



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

DISTRIBUCIÓN Y OCURRENCIA DE MERCURIO EN EL YACIMIENTO DE TIPO
PÓRFIDO COBRE-MOLIBDENO RÍO BLANCO, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO
FELIPE ANDRE SPIESS GÓMEZ

PROFESOR GUÍA
MARTIN REICH MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
FERNANDO BARRA PANTOJA
CLAUDIO MARTÍNEZ MARTÍNEZ

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Geólogo
POR: Felipe Andre Spiess Gómez
FECHA: 13/01/2017
PROFESOR GUIA: Martin Reich Morales

DISTRIBUCIÓN Y OCURRENCIA DE MERCURIO EN EL YACIMIENTO DE TIPO PÓRFIDO COBRE-MOLIBDENO RÍO BLANCO, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE

En el presente trabajo se realizó un estudio del mercurio presente en el yacimiento Río Blanco, propiedad minera perteneciente a la División Andina de CODELCO. El trabajo presenta un análisis de la mineralización asociada al mercurio y un modelo de distribución de este elemento en el depósito.

Para el análisis se consideraron dos bases de datos existentes en la División Andina; la primera incluye análisis ICP-MS, reportes de análisis mineralógicos obtenidos por microscopía electrónica de barrido vía QEMSCAN y cortes transparentes/pulidos de muestras geometalúrgicas provenientes de sondajes diamantinos, que cubren gran parte del yacimiento. La segunda base corresponde análisis químicos vía absorción atómica y análisis mineralógicos vía QEMSCAN de muestras obtenidas del material de alimentación de la planta concentradora y de sus dos productos, concentrado de cobre y relave. Estas muestras representan el mineral que fue tratado en un mes.

Complementariamente, en esta memoria se presentan descripciones mediante microscopía óptica y análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) de muestras representativas de la alimentación y de los concentrados de cobre, con el objetivo de lograr identificar la ocurrencia y estilo de mineralización de los minerales portadores del mercurio.

Los resultados indican la presencia de mercurio en los cobres grises, específicamente en la solución sólida de tennantita-tetraedrita, en forma de impureza, a su vez estas sulfosales se encuentran como reemplazo en bordes y en planos de debilidad de los sulfuros de cobre principales del yacimiento, los cuales son calcopirita y bornita. Aunque debido al alto límite de detección de la técnica utilizada (1000 ppm) no se descarta que exista mercurio en menores concentraciones en otras fases minerales, pero esta fase debe contener a su vez antimonio, ya que la correlación entre estos dos elementos es alta, 0,93 en la alimentación y 0,87 en los concentrados de cobre.

El modelamiento indica que las mayores concentraciones de mercurio se encuentran en la zona norte del sector Don Luis, en dos cuerpos de alta ley de mercurio (sobre 1 ppm), que corresponden a volúmenes elongados en la dirección N30°E, que corresponde a la dirección de las fallas principales para este sector ya que la mineralogía asociada al mercurio posee un fuerte control estructural en su ocurrencia.

DEDICATORIA

*A mi madre, mi hermana, mi abuela y mi polola,
son ellas quienes guían mi camino.*

AGRADECIMIENTOS

A Martin Reich, mi profesor guía, por aceptar guiarme durante este proceso, siempre responder mis dudas, estar atento a los avances, ayudar a aterrizar mis ideas y todo el apoyo entregado.

A Fernando Barra, mi profesor co-guía, por aceptar ser parte de este proyecto, aportar con ideas y consejos para lograr mejorar el trabajo.

A Claudio, por la oportunidad entregada, la confianza depositada y por dejarme ser parte del equipo de geometalurgia, por sus constantes consejos y ayuda.

Al Núcleo Milenio Trazadores de Metales (NMTM) y sus integrantes por el apoyo entregado durante este proceso.

A Francisco, por su ayuda en la mineralogía óptica y en cualquier duda que me surgiera, por interesarse en mi trabajo y ayudarme a debatir, por su trastorno obsesivo compulsivo en la forma y la norma que le dio seriedad a este trabajo.

A César, por enseñarme todo lo que actualmente sé sobre geometalurgia, por toda la ayuda, por tomarse siempre el tiempo de resolver mis dudas o de hacerme contacto con gente que pudiese ayudarme, por su humor y los asados.

A Rocío Orellana, por el apoyo entregado durante los análisis SEM y estar siempre dispuesta a responder mis dudas.

A Claudia, Ricardo, David, Eli, Rene y Silvana, miembros de geología, porque fueron claves en algunos puntos de este trabajo y porque siempre me hicieron sentir parte del equipo.

A Mónica, mi madre, por todo el sacrificio y esfuerzo realizado para que siempre pudiera cumplir mis metas y sueños, este trabajo es reflejo de todo aquello que hiciste por mí, me faltan palabras para describir todo lo agradecido que me siento.

A Kristel, mi hermana y amiga incondicional, siempre has sido la voz de la razón y mi cable a tierra, porque sin ti no habría logrado llegar tan lejos.

A Allison, mi polola, por acompañarme gran parte de mi carrera universitaria, por el apoyo, la ayuda y el cariño incondicional que siempre me has dado.

A mis amigos de geología (las ratas), Vale, Nicha, Mati, Eitel, Javi, Dani, Nacho, por todos los momentos inolvidables que hemos pasado.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivo general	3
1.2	Objetivos específicos	3
1.3	Hipótesis de trabajo	3
1.4	Ubicación y vías de acceso.....	3
1.5	Trabajos anteriores	4
2	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	6
2.1	Unidades sedimentarias.....	6
2.2	Unidades volcánicas	7
2.3	Unidades intrusivas.....	9
2.4	Depósitos no-consolidados	9
3	MARCO GEOLÓGICO DEL YACIMIENTO RÍO BLANCO	12
3.1	Sector Río Blanco	14
3.2	Sector Don Luis.....	16
3.3	Sector Sur-Sur	18
4	MARCO METALOGÉNICO	21
4.1	Alteración hidrotermal y mineralización.....	21
5	METODOLOGÍA	24
5.1	Estudio exploratorio de datos geoquímicos.....	24
5.2	Análisis petrográfico y microscópico de muestras.....	26
5.3	Modelamiento geo-estadístico	26
6	RESULTADOS.....	28
6.1	Análisis exploratorio de datos	28
6.2	Ocurrencia mineralógica	39
6.3	Distribución de mercurio en el yacimiento.....	49
7	DISCUSIÓN	57
7.1	Confiableidad de los datos químicos y mineralógicos	57
7.2	Análisis exploratorio de datos	58
7.3	Ocurrencia mineralógica del mercurio.....	60
7.4	Distribución de mercurio	61
8	CONCLUSIÓN	63
9	BIBLIOGRAFÍA	64
10	ANEXO A	68
11	ANEXO B	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen estadístico de los datos de análisis ICP-MS de concentración de mercurio.....	29
Tabla 2 Matriz de correlación.....	32
Tabla 3 Resumen datos estadísticos.....	35
Tabla 4 Valores estadísticos para los resultados de análisis mediante SEM.....	45
Tabla 5 Pasos de estimación para el modelo de bloques.....	51
Tabla 6 Resumen estadístico para el modelo de bloques estimado.....	52

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1-1 Mapa con las principales vías de acceso hacia la División Andina.	4
Figura 2-1 Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Thiele (1980), Sellés y Gana (2001) y Sernageomin (2002).	11
Figura 3-1 Vista aérea de la ubicación de los principales cuerpos mineralizados en el yacimiento Río Blanco-Los Bronces, la línea roja marca el límite de propiedad minera de la División Andina.....	13
Figura 3-2 Vista en planta de las unidades litológicas presentes en el yacimiento Río Blanco.....	20
Figura 4-1 Vista en perfil de los tipos de alteración presentes para la sección XC330 del yacimiento.....	23
Figura 5-1 Diagrama de las fuentes de información utilizadas en el trabajo.	25
Figura 6-1 Histograma de las concentraciones de mercurio.	28
Figura 6-2 Resumen de datos estadísticos en gráfico tipo boxplot.	29
Figura 6-3 Mapa de distribución de muestras (vista en planta) con la litología presente al nivel 3.200.....	30
Figura 6-4 Mapa de distribución de muestras (vista en perfil).	31
Figura 6-5 Gráfico de distribución de muestras en las unidades litológicas.	31
Figura 6-6 Gráfico tipo Boxplot de las concentraciones de mercurio para las distintas unidades litológicas, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.	32
Figura 6-7 Gráfico tipo Boxplot de concentraciones de mercurio para diferente tipo de roca, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.....	33
Figura 6-8 Gráfico tipo Boxplot de las concentraciones de mercurio en función del tipo de alteración, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.	33
Figura 6-9 Gráfico tipo Boxplot de las concentraciones de mercurio en función de la zona de alteración, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.	34
Figura 6-10 Gráfico tipo Boxplot de las concentraciones de mercurio en función de la zona mineral, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.	34

Figura 6-11 Gráfico de distribución de muestras de la zona Py>Cpy en función del tipo de alteración.	35
Figura 6-12 Gráfico de dispersión para los valores de mercurio y las leyes de tennantita-tetraedrita.....	36
Figura 6-13 Gráfico de dispersión para los valores de mercurio y las leyes de pirita	36
Figura 6-14 Contenido de antimonio (línea roja) y mercurio (línea azul) en concentrados de cobre.....	37
Figura 6-15 Diagrama de correlación entre el mercurio y el antimonio contenido en los concentrados de cobre. La línea recta corresponde a la línea de tendencia.	37
Figura 6-16 Razón de enriquecimiento de mercurio en la planta de concentrado colectivo, los puntos rojos corresponden a los datos obtenidos para el año 2013 y los puntos azules para los datos de los años 2014 al 2016.....	38
Figura 6-17 Concentración de mercurio en concentrados de cobre en función del contenido de tetraedrita.	38
Figura 6-18 Histograma de la población de muestras ICP-MS y la población de cortes descritos en escala logarítmica.....	39
Figura 6-19 Mapa de distribución de muestras y cortes descritos (vista en planta).	40
Figura 6-20 Mapa de distribución de muestras y cortes descritos (vista en perfil).	40
Figura 6-21 Gráfico de distribución de cortes descritos en las unidades litológicas.....	41
Figura 6-22 A) Fotomicrografía de la muestra M-3841 con alteración sericita gris verde en nicoles cruzados. B) Fotomicrografía de la muestra M-3841 con alteración sericita gris verde en nicoles paralelos.	41
Figura 6-23 A) Fotomicrografía de la muestra M-4414 con alteración Cuarzo-Sericita en nicoles cruzados. B) Fotomicrografía de la muestra M-4414 con alteración Cuarzo-Sericita en nicoles paralelos.	42
Figura 6-24 A) Fotomicrografía de la muestra M-4417 con calcopirita (Cpy) en una vetilla. B) Fotomicrografía de la muestra M-4363 con calcopirita (Cpy) diseminada con rutilo (Ru).	42
Figura 6-25 A) Fotomicrografía de la muestra M-4481 tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en planos de debilidades de calcopirita (Cpy). B) Fotomicrografía de la muestra M-4707 con tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en planos de debilidades de calcopirita (Cpy).	43

Figura 6-26 A) Fotomicrografía de la muestra M-3841 tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en bordes de calcopirita (Cpy) y bornita (Bo). B) Fotomicrografía de la muestra M-3845 con tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en bordes de calcopirita (Cpy).....	43
Figura 6-27 A) Fotomicrografía de la muestra M-3841 tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en bordes de calcopirita (Cpy) y bornita (Bo). B) Fotomicrografía de la muestra M-3845 con tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en bordes de calcopirita (Cpy).....	43
Figura 6-28 A) Fotomicrografía de la muestra M-3860 con pirita (Py) y calcopirita (Cpy) en vetillas. B) Fotomicrografía de la muestra M-3860 con diseminado de pirita (Py) y calcopirita (Cpy).	44
Figura 6-29 A) Fotomicrografía de la muestra M-4418 con pirita (Py) y calcopirita (Cpy) en contacto por bordes mutuos y tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) reemplazando en debilidades a la calcopirita (Cpy). B) Fotomicrografía de la muestra M-3845 con de pirita (Py) con un borde envolvente de calcopirita (Cpy) y tennantita-tetraedrita reemplazando en bordes a la calcopirita (Cpy).....	44
Figura 6-30 Histograma de las concentraciones de mercurio obtenidas mediante análisis químico EDS en el microscopio electrónico de barrido.	45
Figura 6-31 A) Fotomicrografía de la briqueta a luz reflejada. B) Fotomicrografía de la muestra con electrones retro dispersados. C) Distribución de mercurio en la partícula. D) Distribución de arsénico en la partícula. E) Distribución de antimonio en la partícula. F) Espectro de emisión EDS de la partícula, las líneas rojas marcan los niveles energeticos utilizados en los mapas D y E.	46
Figura 6-32 A) Fotomicrografía de la briqueta a luz reflejada. B) Fotomicrografía de la muestra con electrones retro dispersados. C) Distribución de mercurio en la partícula. D) Distribución de arsénico en la partícula. E) Distribución de antimonio en la partícula. F) Espectro de emisión EDS de la partícula, las líneas rojas marcan los niveles energeticos utilizados en los mapas C, D y E.	47
Figura 6-33 A) Fotomicrografía de la briqueta a luz reflejada. B) Fotomicrografía de la muestra con electrones retro dispersados. C) Distribución de mercurio en la partícula. D) Distribución de arsénico en la partícula. E) Distribución de antimonio en la partícula. F) Espectro de emisión EDS de la partícula, las líneas rojas marcan los niveles energeticos utilizados en los mapas C, D y E.	48
Figura 6-34 Mapa variográfico en las 3 direcciones ortogonales principales.....	49
Figura 6-35 Mapa con la densidad de puntos para las 3 direcciones ortogonales principales.....	49
Figura 6-36 Variograma experimental: correlación espacial de las concentraciones de mercurio en el yacimiento Río Blanco.....	50

Figura 6-37 Modelo de variograma (línea roja) ajustado al variograma experimental (puntos azules) para las concentraciones de mercurio en el yacimiento Río Blanco.	51
Figura 6-38 Histograma de leyes de mercurio en el modelo de bloques.	52
Figura 6-39 Vista en planta de los cuerpos con concentraciones bajas, medias y altas de mercurio.	53
Figura 6-40 Perfiles de la sección XC355 del modelo de bloque con la topografía actual del sector Don Luis, en el perfil superior se pueden observar las zonas de alteración y en el perfil inferior se pueden observar las unidades litológicas.	54
Figura 6-41 Perfil de la sección XC185 del modelo de bloque con la topografía actual del sector Don Luis, en el perfil se puede observar las unidades litológicas.	55
Figura 6-42 Vista en planta del sector Don Luis, las líneas negras corresponden a la topografía actual del sector., los polígonos grises corresponde a las fallas principales descritas para este sector.	56

1 INTRODUCCIÓN

Durante los procesos de extracción y concentración de metales provenientes de yacimientos se generan diversos productos que generan contaminación al ambiente. La parte más crítica del proceso, donde se generan mayor cantidad de residuos tóxicos es durante la fundición. En este proceso algunos elementos liberados al ambiente pueden generar graves problemas para la población.

La fundición de minerales sulfurados conlleva la emisión de dióxido de azufre, el cual reacciona en la atmosfera generando ácido sulfúrico. En este proceso también se genera material particulado que es liberado a la atmosfera, que puede contener metales nocivos para la salud como arsénico, cadmio y mercurio.

Es por esto que un conocimiento acabado de los minerales presentes en los yacimientos, tanto de mena como de ganga, y como estos influyen en los procesos productivos que se llevan a cabo es de vital importancia para disminuir los impactos que la actividad minera genera en el medio ambiente.

La División Andina de CODELCO opera el yacimiento de tipo pórfido cobre-molibdeno Río Blanco, ubicado a 80 kilómetros al noreste de Santiago, en la comuna y provincia de Los Andes, 5^{ta} Región de Valparaíso. La explotación de minerales proviene de la mina subterránea Río Blanco y la mina rajo Don Luis.

Su principal producto son los concentrados de cobre y de molibdeno, los cuales pueden contener impurezas, que pueden generar beneficios, como la plata y el oro o ser penalizantes como el arsénico y el mercurio.

Dado el creciente aumento, en los últimos tres años, de las cantidades de mercurio presente en los concentrados de cobre, la compañía podría enfrentar dificultades en la venta de concentrado y potenciales penalizaciones por impurezas.

Es por aquello que nace la necesidad de estudiar en detalle las características químicas de los minerales que contienen dichas impurezas y cuál es su comportamiento en los distintos procesos de tratamiento que se llevan a cabo en la planta de producción de concentrado, ya que las características mineralógicas, el método de ocurrencia y el estilo de mineralización son variables que juegan un rol fundamental.

Por consiguiente se plantea como objetivo general el determinar la distribución y ocurrencia mineralógica del mercurio en el yacimiento y analizar la influencia de estas características en los procesos de producción de concentrado de cobre.

Esto se logra caracterizando los estilos de mineralización y las asociaciones mineralógicas donde se concentra el mercurio, y relacionar estos factores con las otras impurezas presentes en los concentrados tales como arsénico y antimonio, los cuales se encuentran estudiados con anterioridad y su comportamiento es más bien conocido.

Estudios previos proponen como responsable de la presencia de mercurio en la solución sólida tennantita-tetraedrita, debido a la buena correlación entre el mercurio y el antimonio, pero no existen análisis químicos de estas sulfosales que permitan concluir esta hipótesis.

Para llevar a cabo el trabajo se plantea una etapa de recopilación previa que conlleva la revisión, validación y análisis de la base de datos geoquímicos y mineralógicos del área de geometalurgia. Esta información se complementa con la descripción petro-calcográfica de cortes transparentes-pulidos de muestras que posean una concentración alta de mercurio para observar el estilo de mineralización de las sulfosales, seguido de un estudio mineralógico de detalle utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM) para realizar análisis químico cuantitativo y lograr observar posibles zonaciones o inclusiones de minerales de mercurio en fases de sulfuros.

