geológica de Chile 23 (1): 97-106.

Vivallo, W.; Henríquez, F. 1998. Génesis común de los yacimientos estratoligados y vetiformes de cobre del Jurásico Medio a Superior en la Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Revista Geológica de Chile 25 (2):199-228.