El trabajo finaliza con una estimación del mercurio presente en el sector Don Luis, para esto se utilizan herramientas de geo-estadísticas y se modela utilizando el software *Vulcan* y se trabaja con el interpolador de kriging ordinario.

1.1 Objetivo general

- Determinar la distribución y ocurrencia del mercurio producto de los eventos de mineralización y alteración hidrotermal que dieron origen al depósito de pórfido cuprífero de Río Blanco y analizar su impacto en la producción de concentrado de cobre.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los estilos de mineralización y las asociaciones mineralógicas donde se concentra el mercurio en el yacimiento, con particular énfasis en las sulfosales de cobre.
- Identificar las asociaciones geoquímicas entre el mercurio y metaloides tales como el arsénico y antimonio, y evaluar la ocurrencia de éste en otras fases de sulfuros tales como la pirita.
- Aplicar este conocimiento de base para evaluar la influencia de la ocurrencia mineralógica en los procesos de flotación y obtención de concentrados de cobre.

1.3 Hipótesis de trabajo

En yacimientos de tipo pórfido cuprífero, el mercurio se relaciona a vetillas tardías de alta sulfuración, en forma de sulfuros (cinabrio) o sulfosales. Debido a que en los informes previos de mineralogía asociado al yacimiento Río Blanco no existe reporte de la presencia de cinabrio, se toma en consideración como hipótesis para la ocurrencia de mercurio, que este elemento se asocia a impurezas en la solución sólida tennantita-tetraedrita y/o inclusiones de cinabrio y/o impureza de mercurio en pirita.

1.4 Ubicación y vías de acceso

El yacimiento Río Blanco se encuentra ubicado en la Cordillera de Los Andes, región de Valparaíso, aproximadamente a 50 Km en línea recta al noreste de Santiago y a 47 Km al sureste de la ciudad de Los Andes, entre los 3.700 y 4.200 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas geográficas son 33°08' latitud sur y 70°15' longitud oeste.

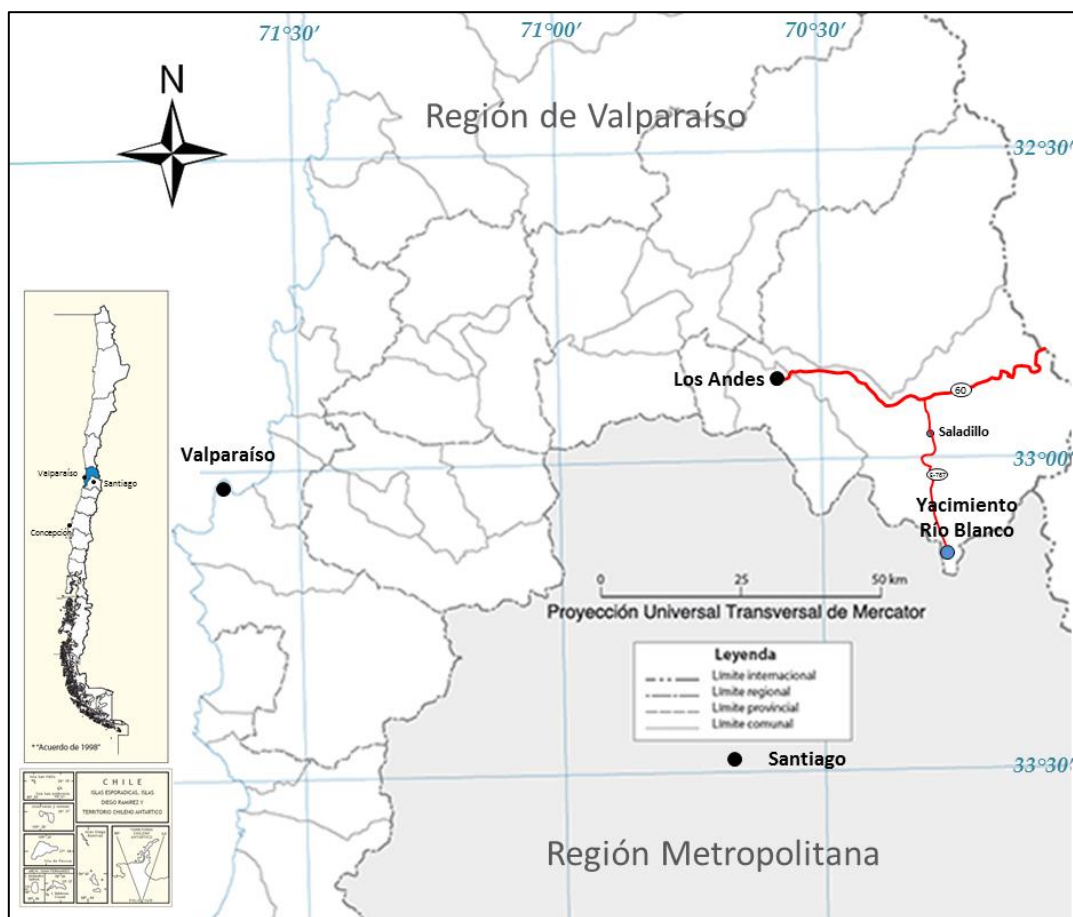


Figura 1-1 Mapa con las principales vías de acceso hacia la División Andina.

El acceso se efectúa a través de la ruta 60, que conecta la ciudad de Los Andes con el Paso Fronterizo Los Libertadores, hasta el kilómetro 35 donde se continúa hacia el sur por la ruta E-767 que conduce al campamento de Saladillo, ubicado a la cota de 1.650 m s.n.m. La mina subterránea Río Blanco se sitúa a 31 Km al sur de Saladillo, a una cota de 3.640 m s.n.m., mientras que a 1,6 Km al sur de la mina subterránea se localiza el rajo Sur-Sur, a una cota de 4.150 m s.n.m.

1.5 Trabajos anteriores

La geología del yacimiento Río Blanco ha sido ampliamente estudiada, desde Warnars *et al* (1985) que estudia y define el sistema de pórfido y brechas de turmalina que componen el yacimiento Río Blanco-Los Bronces hasta Deckart *et al.* (2013) que mediante dataciones U-Pb en circones, Re-Os en molibdenita y termocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en feldespatos potásicos refinan la evolución tiempo-espacio de los distintos procesos de alteración y mineralización.

Sin embargo, poco se ha trabajado en estudiar el comportamiento de algunos metaloides que se encuentran en los concentrados de cobre y de molibdeno, principales productos de la División Andina, es así como la química y mineralogía de las

fases portadoras de elementos como el mercurio es hasta ahora desconocida, aunque se sabe la no existencia de minerales sulfurados de mercurio, tales como el cinabrio.

Patrick y Hall (1985) estudian la tetraedrita, para identificar su estructura cristalina y como la celda unitaria define que elementos pueden entrar en sustitución iónica, es así como estudian que el mercurio se puede alojar dentro de este cristal al sustituir al cobre (Hg^{2+} por Cu^{2+}).

Otros estudios más actuales sobre elementos tóxicos en sistemas hidrotermales, indican que metaloides como el mercurio se pueden encontrar en fracciones desde decenas a miles de partes por millón (ppm) en fases minerales como piritas ricas en arsénico (Deditius y Reich, 2015). En sistemas hidrotermales de alta sulfuración algunos autores han reportado la presencia de mercurio en piritas de hasta un 7% (porcentaje en peso) (LeFort *et al.*, 2011) o también como sustitución en esfalerita (Rytuba, 2003) y también en otros sulfuros junto con oro y plata (Sladek *et al.*, 2002). Otros estudios sugieren también la presencia de mercurio en sulfatos y clorita (Aftabi y Azzaria 1983).

En cuanto a las sulfosales presentes en el yacimiento, estas se encuentran estudiadas por sus altos contenidos en arsénico, en minerales como tennantita, enargita y arsenopirita y plata, presente en la serie tennantita-tetraedrita.

Martínez (2013) realiza un estudio de la mineralogía asociada al arsénico, en relación a las diferencias químicas entre las especies predominantes y su distribución en el yacimiento Río Blanco, encontrando que el arsénico se encuentra en zonas someras del yacimiento y en vetas, aumentando su concentración hacia el norte del sector Don Luis, encontrando zonas de altas leyes asociado a las estructuras principales. En el caso de la plata, esta se encuentra como parte de la solución sólida de tennantita-tetraedrita y también puede encontrarse como nano partículas de mineral (pearceita y/o argentita) en los granos de estas sulfosales.

2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El yacimiento Río Blanco se encuentra emplazado en un sector donde afloran sucesiones de rocas estratificadas volcánicas y volcanoclásticas de origen marino y continental, las cuales se encuentran intruidas por rocas plutónicas de composición granodiorítica pertenecientes al batolito San Francisco de $16,4 \pm 0,2$ Ma (U-Pb en circones, Toro *et al.*, 2012). Las rocas volcánicas y las granodioritas se encuentran a su vez intruidas por cuerpos subvolcánicos del Plioceno (Thiele, 1980). Las unidades volcánicas se disponen de forma elongada con una orientación Norte-Sur, extruidas en una cuenca extensional de intra arco (Frikken, 2003), lo que favorece la morfología alargada del depósito con aproximadamente 4 kilómetros de largo y 1 kilómetro de ancho (Skewes y Stern, 1995).

2.1 Unidades sedimentarias

2.1.1 Formación Río Colina

Se encuentra en aparente concordancia sobre la Formación Nieves Negras (Álvarez *et al.*, 1997) y su techo es concordante con la Formación Río Damas.

Esta formación es una secuencia de rocas sedimentarias marinas, compuestas principalmente por calizas y lutitas calcáreas oscuras, lutitas fisibles finamente estratificadas, areniscas y conglomerados finos, con algunas intercalaciones de rocas andesíticas (Bustamante *et al.* 2010).

Según Thiele (1980), esta formación presenta yeso inter-estratificado y domos diapíricos de yeso que la intruyen.

El ambiente de deposición de la Formación Río Colina varía desde marino hipersalino, dado por los niveles de yeso evaporítico del miembro inferior y del miembro superior, a fluvial y litoral, representado por areniscas rojas del miembro medio. Por los fósiles encontrados, se le asignó una edad Caloviano-Oxfordiano y el espesor mínimo visible es de 800 m (Fock, 2005).

2.1.2 Formación Río Damas

Esta formación corresponde a una secuencia continental de casi 3.000 m de potencia que yace concordante sobre los niveles de yeso del Miembro Superior de la Formación Río Colina (Oxfordiano) y subyace concordantemente a las capas marinas del Titoniano pertenecientes a la Formación Lo Valdés (Thiele, 1980). Sin embargo, es posible observar a esta formación en contacto por falla sobre la Formación Lo Valdés al oeste del Estero Salinillas (Bustamante, 2010).

Corresponde a conglomerados y brechas conglomerádicas gruesas a medianas, con intercalaciones de areniscas, limonitas, lavas andesíticas y pequeños niveles de yeso (Fock, 2005). Según Klohn (1960) se define como un complejo clástico con sedimentos químicos esporádicos.

Su edad se estima dada su ubicación, la cual es concordante entre los estratos del Miembro Superior de la Formación Río Colina (Oxfordiano) y Formación Lo Valdés (Titoniano), como Kimmeridgiana. El ambiente deposicional de la Formación Río Damas ha sido considerado continental, subaéreo y lacustre (Klohn, 1960) o fluvial (Álvarez *et al.*, 1999).

2.1.3 Formación Lo Valdés

Corresponde a una secuencia de lavas andesíticas con algunas intercalaciones de sedimentos marinos en su miembro inferior y calizas, calizas fosilíferas, calcilitas, lutitas y areniscas calcáreas en su miembro superior (Hallam *et al.*, 1986). La base de esta formación es concordante con la Formación Río Damas, mientras que el techo es concordante con la Formación Colimapu (Thiele, 1980). El espesor estimado de esta formación es de 1.350 m, y se han encontrado fósiles de una edad Titoniano-Hauteriviano (Thiele, 1980; Hallam *et al.*, 1986).

Según Bustamante *et al.* (2010) la Formación Lo Valdés corresponde a fangolitas, lutitas, y areniscas finas calcáreas fosilíferas con intercalaciones de rocas volcanoclásticas, lutitas rojas, y depósitos evaporíticos.

2.1.4 Formación Colimapu

Conjunto sedimentario de origen terrestre con un espesor que alcanza aproximadamente 2.000 m. (Thiele, 1980). Subyace concordantemente la Formación Abanico (Charrier *et al.*, 1996) y sobreyace concordantemente a la Formación Lo Valdés (Thiele, 1980).

Presenta una secuencia continental con una predominante coloración rojiza de areniscas y lutitas, conglomerados de matriz arenosa, con intercalaciones de tobas, lavas andesíticas y calizas, en capas lateralmente discontinuas.

La edad mínima determinada para esta formación mediante carófitas fósiles, sería Albiano (Martínez y Osorio, 1963), y su edad máxima sería Hauteriviano, de acuerdo a sus relaciones de contacto.

2.2 Unidades volcánicas

2.2.1 Formación Abanico

Definida por Aguirre (1960) en la provincia de Aconcagua, como una secuencia de volcanitas y sedimentitas clásticas terrígenas de colores predominantes gris pardo y púrpura rojo-grisáceo. Su unidad litoestratigráfica es constituida por lavas básicas a intermedias, rocas piroclásticas ácidas, e intercalaciones sedimentarias continentales (fluviales, aluviales y lacustres) formando lentes de hasta 500 m de espesor (Charrier *et al.*, 2002a).

Tiene una amplia distribución al este de la ciudad de Santiago. Presenta un contacto concordante con la Formación Colimapu, que la subyace, y su techo está marcado por una discontinuidad con la Formación Farellones (Thiele, 1980).

Esta formación se encuentra plegada y es afectada por un metamorfismo de muy bajo grado (Aguirre, 1960; Thiele, 1980). El espesor del conjunto se estima en aproximadamente 3.000 m y de acuerdo a diversas dataciones radiométricas y estudios de fauna fósiles se le asigna una edad de Eoceno Superior – Mioceno (Charrier *et al.*, 2002a).

2.2.2 Formación Farellones

Formación definida por Klohn (1960) como una potente unidad constituida por sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, riolíticas, basálticas, y rocas piroclásticas que alternan con sedimentos derivados de la erosión de estas rocas. Thiele (1980) la define como una sucesión compuesta de lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas. Las lavas manifiestan un claro predominio sobre las tobas y brechas y la alternancia de rocas volcanoclásticas más finas, en tramos de 4 a 5 metros, producen una marcada estratificación en la serie.

El contacto inferior de esta formación se encuentra en discordancia angular con la Formación Abanico (Klohn 1960), y según las evidencias más recientes se puede describir como un contacto transicional con amplias variaciones tanto en la dirección norte-sur como en la dirección este-oeste. Se ha reportado en diversos sectores como discordante o pseudo-concordante, dependiendo de la reactivación de fallas asociadas a la inversión de la cuenca de la Formación Abanico (Godoy *et al.*, 1999; Charrier *et al.*, 2002a). El techo de esta formación corresponde a la actual superficie de erosión (Thiele, 1980; Rivano *et al.*, 1990).

A la Formación Farellones se le asigna una edad miocena de acuerdo a dataciones radiométricas. El espesor reportado para la Formación Farellones es de 2.500 m, aumentado por los numerosos intrusivos y lacolitos del Mioceno Superior-Plioceno que la intruyen (Thiele, 1980; Rivano *et al.*, 1990).

2.2.3 Formación Colorado – La Parva

Está definida por Thiele (1980) como un conjunto de rocas integrado por pórfidos riolíticos, en estructuras de tipo domos y cuellos volcánicos, asociados a flujos de lavas, tobas y brechas de composición traquítica, andesítica, dacítica y riolítica. En algunos casos, las rocas estratificadas se superponen en discordancia angular leve con la Formación Farellones. El techo de la formación es la actual superficie de erosión. Dataciones K-Ar indican un rango de 4,9 a 3,9 Ma (Plioceno; Rivano *et al.*, 1985).

Se consideran pertenecientes a esta unidad todos los cuerpos volcánicos y subvolcánicos que cortan a la Formación Farellones. Para el caso del área del yacimiento Río Blanco, los cuerpos subvolcánicos y volcánicos pertenecientes a la Formación Río Blanco (Stambuk *et al.*, 1985) como Pórfido Don Luis y Chimenea Dacítica, pueden asignarse a la Formación Colorado – La Parva.

2.3 Unidades intrusivas

2.3.1 Batolito San Francisco

Corresponde a una franja miocena de batolitos calco-alcalinos, plutones y diques que intruyen las lavas y depósitos volcanoclásticos de la Zona Volcánica Sur en la Cordillera Principal. Esta unidad agrupa a los intrusivos más antiguos del área, cubriendo un área de 200 Km² en las vecindades del yacimiento Río Blanco (Serrano *et al.*, 1996).

En este sector, la unidad se compone de múltiples plutones elongados con dirección norte-sur, que intruyen a las formaciones Abanico y Farellones (Stambuck *et al.*, 1993 y Warnars *et al.*, 1985). El batolito contiene granitoides de distintas texturas y composiciones, principalmente dioritas, dioritas cuarcíferas, granodioritas, monzonitas cuarcíferas, dioritas cuarzo-monzoníticas y, de forma subordinada, sienitas cuarcíferas y diques aplíticos (Skewes y Holmgren, 1993). Dataciones U-Pb en circones detríticos indican edades de $16,4 \pm 0,2$ a $8,4 \pm 0,2$ Ma para estas rocas (Toro *et al.*, 2012).

2.3.2 Intrusiones Tambillos

Estas intrusiones son expuestas en la franja limitada por las Intrusiones Chalinga al oeste y el Batolito San Francisco al este. Consisten predominantemente en pórfidos dacíticos leucocráticos, de un característico color blanco en sus afloramientos (Rivano, 1995). De acuerdo a dataciones K-Ar, esta unidad se emplazó durante el Mioceno tardío, entre los 9,8 y 6,5 Ma (Rivano, 1995).

2.3.3 Complejo subvolcánico Río Blanco

Emplazado durante el Plioceno, es volumétricamente menor que el Batolito San Francisco e incluye monzodioritas, monzonitas, pórfidos cuarzo-feldespáticos, pórfidos dacíticos, dacitas, riódacitas y riolitas (Rivano, 1995). Se encuentra íntimamente asociado con la mineralización de Cu-Mo en el distrito Río Blanco-Los Bronces y, de acuerdo a dataciones K-Ar, se emplazó entre los 5,2 y 3,9 Ma (Serrano *et al.*, 1996).

2.4 Depósitos no-consolidados

2.4.1 Depósitos fluviales

Según Bustamante *et al.* (2010) corresponden a depósitos que rellenan el lecho actual de los ríos o la salida de algunas quebradas de escorrentía estacional.

2.4.2 Depósitos coluviales

Corresponden a los depósitos de sedimentos recientes más abundantes de la zona de estudio. Forman escombros de falda en las laderas de los cerros, pero también forman abanicos de fuerte pendiente (Bustamante *et al.*, 2010).

2.4.3 Depósitos aluviales

Estos depósitos son reconocidos por formar abanicos aluviales a la salida de las quebradas que desembocan en el río Yeso, exhibiendo menores pendientes que los abanicos coluviales (Bustamante *et al.*, 2010). Corresponden a clastos tamaño bloques, gravas, arenas, limos, y arcillas (Thiele, 1980).

2.4.4 Depósitos fluvio-aluviales

Estos depósitos forman extensas planicies en los valles y, en varios casos, se presentan cortados por cursos fluviales trenzados actuales (Bustamante *et al.*, 2010). En el sector de las Termas del Plomo existe una planicie que probablemente sea de origen fluvio-aluvial.

2.4.5 Depósitos morrénicos

Según Bustamante *et al.* (2010), se agrupan morrenas laterales y frontales de glaciares y glaciares de roca actuales, que se observan en el Estero Aparejo, Estero Caballos, Quebrada Yeso, Estero Pirámide, Estero El Plomo y Estero Salinillas.

2.4.6 Depósitos fluvio-glaciales

Bustamante *et al.* (2010) los define como depósitos de superficie suave, cortados por depósitos fluviales modernos, que se interpreta como de retrabajo de depósitos morrénicos. Afloran aguas debajo de la morrena frontal del Estero Salinillas. Thiele (1980) los agrupa con los depósitos fluviales y aluviales por sus composiciones similares.

2.4.7 Deslizamientos

Este tipo de depósito tienen superficies irregulares que rellenan los valles o que conforman parte de las laderas de estos, donde suele quedar expuesta parte de la 'cárcava o cicatriz' del deslizamiento (Bustamante *et al.*, 2010).

2.4.8 Depósitos lacustres

Depósitos finos de limos y arcillas, finamente laminados, acumulados detrás de morrenas frontales y desmoronamientos en los valles de ríos como por ejemplo en el Río Yeso (Thiele, 1980).

Mapa Geología Regional 1:400.000

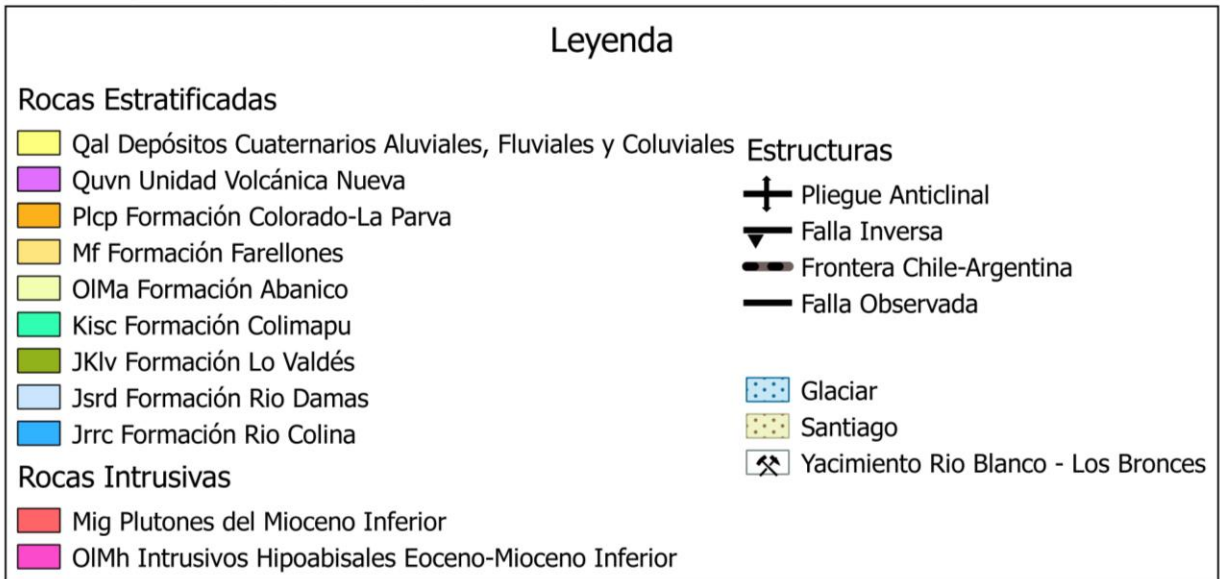
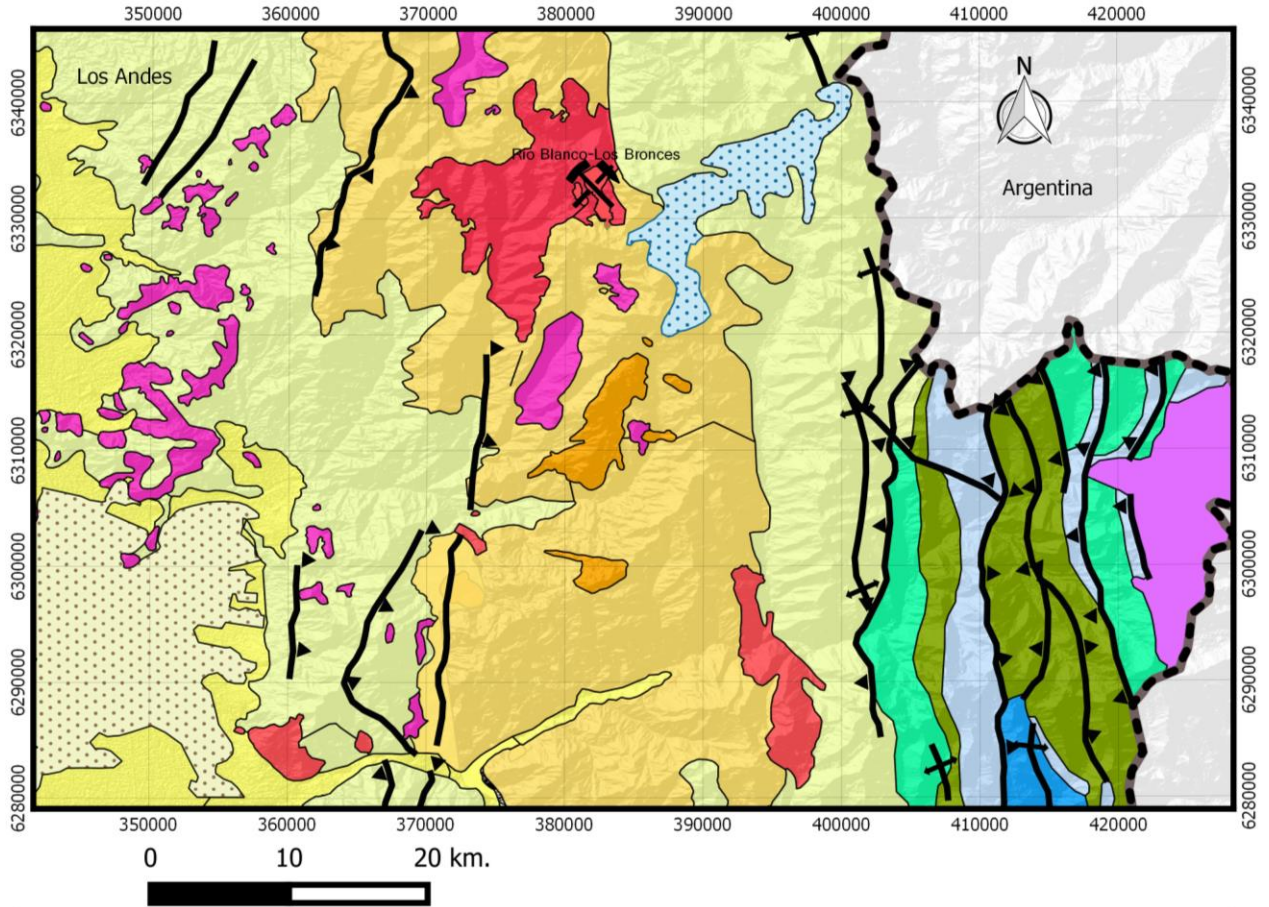


Figura 2-1 Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Thiele (1980), Sellés y Gana (2001) y Sernageomin (2002).

3 MARCO GEOLÓGICO DEL YACIMIENTO RÍO BLANCO

El yacimiento Río Blanco–Los Bronces corresponde a un depósito del tipo pórfido de cobre y molibdeno y se ubica en el sector de las nacientes de los ríos Blanco y San Francisco. La propiedad de este mega yacimiento está compartida entre la filial Sur Andes de Anglo American y División Andina de Codelco Chile. Más de dos tercios del total de recursos del yacimiento se ubican en el sector de Andina y el resto en el sector de Sur Andes. En el sector de Sur Andes se explotan dos cuerpos mineralizados principales denominados Donoso e Infiernillo y en el sector de Andina, tres cuerpos mineralizados principales denominados Río Blanco, Don Luis y Sur Sur. Adicionalmente, resultados recientes de exploración han identificado recursos geológicos en los sectores denominados San Enrique-Monolito (Anglo American), al sureste de Infiernillo, y La Americana (Codelco), al sur de Sur Sur. En la Figura 3-1 se observa la ubicación relativa de los cuerpos mencionados.

Si bien se identifican varios cuerpos mineralizados en el distrito, genéticamente corresponden a un solo yacimiento, en el que ocurren varios pulsos de mineralización y los cuerpos mineralizados son truncados por intrusiones post-minerales de carácter estéril.

El yacimiento Río Blanco presenta una forma elongada irregular con una orientación general N30°W, con una longitud de más de 5 km y un ancho que varía entre 250 m y 2 km (Figura 3-1). En dirección vertical se reconoce mineralización desde superficie (3.900-4.200 m.s.n.m.) hasta más abajo del nivel 30 (2.520 m.s.n.m.) lo que constituye una columna de roca mineralizada conocida de más de 1.500 m.

Las rocas volcánicas que afloran en el yacimiento Río Blanco corresponden a estratos de la Formación Farellones que sobreyacen en forma discordante a la Formación Abanico. En esta zona, la Formación Farellones se compone de andesitas y tobas riolíticas de edades radiométricas de $17,2 \pm 0,05$ Ma (Deckart y *et al.*, 2005). Son las rocas más antiguas del yacimiento y se encuentran intruidas por el Batolito San Francisco y por los complejos subvolcánicos posteriores.

Las rocas intrusivas más antiguas en el yacimiento corresponden a granodioritas, monzonitas cuarzíferas, tonalitas y dioritas cuarcíferas pertenecientes al Batolito San Francisco (Stambuk *et al.*, 1982; Serrano *et al.*, 1996). Presentan variaciones texturales de alotriomórfica granular, hipidiomórfica granular y localmente porfídica (Stambuk *et al.*, 1982). Intruyen a la Formación Farellones y, a su vez, se encuentran intruidas por rocas porfídicas del Mioceno y por rocas subvolcánicas del Plioceno, además, hospedan a los cuerpos de brechas mineralizadas (Stambuk *et al.*, 1982, 1985).

Existen dos complejos de brechas definidos por Vergara y Latorre (1984), éstas se desarrollan en la parte superior del pórfido cuprífero y se conocen como complejo de brechas Río Blanco y complejo de brechas Sur Sur.

El complejo de brechas Río Blanco está ubicado en el sector Río Blanco (Figura 3-1) y se compone de múltiples brechas mineralizadas que se hospedan en la unidad Granodiorita Río Blanco y en la Formación Farellones (Serrano *et al.*, 1996). En este complejo se han reconocido los siguientes tipos de brecha: de turmalina, de biotita, de polvo de roca, de sílice-feldespatos potásicos y de anhidrita.

Por otra parte, en el sector Sur Sur afloran un conjunto de brechas en una franja elongada de orientación N30°W de más de 5 kilómetros (Figura 3-1) (Serrano *et al.*, 1996). Presentan contactos abruptos y nítidos que se extienden por más de 1.000 m bajo la superficie actual (Serrano *et al.*, 1996). Existen múltiples relaciones de corte entre brechas que evidencian que su generación se habría producido a partir de múltiples pulsos de brechización (Vargas *et al.*, 1999). Como parte de este complejo se incluyen las brechas: de turmalina, tobácea, de hematita y monolito.

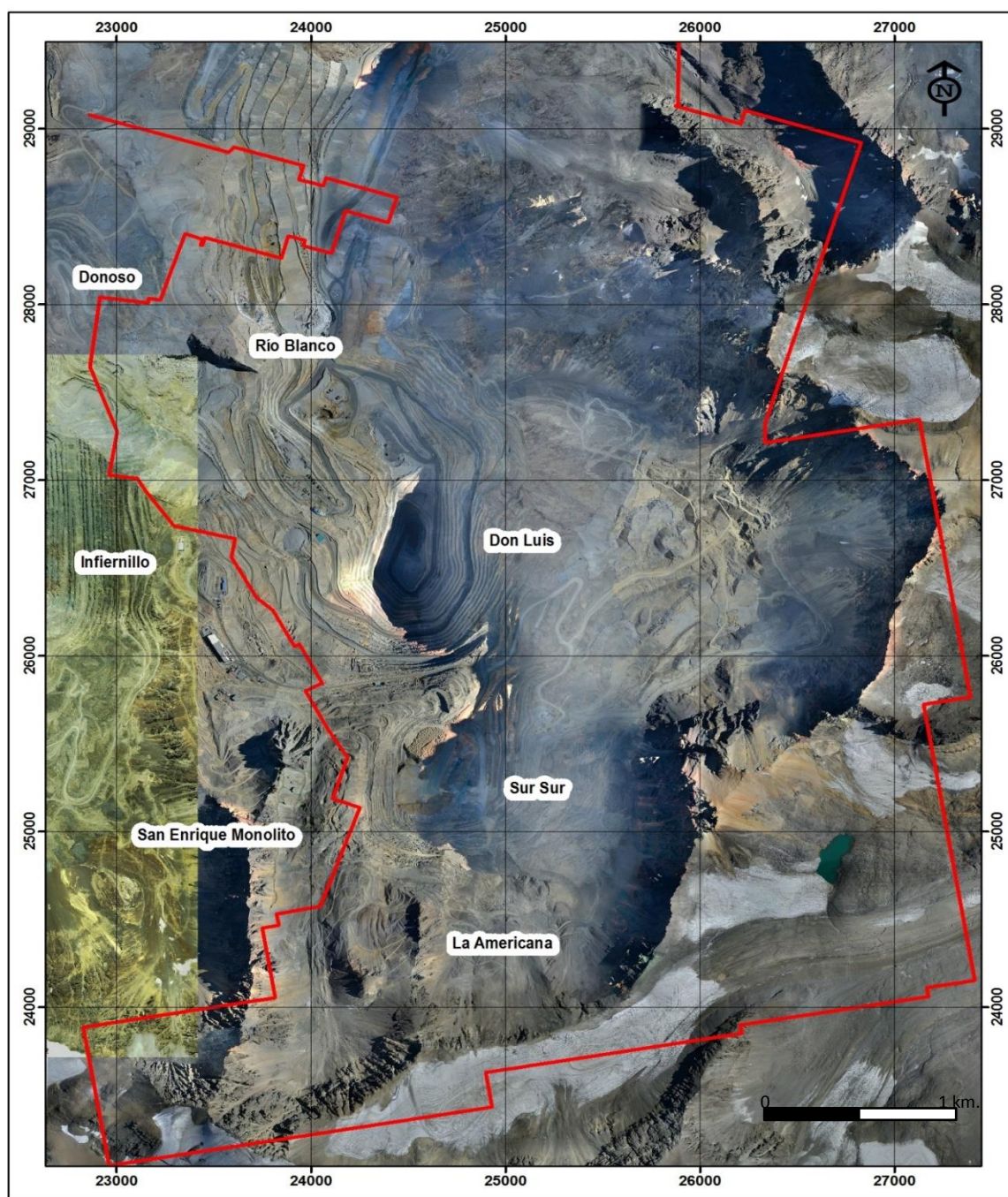


Figura 3-1 Vista aérea de la ubicación de los principales cuerpos mineralizados en el yacimiento Río Blanco-Los Bronces, la línea roja marca el límite de propiedad minera de la División Andina.

3.1 Sector Río Blanco

El sector Río Blanco se ubica en el extremo norte del yacimiento. Corresponde a un cuerpo mineralizado elongado en dirección N30°W, de aproximadamente 1.500 m de largo y entre 250 y 800 m de ancho, con extensión en la vertical de aproximadamente 1.400 m, reconocida por sondajes profundos de aproximadamente 1.000 m de longitud (Figura 3-2). Parte de este sector actualmente se explota subterráneamente por División Andina mediante el sistema de hundimiento por bloques, desde la cota 3.235 m.s.n.m.

3.1.1 Rocas volcánicas

Andesita (AN)

Son las rocas más antiguas del sector, La edad de esta unidad ha sido datada en $17,20 \pm 0,05$ Ma (U-Pb, circón), que es correlacionable con las edades obtenidas por Deckart *et al.*, (2005). Esta unidad corresponde a rocas de textura porfídica a afanítica, cuya masa fundamental presenta desarrollo variable de biotita secundaria con fenocristales (aproximadamente un 20% de la roca total) por lo general de tamaño inferior a 3 mm compuesto casi exclusivamente por plagioclasa y escasos minerales máficos (probablemente anfíbol) pseudomorfizados a biotita.

3.1.2 Rocas intrusivas

Granodiorita Río Blanco (GDRB)

Corresponde a una granodiorita a monzodiorita cuarcífera de textura fanerítica de grano grueso a medio y color gris rosáceo formada por cristales variables en tamaño entre 0,5 a 5 mm comúnmente con una composición promedio formada por plagioclasa (45-55%), feldespato potásico (12- 18%), cuarzo (17 a 28%) y biotita (6-10%).

Con una edad de $11,96 \pm 0,04$ Ma (Deckart *et al.*, 2005), se encuentra cubierta por rocas de la Formación Farellones y truncada hacia el este por la Chimenea Dacítica (Stambuk *et al.*, 1985). Presenta asociaciones mineralógicas relacionadas a la alteración potásica, a zonas mineralizadas de tipo diseminado y a vetillas de tipo stockwork (Serrano *et al.*, 1996).

Pórfido cuarzo-monzonítico (PQM)

Corresponde a un pórfido de composición dacítica formado por un 45% a 70% de fenocristales de tamaño variable entre 0,7 a 5 mm consistentes esencialmente en plagioclasa (40-50%), cuarzo (3-8%), máficos (2-7%) correspondientes esencialmente a biotita y ocasionalmente anfíbol, feldespato potásico (menor a 3% o ausente). La masa fundamental corresponde a un agregado felsítico de tamaño variable entre 0,1 a 0,3 mm compuesto mayoritariamente por cuarzo y feldespato potásico y plagioclasa variable entre un 3 y 15%.

3.1.3 Brechas hidrotermales

Brecha cuarzo-feldespato potásico (BXSK)

Brecha comúnmente polimíctica destacándose clastos de granitoides, pórfidos dacíticos y brechas de turmalina como los más comunes. La matriz se compone de un agregado cristalino fino de cuarzo y feldespato potásico, proveniente por lo general de recristalización de polvo de roca. La matriz también puede contener cantidades apreciables de albita, biotita y anhidrita. La alteración de los clastos en este tipo de brecha está estrechamente asociada con la matriz siendo común que los clastos posean alteración de feldespato potásico y biotita, registrándose ocasionalmente además en los bordes de los clastos un aumento de la alteración lo que da un aspecto difuso al contacto clasto-matriz. La edad asignada a esta unidad proviene de una datación Ar/Ar en feldespato que arroja una edad de $5,14 \pm 0,1$ Ma (Bertens y Solé, 2013).

Brecha de anhidrita (BXANH)

Brecha monomíctica o comúnmente polimíctica cuando se presenta sobreimpuesta a otros eventos. Está compuesta por clastos de granitoides, pórfidos y brechas anteriores (lo más común es encontrar clastos de granitoides y/o brechas de turmalina, brechas de biotita y brechas de sílice-feldespato potásico). La anhidrita se presenta como cemento que rellena completamente los espacios entre clastos o bien se canaliza por las matrices de los antiguos eventos de brechización. Además en la matriz se encuentra comúnmente feldespato potásico y albita.

Brecha de biotita (BXB)

Brecha monomíctica o polimíctica según se encuentre afectando a eventos de brechización anteriores. Presenta clastos de granitoides generalmente afectados por biotización selectiva. Es común también la presencia de clastos de granitoides craquelados por turmalina o clastos de brecha de turmalina propiamente tal. En menor medida se observan clastos de pórfidos dacíticos y de andesitas. La matriz está formada por biotita fina de coloración pardo verdosa, usualmente asociada con turmalina fina de hábito prismático y polvo de roca.

Brecha de polvo de roca (BXPR)

Consiste en una brecha monomíctica o polimíctica pudiendo presentar clastos de litologías variadas como granitoides, pórfidos dacíticos, andesitas y brechas de turmalina entre otros. La matriz corresponde a un agregado clástico fino menor a 3 mm compuesto de plagioclasas, cuarzo, feldespato potásico y menor biotita. Este material proviene de la trituración misma de la roca afectada por el fenómeno de brechización, sin embargo también se encuentran dentro de la matriz presenta biotita hidrotermal (la que puede llegar a ser un componente en cantidades importantes sobre todo en el sector Río Blanco), turmalina, cuarzo y/o feldespato potásico comúnmente recristalizados, anhidrita y magnetita.

Brecha turmalina (BXT)

Brecha monomítica con clastos mayoritariamente de granitoides y/o Diorita y en menor medida pórfidos dacíticos. La matriz está constituida principalmente por turmalina en forma de agregados aciculares o radiales de cristales prismáticos. Este hábito lo exhibe la turmalina principalmente cuando se encuentra como cemento, cuando se presenta como matriz (fragmentos de turmalina de eventos anteriores) tiende a presentarse como cristales muy finos y generalmente intercrecida con fragmentos menores de cristales de cuarzo y feldespatos consistentes en polvo de roca. Otros constituyentes que forman parte de la matriz son cuarzo (principalmente como cemento), biotita, magnetita y anhidrita. Los clastos de la brecha de turmalina presentan comúnmente una zonación característica de alteración de albita-feldespato potásico en los bordes pasando a biotita verde hacia el centro de los clastos.

Brecha hematita (BXHEM)

Corresponde a una brecha polimítica, con predominancia de clastos de granitoides y de pórfidos dacíticos, aunque la composición puede llegar a ser más variada si es que la brecha se sobre impone a antiguos eventos de brechización. Los clastos se encuentran fuertemente alterados a sericita, cuarzo, arcillas, carbonatos y menor clorita. La matriz está formada principalmente por hematina (especularita), en ocasiones con reemplazo parcial a total por magnetita (mushketovita), cantidades variables de anhidrita (ocasionalmente asociada con yeso), carbonatos (principalmente siderita-ankerita) y clorita. También la matriz suele estar compuesta fuertemente por sulfuros (calcopirita y pirita).

3.2 Sector Don Luis

El sector Don Luis se ubica en la parte central del yacimiento Río Blanco (Figura 3-2) y su explotación se desarrolla a rajo abierto. Este sector comprende una extensa zona que abarca 2.000 m en dirección NS, con un ancho variable entre 600 a 800 m. Actualmente en la vertical se reconoce mineralización desde superficie (3.800 m.s.n.m.) y se prolonga más abajo del nivel 30 (2.520 m.s.n.m.) lo que constituye una columna mineralizada superior a 1.300 m.

3.2.1 Rocas volcánicas

En este sector se encuentra la unidad Andesita (AN), misma unidad anteriormente descrita.

3.2.2 Rocas intrusivas

Diorita (DIOR)

Posee una edad de cristalización de $8,16 \pm 0,45$ Ma obtenida mediante U-Pb en circones (Deckart *et al.*, 2005). Composicionalmente esta unidad varía entre diorita propiamente tal y cuarzo-diorita. Consiste en una roca con cristales no superiores a 2

mm compuestos en promedio de plagioclasas (70%-75%), cuarzo (0%-10%), biotita (5%-7%), anfíbol (6%-10%) y feldespato potásico ausente o en cantidades inferiores a 4%. La roca presenta textura equigranular. La variedad de grano fino está biotizada y posee cuarzo primario y en menor cantidad secundario.

Granodiorita Cascada (GDCC)

Corresponde a una granodiorita, tonalita, cuarzodiorita o monzodiorita formada por cristales variables en tamaño entre 0,3 a 3 mm (de menor tamaño que la Granodiorita Río Blanco) con una composición promedio formada por plagioclasa (55%-65%), feldespato potásico (7%-18%), cuarzo (12% a 22%) y biotita (4%-6%), anfíbol (2%-5%) con una textura inequigranular y localmente puede presentar variaciones con mucha diferencia de tamaño entre los cristales de plagioclasa y máficos respecto de los de cuarzo y feldespato dándole un aspecto porfídico a la roca.

Pórfido Don Luis (PDL)

Corresponde a un pórfido dacítico pero de textura 'pseudofragmental' observándose numerosos fenocristales 'quebrados' y con bordes de reacción. Está formado por un 35% a 55% de fenocristales de tamaño variable entre 0,5 a 7 mm consistentes fundamentalmente en plagioclasa (20%-40%), cuarzo (7%-15%), feldespato potásico (2%-5%) y biotita (2%-4%). La masa fundamental consiste en un agregado cristalino extremadamente fino comúnmente inferior a 0,03 mm formado un intercrecimiento muy fino de cuarzo y feldespato potásico, con ocasional biotita formando parte de la masa fundamental no superior al 2%. En ocasiones la masa también corresponde a intercrecimiento de cuarzo-feldespato proveniente de desvitrificación.

Existe otra facies de este pórfido que presenta características composicionales y texturales sustancialmente distintas. Se trata de una variedad de tamaño más fino y textura más 'abierta' compuesta por un 30-35% de fenocristales, fundamentalmente de plagioclasa (20-30%), cuarzo (2-5%), biotita (3-5%) y ocasional anfíbol. Comúnmente esta variedad presenta 2 poblaciones de fenocristales de tamaños variables entre 0,5 y 1,5 mm y otra entre 2,5 y 4 mm. La masa fundamental es de tamaño inferior a 0,1 mm compuesta en su mayoría por microlitos de plagioclasa en textura pilotaxítica

También podemos encontrar la unidad Granodiorita Río Blanco (GDRB) anteriormente descrita.

3.2.3 Brechas hidrotermales

Brecha de pórfido (BXP)

Brecha caracterizada por presentar clastos de variada litología encontrándose en mayor medida granitoides, pórfidos dacíticos, andesitas y brechas de turmalina o de polvo de roca. La matriz presenta a la unidad Pórfido Don Luis ya que éste presenta una naturaleza explosiva que brechiza a la roca hospedante, encontrándose fragmentos (angulosos) de éstas y no xenolitos. En los casos en que se observa 'matriz' de PQM o

PFELD más bien parece ser que se trata de xenolitos de las rocas hospedantes que fueron incorporados dentro del pórfido. Además ésta unidad suele exhibir una naturaleza autoclástica observándose con frecuencia clastos del propio pórfido (PDL) que se observan con su masa fundamental más 'limpia' que la de la masa fundamental que constituye la matriz de la brecha, esto porque al ser un pórfido en sí de naturaleza explosiva en las zonas donde forma brecha tienden a desarrollarse también zonas de 'polvo de roca' conjuntamente con la masa fundamental.

En este sector también se pueden encontrar la unidad Brechas de Turmalina (BXT), la unidad Brechas de Feldespato Potásico (BXSK) y la unidad Brechas de Biotita (BxB) que fueron anteriormente descritas para el sector Río Blanco.

3.3 Sector Sur-Sur

El sector Sur Sur se ubica en el extremo Sur del yacimiento Río Blanco en una franja de orientación Norte-Sur (Figura 3-2) desarrollándose una explotación a cielo abierto de los cuerpos mineralizados, principalmente brechas. Las unidades de brechas han sido reconocidas por aproximadamente 1.200 m de largo en sentido NS y alrededor de 400 m de ancho, con extensión en la vertical de aproximadamente 1.400 m.

3.3.1 Rocas volcánicas

En este sector se encuentra la unidad Andesita (AN), misma unidad anteriormente descrita.

3.3.2 Rocas intrusivas

En este sector se encuentra las unidades intrusivas Granodiorita cascada (GDCC) y Diorita (DIOR).

3.3.3 Brechas hidrotermales

Brecha monolito (BXMN)

Brecha de composición sumamente diversa, con dominancia de clastos de andesita, pórfidos dacíticos y andesíticos, brechas de turmalina, granitoides, dioritas y apilitas como los principales. La matriz está dominada por polvo de roca, que se encuentra junto a biotita, turmalina, clorita, feldespato potásico, sericita, anhidrita y magnetita entre otros ya sea como cemento o matriz propiamente. En general, los clastos de la brecha presentan fuerte alteración de biotita y clorita, fundamentalmente andesitas, brechas volcánicas andesíticas (auto brechas) y pórfidos andesíticos), así como también biotita y feldespato potásico (granitoides), mientras que independiente del tipo de clastos y también en la matriz se presenta una alteración de grado variable de sericita, arcillas o limonitas. Aflora en el flanco oeste del complejo de brechas Sur-

Sur, constituyendo una roca estéril en concentraciones de cobre y molibdeno (Stambuk *et al.*, 1985).

Brecha tobácea (BXTO)

Corresponde a una brecha polimíctica compuesta de clastos de andesitas, pórfidos dacíticos y andesíticos, granitoides y rocas volcanoclásticas. La matriz se compone fundamentalmente de polvo de roca, cuarzo y mucha menor cantidad carbonatos, clorita, turmalina, biotita, magnetita. La alteración que por lo general presenta esta brecha, particularmente en sus clastos, es de sericita, arcillas, carbonatos y limonitas. También algunas de estas brechas presentan material volcanoclástico triturado en su matriz, observándose 'vitroclastos' (fragmentos de vidrio) comúnmente desvitrificados o fuertemente alterado a arcillas, sericita, carbonato y clorita. Presenta un grado de mineralización bajo, aunque cerca del contacto con la BXT presenta concentraciones altas de cobre y molibdeno (Stambuk *et al.*, 1985).

Brecha turmalina tobácea (BXTTO)

Presenta una composición y aspecto similar a la BXTO, sin embargo se caracteriza por presentar turmalina como un componente importante en su matriz, además de polvo de roca que forma la mayor parte de ésta. Los clastos son de diversa composición al igual que en la BXTO pero destacan los de pórfido dacítico y granitoides, reconociéndose en menor medida clastos de brecha de turmalina, andesitas y rocas volcanoclásticas. Contiene proporciones muy inferiores de sulfuros de cobre y hierro (Stambuk *et al.*, 1985).

Además de las unidades mencionadas anteriormente se pueden encontrar las unidades de Brecha de Turmalina (BXT) y Brecha de Biotita (BXB).

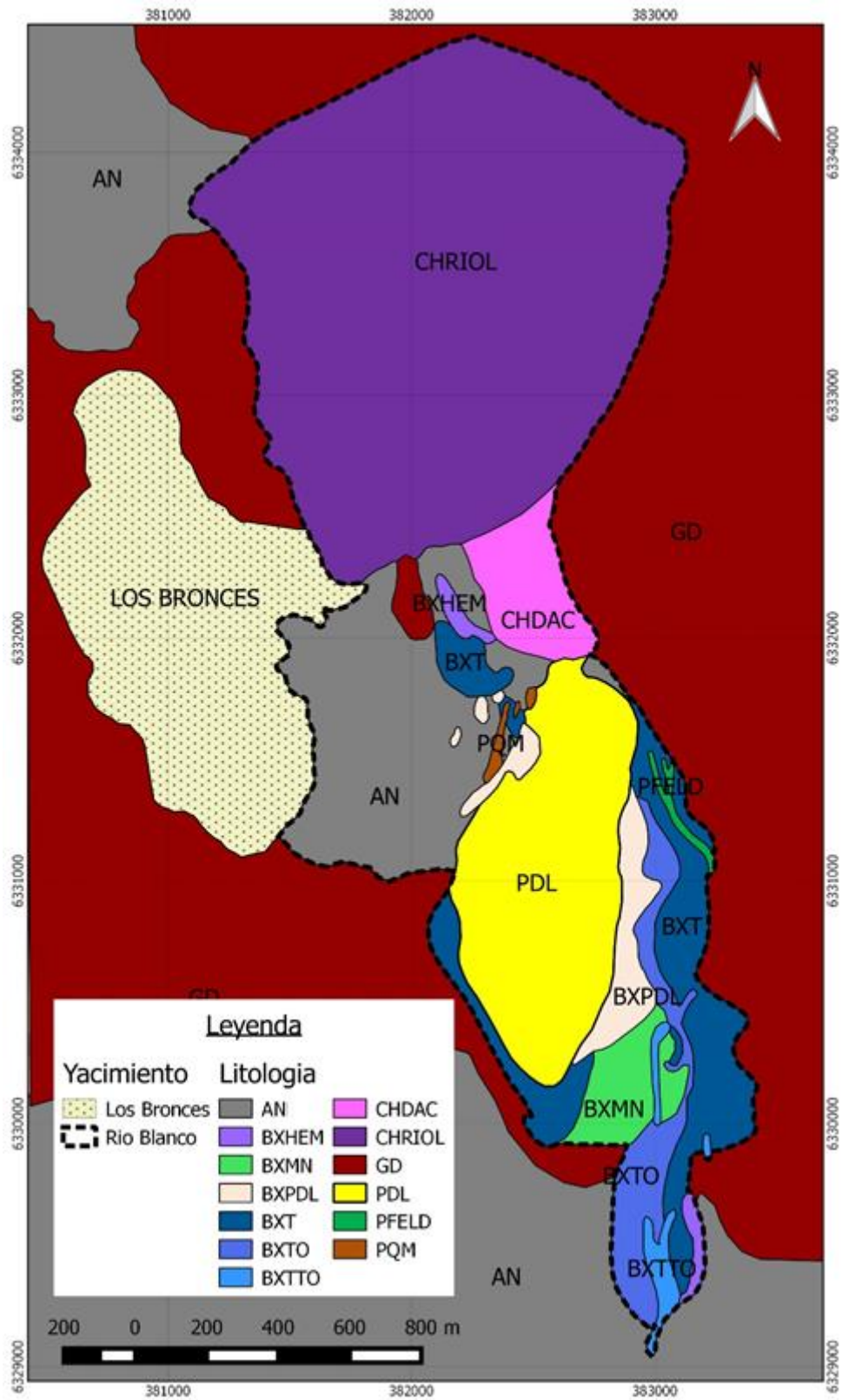


Figura 3-2 Vista en planta de las unidades litológicas presentes en el yacimiento Río Blanco

4 MARCO METALOGÉNICO

El depósito de tipo pórfido cobre-molibdeno Río Blanco pertenece a la franja metalogénica del Neógeno, la cual es la más oriental en Chile y se extiende por el sector de la alta cordillera entre los 18°S y 35°S aproximadamente (Maksaev, 2001). A esta franja corresponden otros yacimientos de tipo Cu-Mo como Los Pelambres, El Teniente y Los Bronces. Estos yacimientos son de edad Mioceno Superior a Plioceno inferior (Maksaev, 2001).

4.1 Alteración hidrotermal y mineralización

En el yacimiento Río Blanco aproximadamente la mitad de la mineralización de cobre se presenta en la matriz de brechas, en vetillas tipo *stockwork* y diseminado, en una zona de alteración potásica asociada a la formación de brechas con matriz de biotita dominante y al emplazamiento de cuerpos porfíricos de composición monzonita cuarcífera, que se ubica en el sector Río Blanco (Serrano *et al.*, 1996). La otra mitad de la mineralización se encuentra en chimeneas de brecha más jóvenes con dominio de turmalina en la matriz, cuyos clastos se encuentran sericitizados y que se encuentran en el sector Sur-Sur (Serrano *et al.*, 1996).

Existe escasa evidencia del desarrollo de mineralización supérgena y no es posible diferenciar claramente las clásicas zonas de lixiviación y enriquecimiento de sulfuros de cobre (Stambuk *et al.*, 1985), debido probablemente a la erosión continua en el yacimiento (Serrano *et al.*, 1996). Los sectores donde se observa una mayor concentración de calcosina corresponden a volúmenes bajo el 50% de sulfuros totales, coexistiendo con una importante proporción de sulfuros primarios y se presenta como un reemplazo débil y parcial de calcopirita o como pátina en cristales de pirita. Estas zonas se ubican en el sector central de la brecha de turmalina y rara vez alcanzan profundidades mayores a 20 m (Stambuk *et al.*, 1985). Sin embargo, en zonas de fracturas subverticales del área de la mina subterránea Río Blanco, el enriquecimiento secundario ha aumentado las leyes de cobre al doble (Serrano *et al.*, 1996). La forma y la profundidad de estas zonas sugieren que se han producido por el régimen de aguas subterráneas actuales y que el proceso de enriquecimiento secundario aún se encuentra activo (Serrano *et al.*, 1996).

4.1.1 Zona de alteración potásica

La zona de alteración potásica se encuentra en el sector Río Blanco y contiene una alta proporción de las brechas mineralizadas (Serrano *et al.*, 1996). La mineralogía análoga entre la matriz de las brechas y la alteración potásica, sumado a la relación espacial y temporal entre ellas sugiere una relación genética entre el emplazamiento de las brechas y el desarrollo de alteración potásica y mineralización asociada en las rocas hospedantes (Serrano *et al.*, 1996).

Cuando en esta zona se encuentra dominada por biotita se habla del tipo de alteración biotita ($Bt > Fk$), en cambio cuando se encuentra dominada por feldespato potásico se habla del tipo de alteración de feldespato potásico ($Fk > Bt$).

4.1.2 Zona de alteración propilítica

Se presenta en el entorno de los complejos de brechas hidrotermales. Se caracteriza por la presencia de clorita y epidota y, en forma subordinada, a cantidades variables de calcita, siderita y hematita especular. La razón calcopirita-pirita decrece respecto a la que se presenta en los sectores con alteración potásica (Stambuk *et al.*, 1982; Serrano *et al.*, 1996).

Esta zona se divide en 4 tipos de alteración, la primera es sericita gris verde (SGV) que se caracteriza por poseer un contenido de calcopirita mayor que el contenido de pirita, que a su vez se divide en fuerte (SGVf), moderado (SGVm) y débil (SGVd) según el contenido total de sulfuros y la última corresponde a sericita gris (SG) cuando el contenido de pirita es mayor que el de calcopirita.

4.1.3 Zona de alteración cuarzo-sericita

Se desarrolla principalmente en los niveles superiores de los cuerpos de brechas y en las dos unidades tardías del complejo subvolcánico La Copa. Se compone de cuarzo, sericita y, en menor proporción, clorita. Esta alteración también se asocia al desarrollo de vetas tardías de grosor generalmente superior a 1,5 cm con relleno de pirita, calcopirita subordinada, óxidos de hierro, cuarzo, siderita y baritina (Stambuk *et al.*, 1985). En las descripciones se utiliza la abreviación QS para referirse a este tipo de alteración.

4.1.4 Zona de alteración argílica

Esta alteración afecta localmente a los pórfidos cuarzo-monzoníticos y a rocas del complejo subvolcánico Río Blanco. Se encuentra representada por caolinita y, en menor proporción, montmorillonita. Su intensidad es baja y de efecto local (Verdugo, 2001).

4.1.5 Zona de alteración de fondo

Esta alteración corresponde a zonas profundas del yacimiento donde la alteración se produce de manera selectiva y no se puede asociar a ninguna de las alteraciones anteriores, está asociada a eventos tempranos de mineralización (Bertens y Solé, 2013) y se divide en 3 tipos de alteración.

1) Fondo Biotítico (FBt): caracterizada por una biotitización selectiva intensa de los minerales máficos primarios ($\geq 80\%$ del volumen total de máficos) con pérdida de características primarias, tales como clivaje y formas cristalinas, y con presencia de accesorios como rutilo y/o esfeno. Los feldespatos pueden tener una alteración débil a feldespato potásico secundario. La mineralización es predominantemente de calcopirita y/o calcopirita-bornita.

2) Fondo Clorita-Epidota (FCI-Ep): caracterizada por alteración de los minerales máficos a clorita ± epidota y de los feldspatos a epidota selectiva. No existe mineralización diseminada relacionada a este evento de alteración, solo mineralización en vetillas con dominio de pirita.

3) Fondo Biotita-Clorita (FBt-Cl): caracterizada por poseer los minerales máficos parcialmente reemplazados por biotita con proporciones significativas de clorita secundaria. Las asociaciones de Fondo Biotita-Clorita corresponden a las de un ambiente de alteración selectivo transicional entre el ambiente Potásico y el Propilítico. El dominio de sulfuros es pirita y calcopirita, principalmente en vetillas y la mineralización diseminada es muy escasa.

Los distintos tipos de alteración anteriormente nombrados se pueden ver en la Figura 4-1, la cual corresponde a un perfil longitudinal tomado de la sección XC330 del yacimiento, en el sector Don Luis.

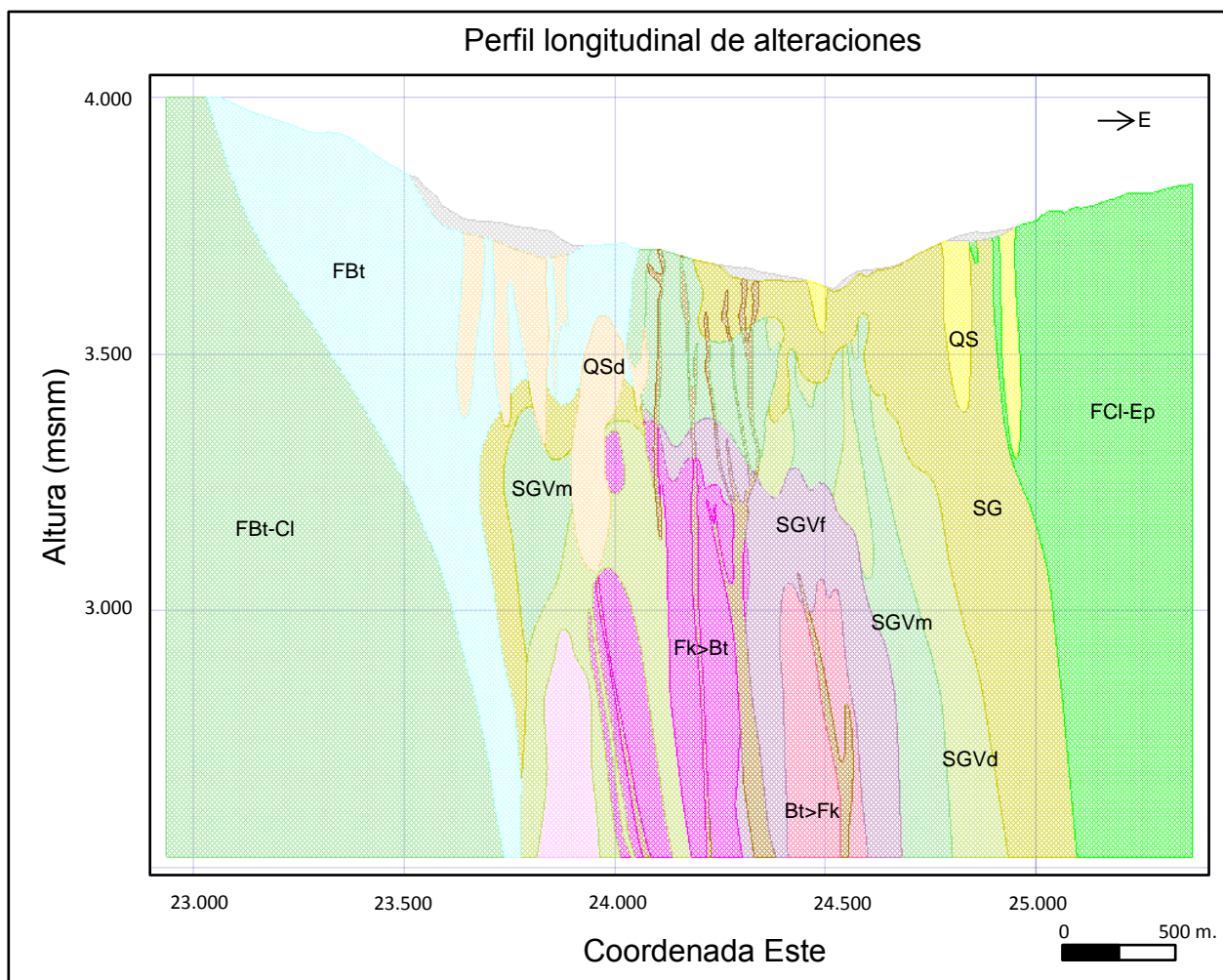


Figura 4-1 Vista en perfil de los tipos de alteración presentes para la sección XC330 del yacimiento

5 METODOLOGÍA

Para poder alcanzar los objetivos de esta memoria, el trabajo se dividió en 3 etapas, la primera contempla un estudio exploratorio de datos, seguido por el análisis de muestras seleccionados en el microscopio óptico y en el laboratorio de microscopia electrónica mediante el uso de microscopio electrónico de barrido (abreviado SEM por las siglas del inglés *Scanning Electron Microscope*) y una etapa final de modelamiento espacial con herramientas de geo-estadística.

5.1 Estudio exploratorio de datos geoquímicos

Para iniciar el estudio que comprende esta memoria se realiza un análisis de las bases de datos que se tiene disponible y que provienen de dos fuentes:

1) Muestras geometalúrgicas: una muestra corresponde a 16 metros continuos de sondajes diamantina los cuales son ensayados y analizados en laboratorio. Para este estudio solo se consideraron las muestras con análisis ICP-MS con reporte de mercurio, y que además cuentan con análisis mineralógico de briquetas vía QEMSCAN y análisis petrocalcográficos de cortes. Adicionalmente estas muestras tienen su respectivo mapeo geológico con el levantamiento del tipo litológico, alteración y mineralización.

2) Compuestos mensuales de la planta concentradora: muestras que representan el mineral que fue tratado en un mes, cuenta con análisis químicos y mineralógicos de cabeza, concentrado y cola.

La primera batería de datos con la que se trabaja proviene de análisis ICP-MS realizada a 419 muestras. Este análisis se realiza para diversos analitos, entre ellos el mercurio, el cual es el elemento de interés de este estudio. En los análisis ICP-MS se realiza la disolución de la roca mediante la utilización de agua regia, la cual corresponde a un compuesto formado por ácido nítrico y ácido clorhídrico, en una relación de 1:3, con un límite de detección de 5 ppb para el Hg.

La segunda batería de datos corresponde a los análisis mineralógicos de muestras geo-metalúrgicas, la fabricación de la briqueta se realiza una vez que se tiene la preparación mecánica de la muestra hasta obtener un P80 de 210 micras, es decir un producto en el cual el 80% de la masa de roca tenga un tamaño menor a 210 micrones y que corresponde al estándar para realizar las pruebas metalúrgicas de flotación. Una sub muestra es utilizada para fabricar una briqueta la cual es posteriormente analizada mediante QEMSCAN. El resultado de QEMSCAN es un reporte que entrega leyes de especies minerales, tanto en base mineral (roca total) o base sulfuros, como también estado de oclusión o grado de liberación de las partículas, asociaciones y tamaños relativos. Adicionalmente también se cuenta con cortes transparentes-pulidos de estas muestras geometalúrgicas con su respectiva descripción petrocalcográfica.

La tercera batería de datos proviene de reportes de estudios mineralógicos y químicos de la alimentación (también llamada cabeza) y los productos concentrados de cobre y cola) de la planta concentradora con un soporte de un mes. Estos análisis

corresponden a lecturas mediante absorción atómica (AA) y lecturas mineralógicas mediante QEMSCAN.

En la Figura 5-1 se puede observar un diagrama con el resumen de las dos fuentes de información y los datos y análisis que poseen cada una.

Las herramientas utilizadas para llevar a cabo el estudio exploratorio de datos corresponden a los softwares Excel y Vulcan.

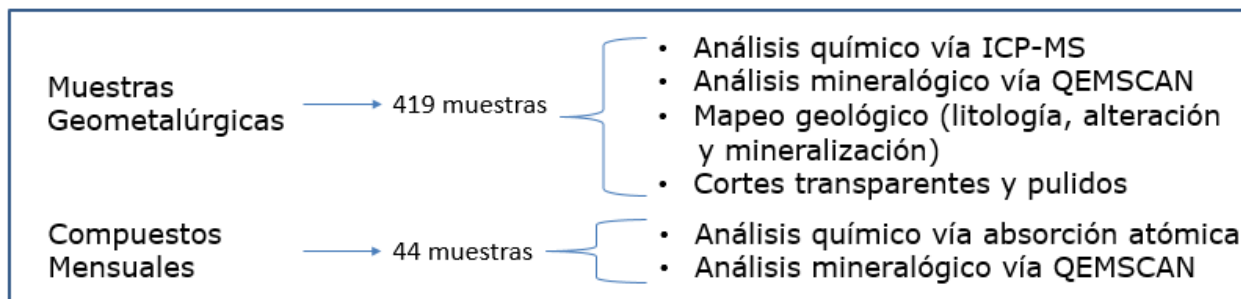


Figura 5-1 Diagrama de las fuentes de información utilizadas en el trabajo.

5.1.1 Distribución espacial

Corresponde a la realización de mapas con diversas vistas, ya sea en planta o perfil, para conocer la distribución espacial de las muestras y poder reconocer sectores o cuerpos donde se alojan las leyes más altas y más bajas de mercurio, como también poder observar los lugares donde se tienen datos y validar la representatividad del muestreo realizado.

5.1.2 Análisis estadístico

Los histogramas son una herramienta común en los análisis de datos, y su objetivo es representar gráficamente la cantidad de datos de una población para diferentes clases, con esto se puede observar el tipo de distribución que poseen las muestras (normal, binomial, exponencial, etc.).

La información acerca de la distribución es importante ya que permite dar robustez a los distintos test estadísticos e identificar poblaciones de datos.

5.1.3 Correlación

Se realiza una matriz de correlación para observar el comportamiento del mercurio en función de otros elementos de interés característicos de los minerales con los cuales se desea comparar. Por ejemplo el antimonio, el arsénico o la plata.

5.2 Análisis petrográfico y microscópico de muestras

Se realizó una descripción petrográfica y calcográfica de detalle utilizando cortes transparente-pulidos de muestras geometalúrgicas de interés seleccionadas en base a su representatividad, vale decir una selección abarcando desde bajas a altas concentraciones de mercurio, orientado a caracterizar los estilos de mineralización y ocurrencia de las fases portadoras de mercurio en el yacimiento, como también su relación con los minerales de ganga (calcopirita y bornita)

La descripción de los cortes transparentes y pulidos se realizó en las dependencias de la División Andina de CODELCO, con un microscopio marca LEICA modelo DM2500P, que posee unos lentes objetivos de 5x, 10x, 20x y 50x. Las fotomicrografías fueron obtenidas con una cámara conectada a este microscopio de marca LEICA modelo DFC290 la cual se maneja mediante el software *Leica Application Suite*.

El análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) se realizó en sulfuros (calcopirita, bornita, pirita) y sulfosales de cobre (tennantita-tetredrita), principales candidatos a ser huéspedes del mercurio en el yacimiento, para así observar zonaciones y/u ocurrencia de inclusiones minerales.

Este trabajo se realizó en el laboratorio de microscopia de la Facultad de Odontología de la Universidad de Chile, el cual cuenta con un microscopio marca JEOL modelo JSM-IT300LV que posee detector de electrones retro-dispersados (BSE) para colección de imágenes en modos composicional (contraste elemental), topográfico (topografía de superficie) o sombra (mezcla de los dos modos anteriores) y un detector EDX AZTec Oxford para análisis composicional. Al momento de realizar las lecturas las condiciones operativas fueron una cámara con alto vacío, un voltaje de excitación de 25 kV y una corriente que incide la muestra de 60 μ A, esto para poder estimular las capas de alta energía del mercurio.

5.3 Modelamiento geo-estadístico

5.3.1 Variografía

Con los resultados obtenidos de la etapa de análisis exploratorio de datos, se comprueba la existencia de datos atípicos, como es la distribución de los datos pertenecientes a la población y la existencia de zonas mineralizadas que responden a factores estructurales, geológicos o productos de la alteración, todos estos factores se deben tener en consideración al momento de realizar las estimación.

En primera instancia se calcula el valor de la función variograma en 18 direcciones, abarcando todo el espacio, para conocer como es la correlación que existe entre los datos en el espacio, estos valores se grafican a través de mapas variográficos, ya que facilita su visualización, además se pueden observar posibles existencias de anisotropías (geométrica, zonal o una mezcla de ambas) que influirán en el modelamiento, estas anisotropías se dan cuando existen cuerpos concéntricos

(geométrica) o cuando responden a efectos geológicos, por ejemplo se encuentran yacimientos de placer que tienen un dominio sedimentológico, por lo que dentro del estrato la correlación será alta, pero al aumentar en cota la correlación se pierde rápidamente.

Con las direcciones de anisotropías definidas (si es que existen) se calcula el variograma experimental (omnidireccional en el caso de no existir una dirección preferencial), el cual se ajusta a través de modelos matemáticos (modelo exponencial, esférico, pepitico, gaussiano), lo que se conoce como variograma experimental, el cual es representado en un gráfico de varianza en función de la distancia. El ajuste se puede realizar con un solo modelo matemático o con la suma de varios, llamado modelo anidado, con la finalidad de poder representar de manera precisa el comportamiento del variograma experimental.

5.3.2 Plan de kriging y modelamiento

Con el modelo variográfico se plantea el plan de kriging, en el cual se elige una vecindad a considerar (esférica o elíptica, en función de la existencia o no de anisotropías), la cantidad de puntos máximos y mínimos que se utilizarán para realizar la estimación en un bloque y la posibilidad de encapsular valores muy altos de concentraciones que pueden sobreestimar, a distancias más grandes, el yacimiento.

Mediante el software *Vulcan* se realiza el cálculo de los ponderadores y la varianza del método de kriging ordinario, el que mediante la resolución de sistemas de ecuaciones, obtiene la estimación de las concentraciones de mercurio para el sector Don Luis.

Tanto el plan de kriging como el modelo variográfico se comprueban una vez completada la estimación del yacimiento realizando comparaciones de las dos poblaciones de datos, los valores reales y los estimados, con herramientas similares a las utilizadas en el estudio exploratorio de datos.

6 RESULTADOS

6.1 Análisis exploratorio de datos

Los datos utilizados en este trabajo provienen de dos fuentes, la primera corresponde a la base de datos geometalúrgicos y la segunda a los compuestos mensuales de la planta concentradora. Para este apartado se considerará los análisis químicos vía ICP-MS y los análisis mineralógicos vía QEMSCAN de la primera fuente y los análisis químicos vía absorción atómica y los análisis mineralógicos vía QEMSCAN del segundo.

6.1.1 Análisis de datos químicos de geometalurgia

Las concentraciones obtenidas mediante ICP-MS fluctúan entre 5 ppb hasta 50 ppm, con un total de 19 resultados bajo el límite de detección, los cuales se truncaron en 2,5 ppb (la mitad del límite de detección) para los análisis estadísticos siguientes, también se quitaron 4 valores por considerarlos aberrantes (o también conocidos como 'outliers'), por lo que el nuevo valor máximo corresponde a 1,5 ppm. Las muestras poseen una distribución aproximadamente log-normal con una anomalía de muestras con valores relativamente altos que se pueden apreciar en la Figura 6-1 y un promedio de 114,7 ppb. Un resumen de los datos estadísticos de estos datos se encuentra en la Tabla 1 y una representación de estos en un diagrama *boxplot* en la Figura 6-2.

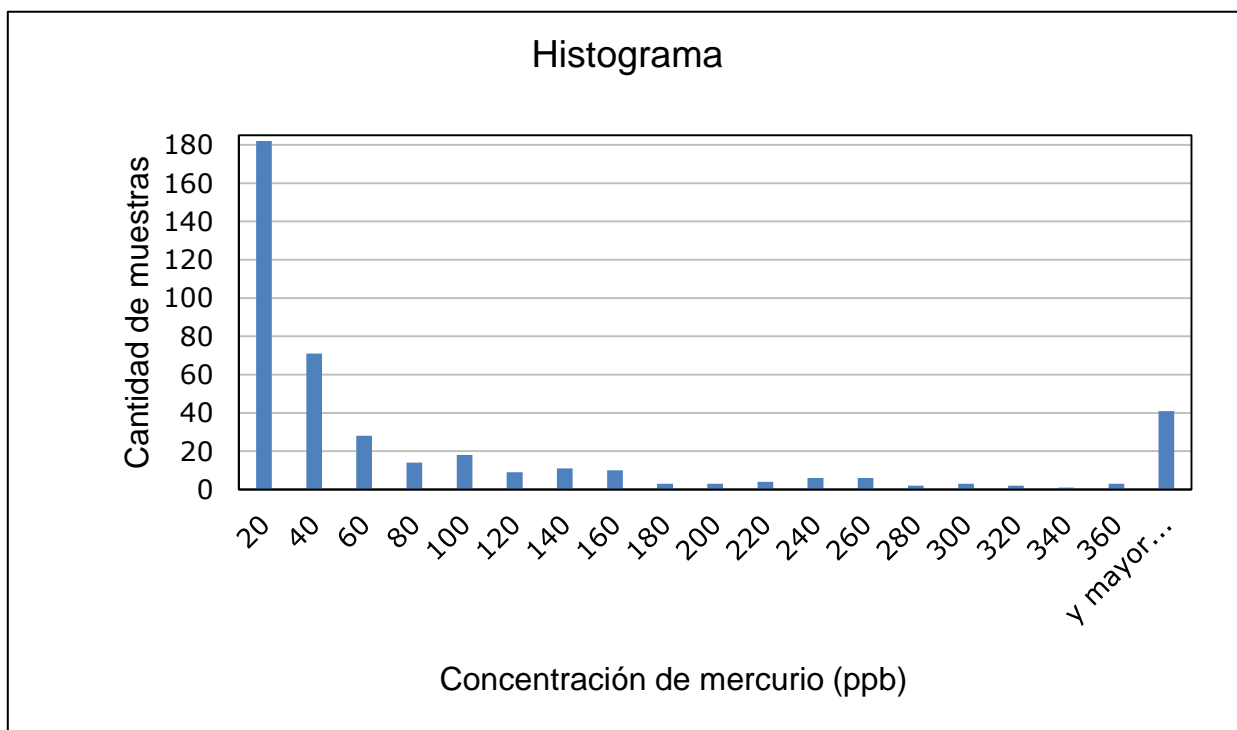


Figura 6-1 Histograma de las concentraciones de mercurio.

Tabla 1 Resumen estadístico de los datos de análisis ICP-MS de concentración de mercurio.

	Hg (ppb)
Primer cuartil (Q1)	13
Mínima (Min)	2,5
Mediana (Med)	25
Máxima (Max)	1.587
Tercer cuartil (Q3)	96
Promedio (Prom)	114,7

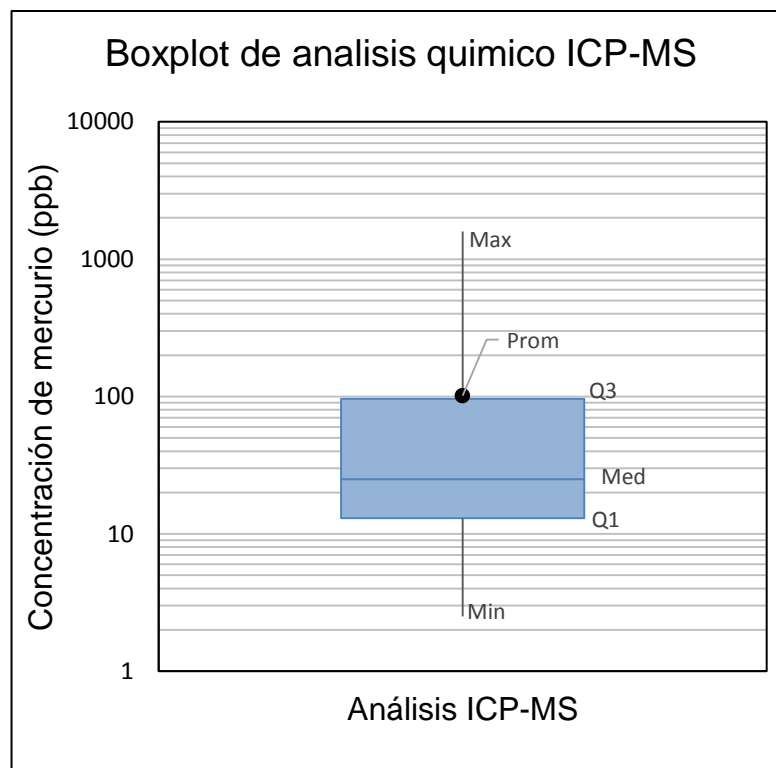


Figura 6-2 Resumen de datos estadísticos en gráfico tipo boxplot.

Del total de las muestras un 7% se encuentra en el sector Rio Blanco (minería subterránea) y un 93% en el sector Don Luis (minería a rajo abierto). Espacialmente se distribuyen en un cuerpo alargado de manera preferencial en la dirección N30°W y con marcadas secciones en la dirección N62°W, esto debido a la distribución del cobre presente en el yacimiento que tiene dichas direcciones de preferencia, por lo tanto la malla de perforación de sondajes sigue estas direcciones, esto se puede observar en la Figura 6-3 y la Figura 6-4. En sección transversal se puede apreciar que las muestras están preferentemente entre las cotas 3.200 y 3.500 m.s.n.m.

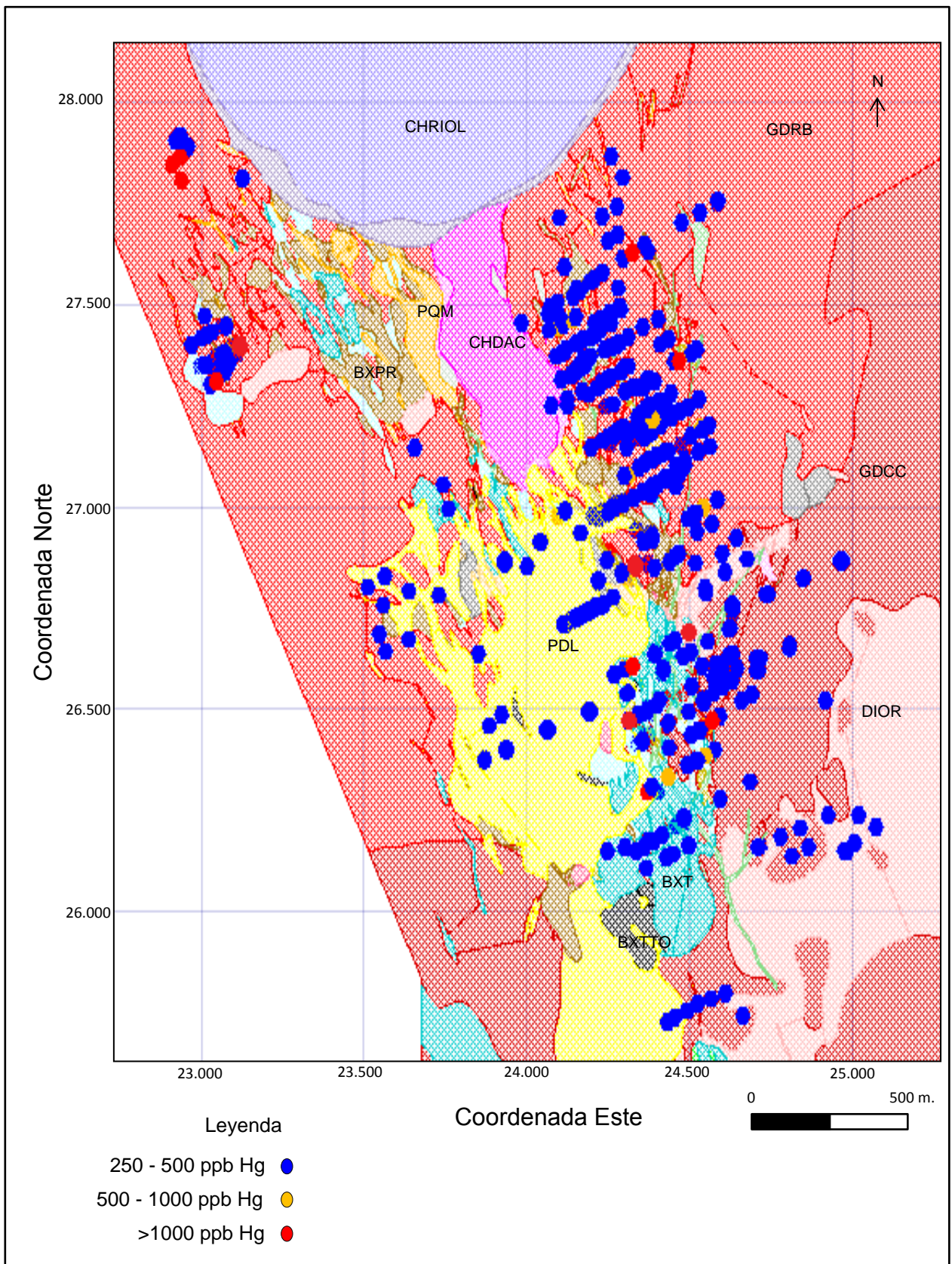


Figura 6-3 Mapa de distribución de muestras (vista en planta) con la litología presente al nivel 3.200.

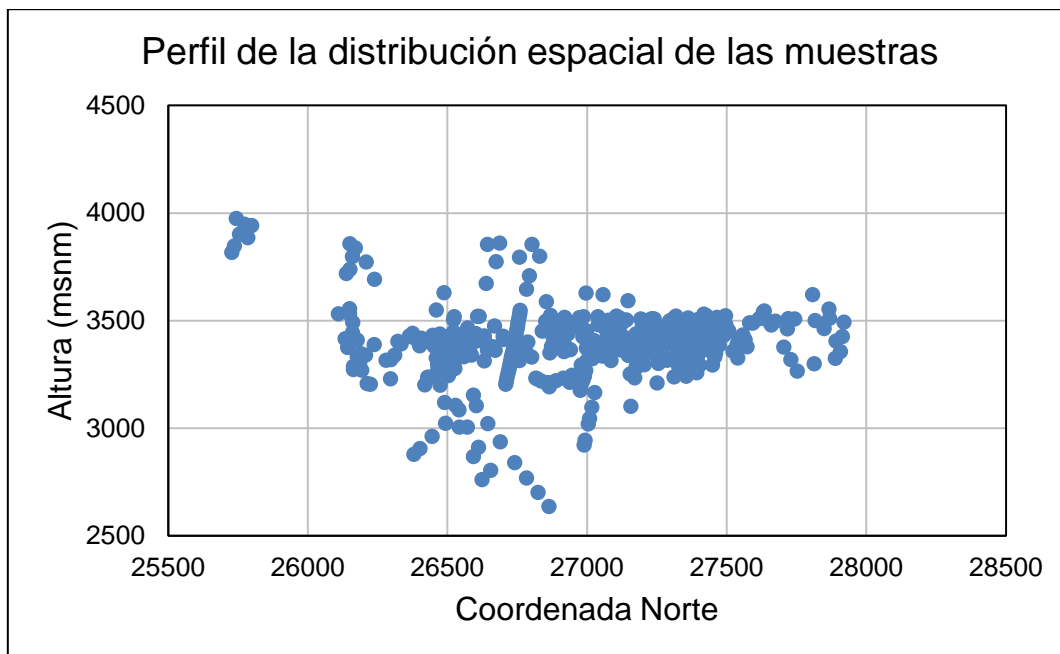


Figura 6-4 Mapa de distribución de muestras (vista en perfil).

Estas muestras se encuentran alojadas en todas la unidades del yacimiento aunque en diferente proporción, aproximadamente un 74% de las muestras se ubican en las unidades GDRB, GDCC, BXPR y PDL, el otro 26% se distribuye en las demás unidades en porcentajes que van desde un 1% a un 4%. Esto se aprecia en la Figura 6-5.

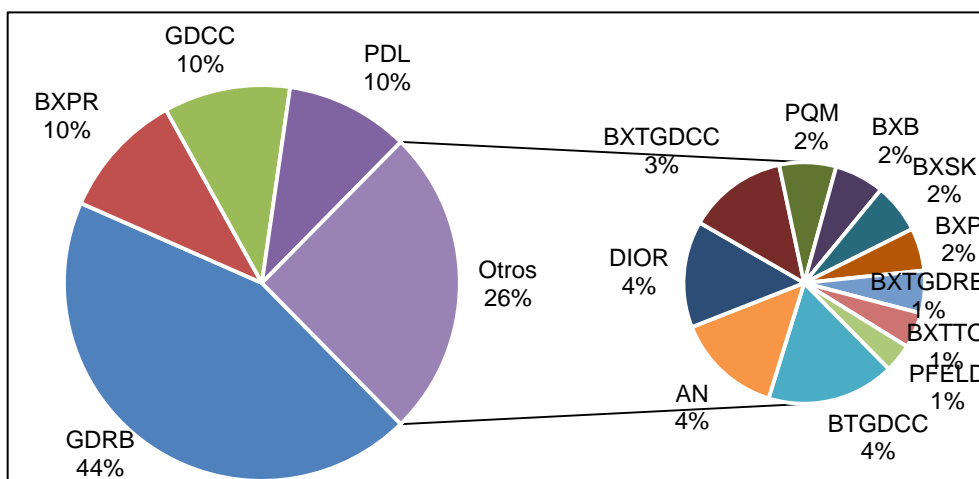


Figura 6-5 Gráfico de distribución de muestras en las unidades litológicas.

Las concentraciones obtenidas en los análisis ICP-MS para los elementos contenidos en la serie tennantita-tetraedrita y en la pirita fueron relacionadas a través de una matriz de correlación. Los resultados muestran que existe una alta afinidad entre el mercurio y el antimonio, con un índice de correlación de 0,93 y en menor medida entre el mercurio y la plata, con un índice de correlación de 0,44. Estos datos se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2 Matriz de correlación.

	Hg	Ag	As	Cu	Fe	S	Sb
Hg	1						
Ag	0,44	1					
As	0,32	0,36	1				
Cu	0,10	0,44	0,14	1			
Fe	-0,01	-0,02	0,08	-0,17	1		
S	0,01	0,00	0,20	0,01	0,68	1	
Sb	0,93	0,51	0,44	0,12	0,01	0,05	1

La relación entre el mercurio y la litología muestra que las mayores concentraciones se alojan en la unidad Andesita y en la unidad Brecha Turmalina, esto queda en evidencia en la Figura 6-6 donde se puede apreciar datos estadísticos para cada unidad tales como mínimo, máximo, cuartiles y mediana con un gráfico tipo *boxplot*, también se expresa el promedio de los datos por unidad, las unidades litológicas se encuentran ordenadas cronológicamente de más antiguo a más joven (Bertens y Solé, 2013).

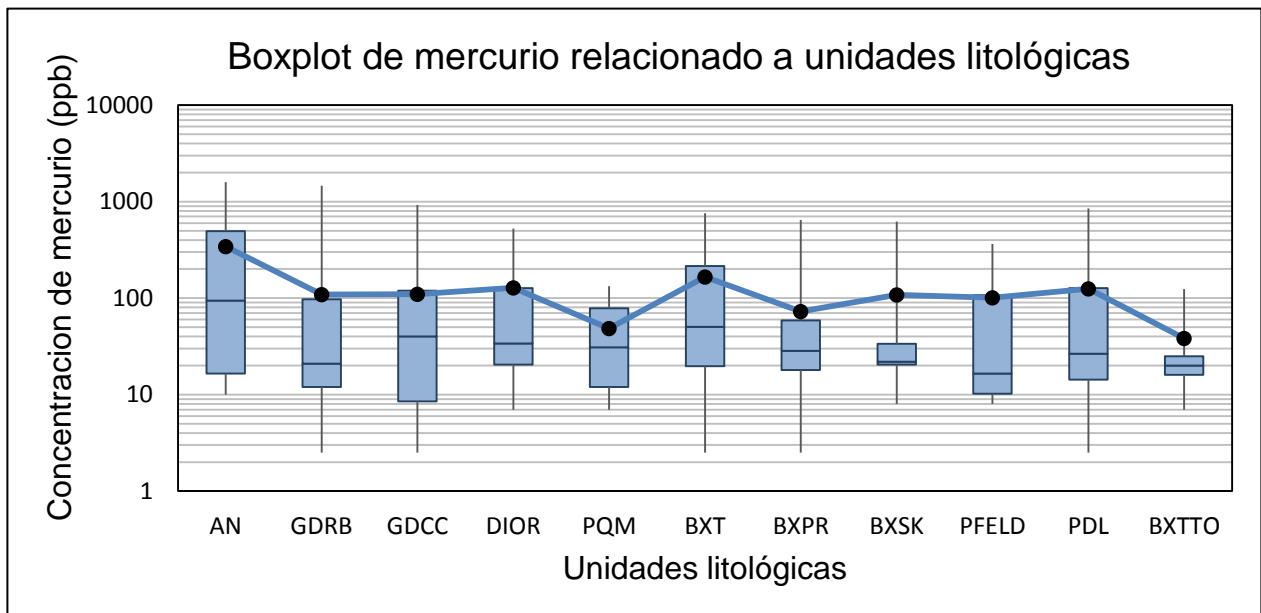


Figura 6-6 Gráfico tipo Boxplot de las concentraciones de mercurio para las distintas unidades litológicas, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.

Si agrupamos las unidades en rocas volcánicas, rocas intrusivas, brechas y pórfidos, tenemos el siguiente gráfico (Figura 6-7), donde se aprecia que en la primera unidad, y las más antigua, el promedio del contenido de mercurio es más alto, en las otras tres unidades los datos tienen una población muy similar al igual que su promedio.

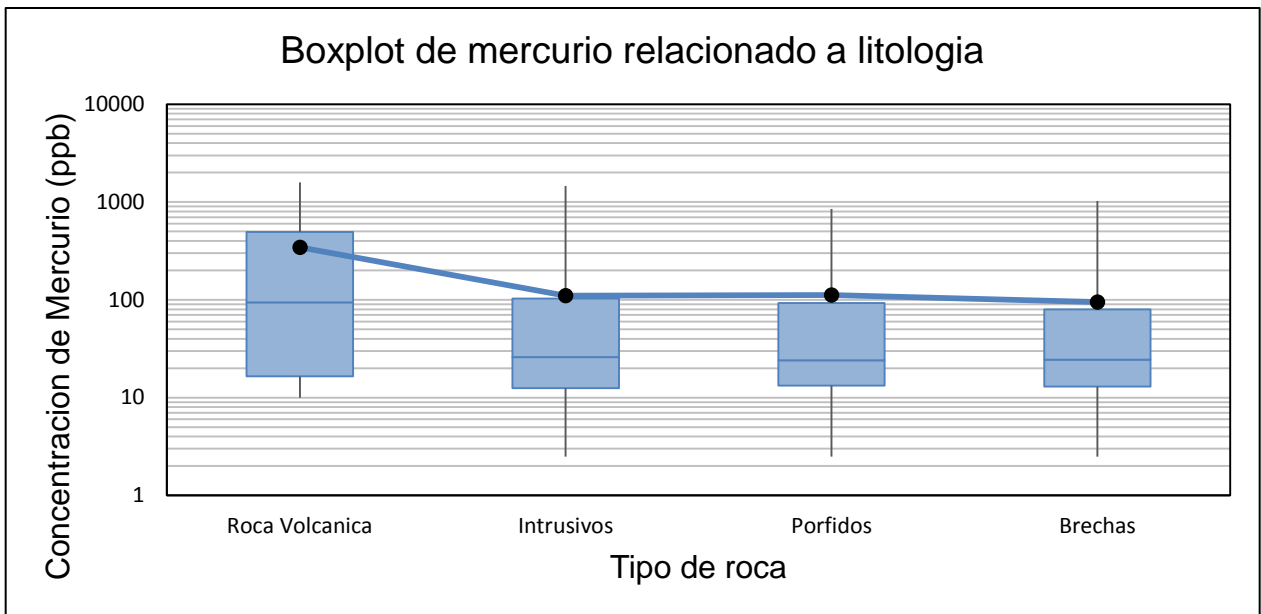


Figura 6-7 Gráfico tipo Boxplot de concentraciones de mercurio para diferente tipo de roca, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.

La relación entre el mercurio y los tipos de alteración deja en evidencia que la alteración sericita gris verde débil y sericita gris es la que concentra los valores más altos, las alteraciones tempranas poseen valores cercanos al promedio, mientras que las demás alteraciones de transición desde Fk>Bt a SGVf poseen los valores más bajos junto con la alteración tardía QS, esto se puede apreciar en la Figura 6-8.

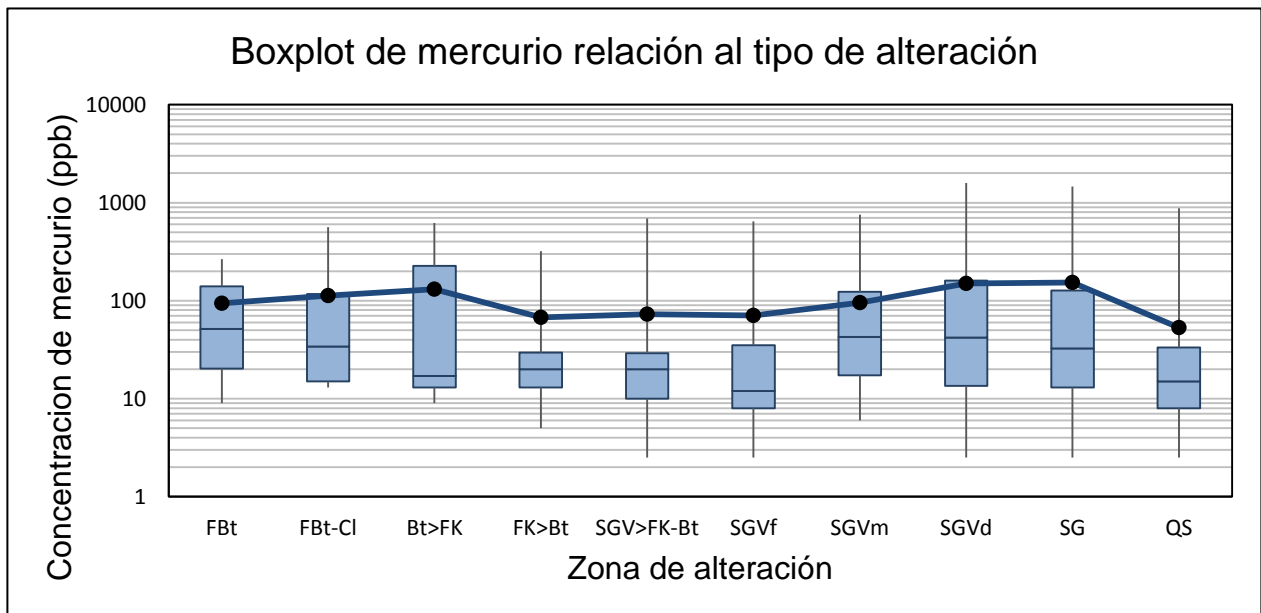


Figura 6-8 Gráfico tipo Boxplot de las concentraciones de mercurio en función del tipo de alteración, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.

Que el evento de alteración del tipo cuarzo-sericita posee los menores valores de mercurio quedan también evidenciados al realizar el mismo tipo de gráfico pero esta vez considerando las zonas de alteración, las cuales se agrupan en Fondo, Potásica, Sericita y Cuarzo-Sericita (Figura 6-9).

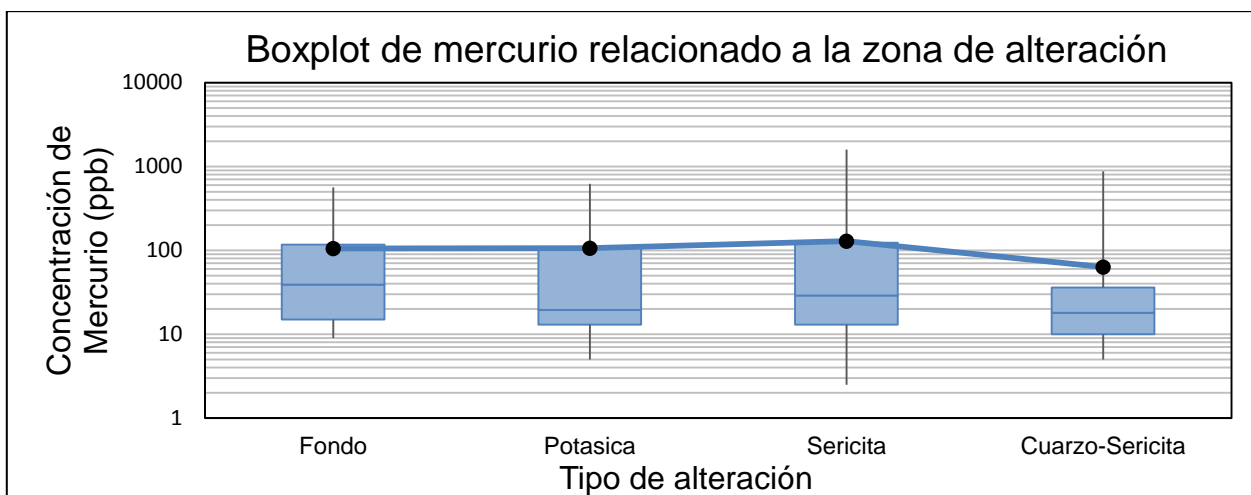


Figura 6-9 Gráfico tipo Boxplot de las concentraciones de mercurio en función de la zona de alteración, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.

Finalmente al considerar los datos en función de su zona mineral queda en evidencia que los mayores valores de mercurio se ubican en zonas con predominancia de pirita y que los menores promedios se obtienen en las zonas donde existe presencia de sulfosales de cobre. Esto se puede apreciar en la Figura 6-10.

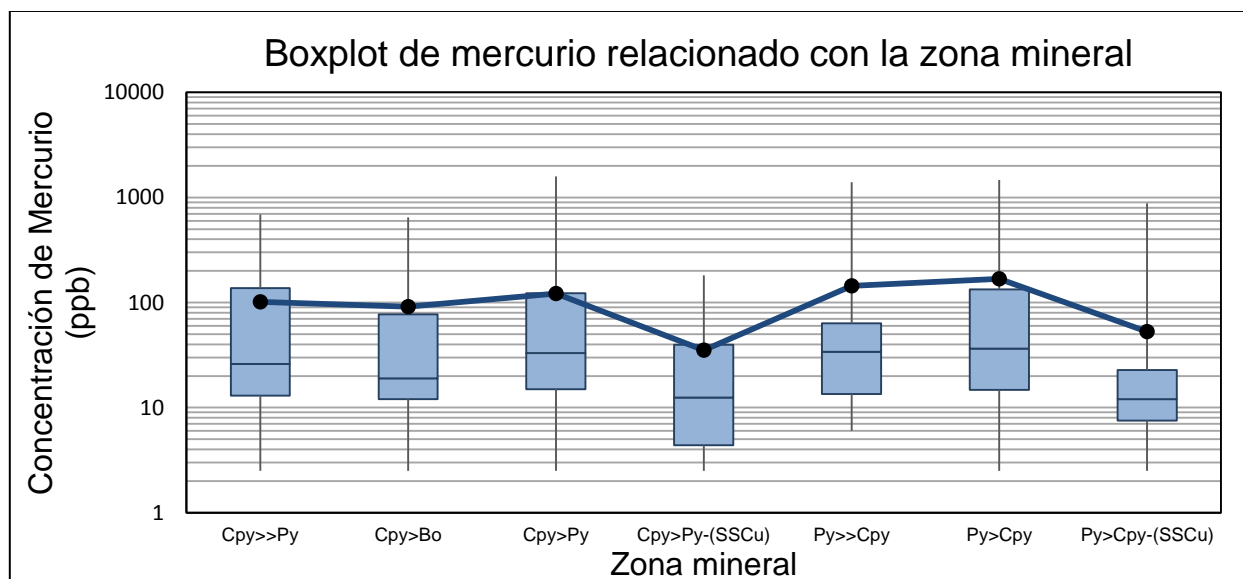


Figura 6-10 Gráfico tipo Boxplot de las concentraciones de mercurio en función de la zona mineral, en la línea se observan los valores para el promedio de los datos.

El mayor contenido de mercurio se ubica en la zona con $Py > Cpy$, dichas muestras a su vez se encuentran ubicadas mayormente en el tipo de alteración sericita gris, y en menor medida en cuarzo-sericita, fondo biotita-clorita y fondo biotita, tal como se puede observar en la Figura 6-11.

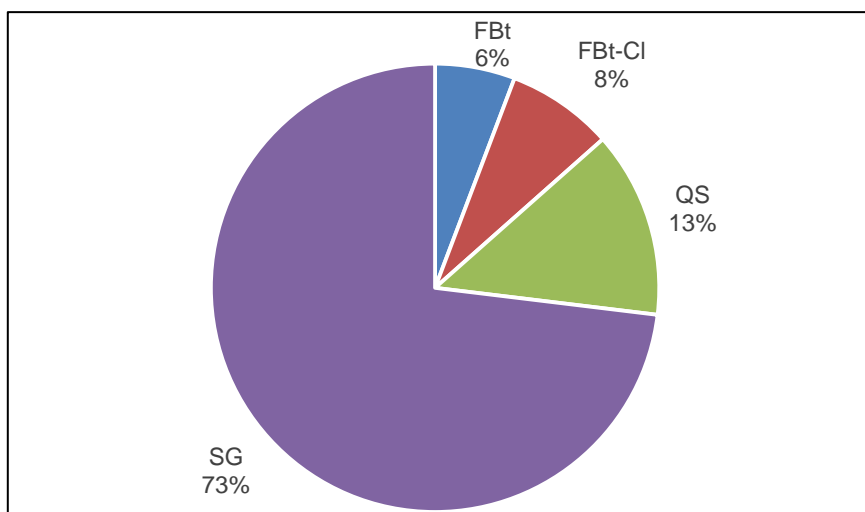


Figura 6-11 Gráfico de distribución de muestras de la zona $Py > Cpy$ en función del tipo de alteración.

6.1.2 Análisis de datos mineralógicos de geometalurgia

Los análisis indican que las concentraciones de tennantita-tetraedrita fluctúan entre valores menores a 0,01% hasta 0,2% en volumen de la roca total, presentando una media de 0,01%, mientras que las leyes de pirita fluctúan entre 0,003% y 17,93% con una media de 2%. Estos resultados más otros factores estadísticos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Resumen datos estadísticos.

	Tennantita-tetraedrita (% base mineral)	Pirita (% base mineral)
Primer cuartil	0,00046	0,6464
Mínima	0,00004	0,0032
Mediana	0,00162	1,9986
Máxima	0,21848	17,9312
Tercer cuartil	0,00667	4,0410
Promedio	0,00919	2,7034

Al realizar un gráfico de dispersión entre estos valores y los obtenidos para el mercurio mediante ICP-MS (Figura 6-12) podemos observar que la nube de puntos correspondiente a la serie tennantita-tetraedrita muestra una buena correlación al utilizar escala logarítmica para ambos ejes, obteniéndose una nube de puntos simétrica con una tendencia con pendiente positiva.

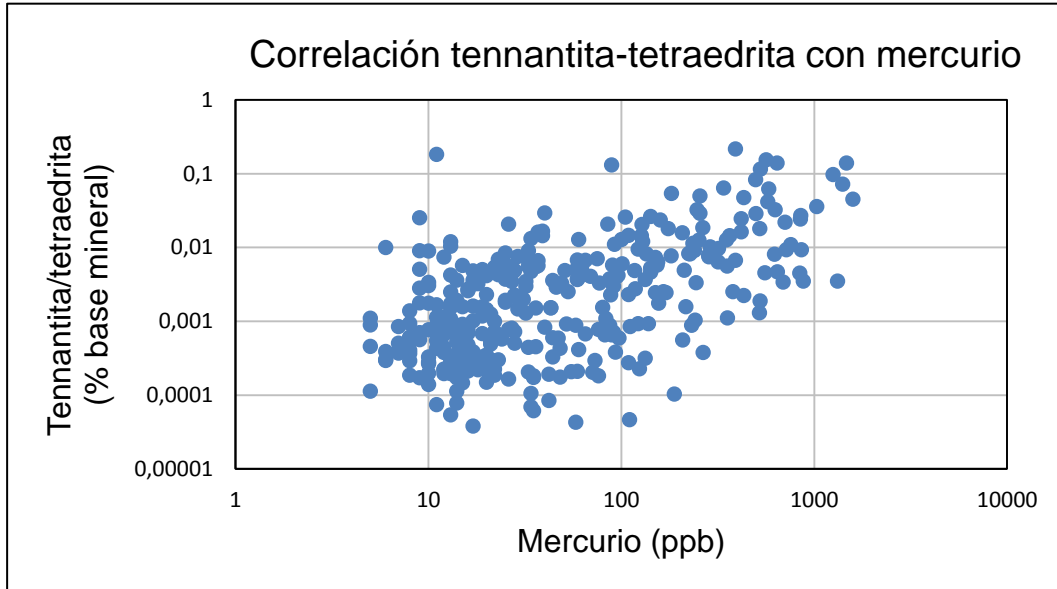


Figura 6-12 Gráfico de dispersión para los valores de mercurio y las leyes de tennantita-tetraedrita.

Al representar los valores de leyes de pirita y los de concentración de mercurio utilizando el mismo tipo de gráfico y con escala logarítmica en ambos ejes, se puede observar que la nube de puntos es asimétrica y dispersa, por lo que no se observa ninguna tendencia clara (Figura 6-13).

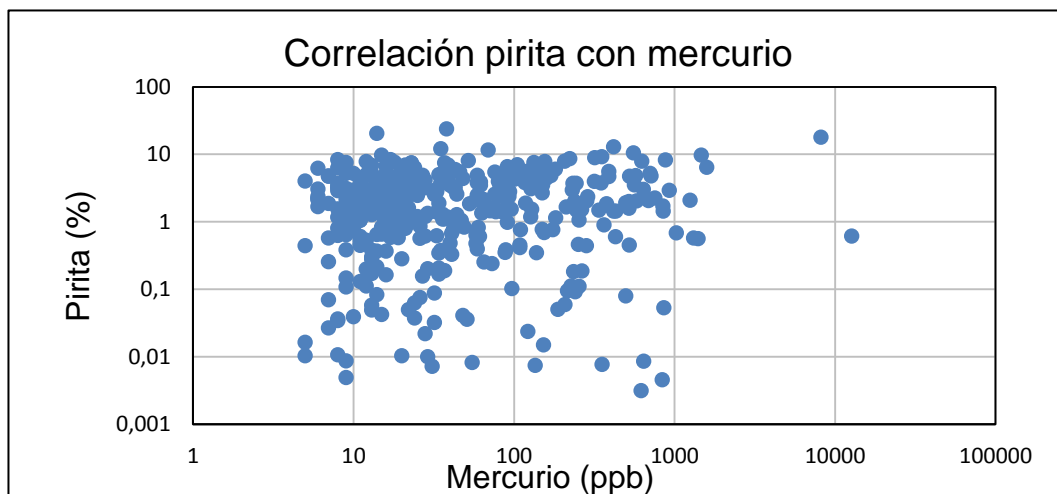


Figura 6-13 Gráfico de dispersión para los valores de mercurio y las leyes de pirita

6.1.3 Análisis de datos químicos de compuestos mensuales

Los resultados obtenidos para el muestreo en la planta concentradora arroja que desde enero del año 2013 existe un aumento en las concentraciones de mercurio y antimonio en los concentrados de cobre, asimismo se observa un comportamiento similar de ambos elementos (Figura 6-14), además al graficar la nube de dispersión (Figura 6-15) de ambos elementos se logra observar una nube simétrica, con un coeficiente de determinación de 0,76 y un coeficiente de correlación de 0,87.

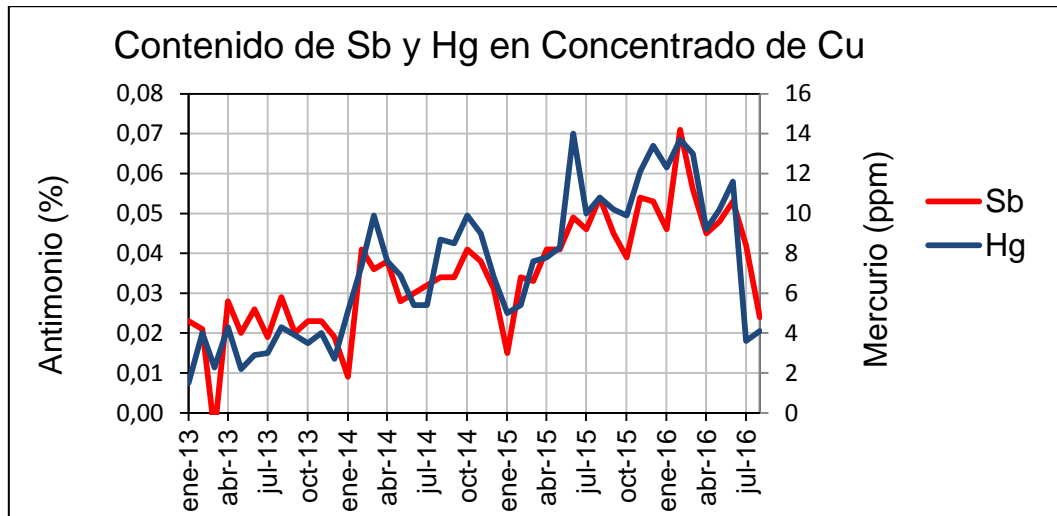


Figura 6-14 Contenido de antimonio (línea roja) y mercurio (línea azul) en concentrados de cobre.

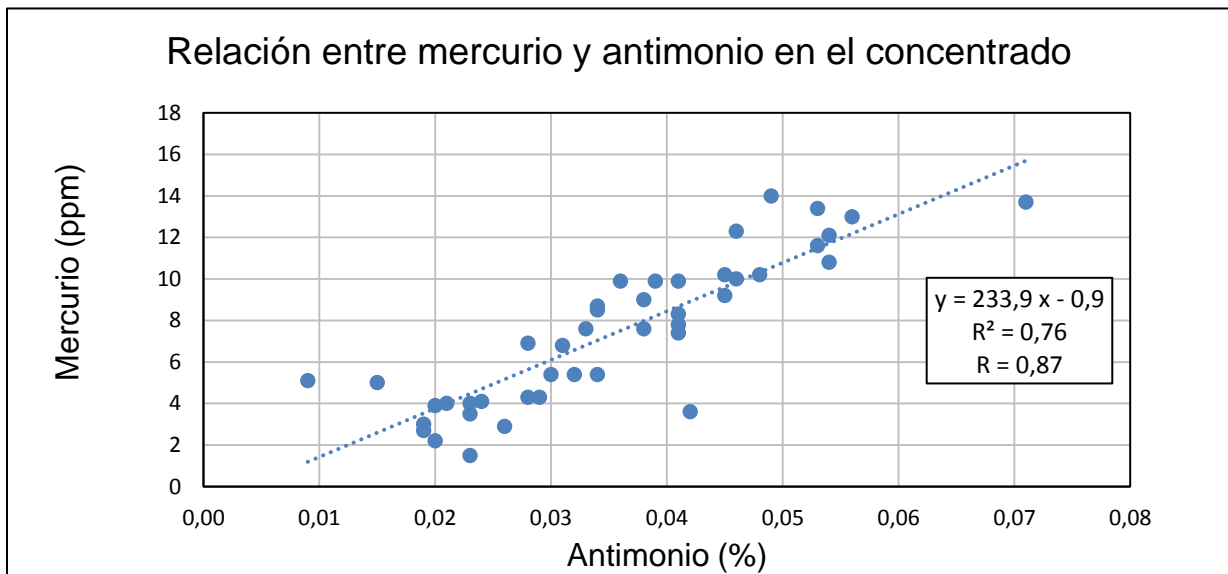


Figura 6-15 Diagrama de correlación entre el mercurio y el antimonio contenido en los concentrados de cobre. La línea recta corresponde a la línea de tendencia.

Al comparar la concentración de mercurio en la alimentación de la planta con la concentración de mercurio del concentrado de cobre que se obtiene, lo que se denomina razón de enriquecimiento, podemos apreciar que a menores concentraciones de mercurio en la alimentación es mayor el enriquecimiento y este disminuye de manera exponencial al aumentar la concentración de mercurio en la alimentación. Se observa que existen dos tendencias muy marcadas, los menores enriquecimientos se obtuvieron durante el año 2013, pero en el año 2014 al 2016 la tendencia cambia y aumenta la razón de enriquecimiento, esto se puede observar en la Figura 6-16.

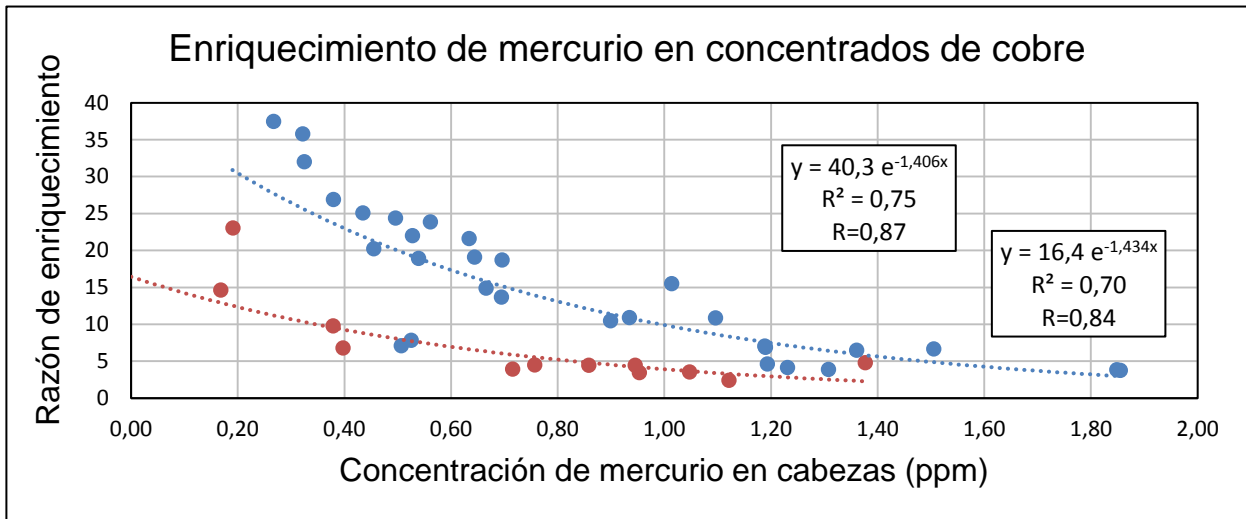


Figura 6-16 Razón de enriquecimiento de mercurio en la planta de concentrado colectivo, los puntos rojos corresponden a los datos obtenidos para el año 2013 y los puntos azules para los datos de los años 2014 al 2016.

Al comparar los resultados de concentración de mercurio obtenido en los concentrados contra los reportes mineralógicos obtenidos de las lecturas QEMSCAN se observa que existe una buena correlación entre la tetraedrita (extremo con antimonio de la serie tennantita-tetraedrita), lo que queda en evidencia en la Figura 6-17.

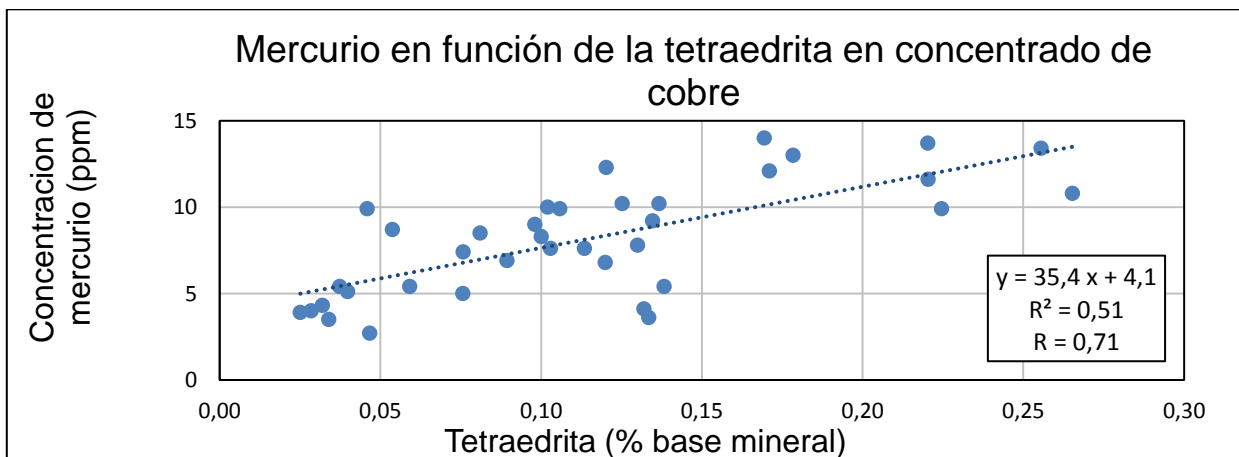


Figura 6-17 Concentración de mercurio en concentrados de cobre en función del contenido de tetraedrita.

6.2 Ocurrencia mineralógica

6.2.1 Descripción de cortes transparentes y pulidos.

El total de las muestras descritas asciende a 45 cortes, lo que representa aproximadamente un 11% de las muestras con análisis ICP-MS. Estos cortes transparentes abarcan todo el intervalo de leyes, lo que queda en evidencia en el histograma de la Figura 6-18 en el cual se compara la población total de las muestras y la de los cortes descritos, también se puede apreciar que se eligieron una mayor cantidad de cortes con concentraciones altas de mercurio, esto para favorecer el análisis mediante SEM, ya que esta técnica de análisis posee un límite de detección de 1000 ppm, valor por sobre el promedio de las muestras ICP-MS (114,78 ppb de mercurio promedio).

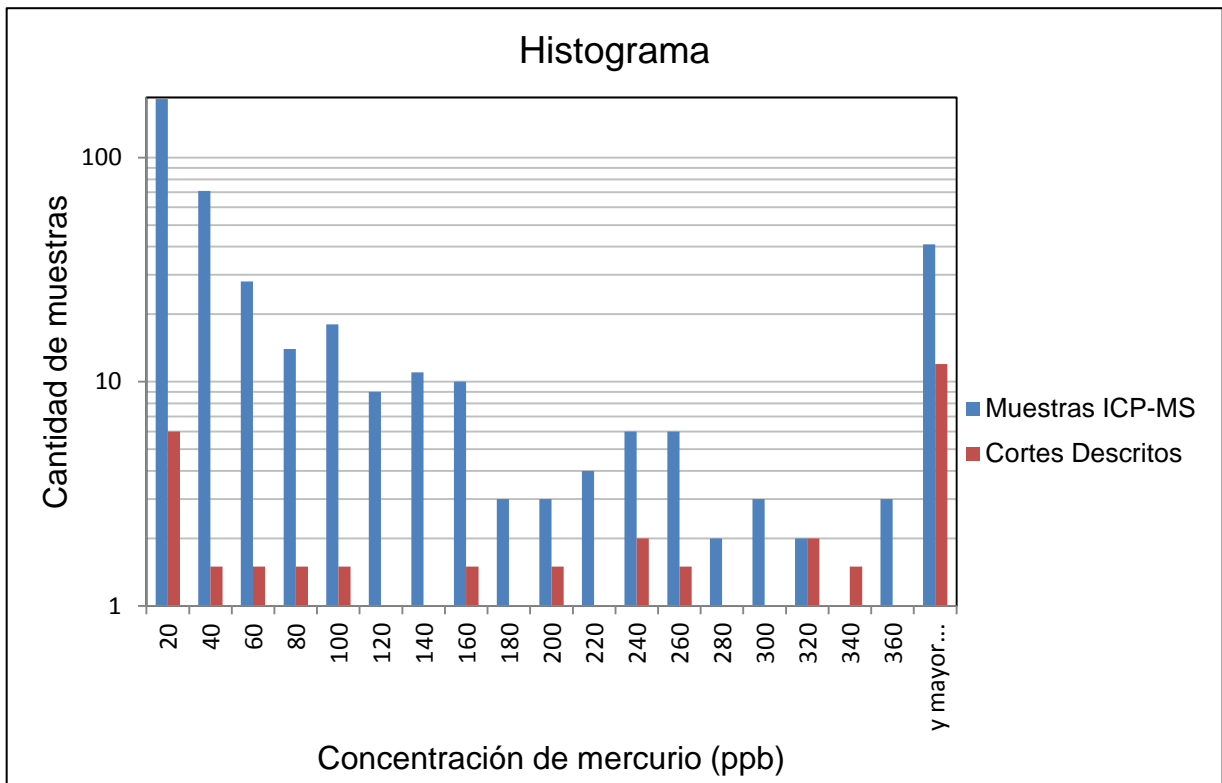


Figura 6-18 Histograma de la población de muestras ICP-MS y la población de cortes descritos en escala logarítmica.

En la Figura 6-19 podemos ver la distribución espacial de las muestras descritas en planta y en la Figura 6-20 en un perfil norte-sur.

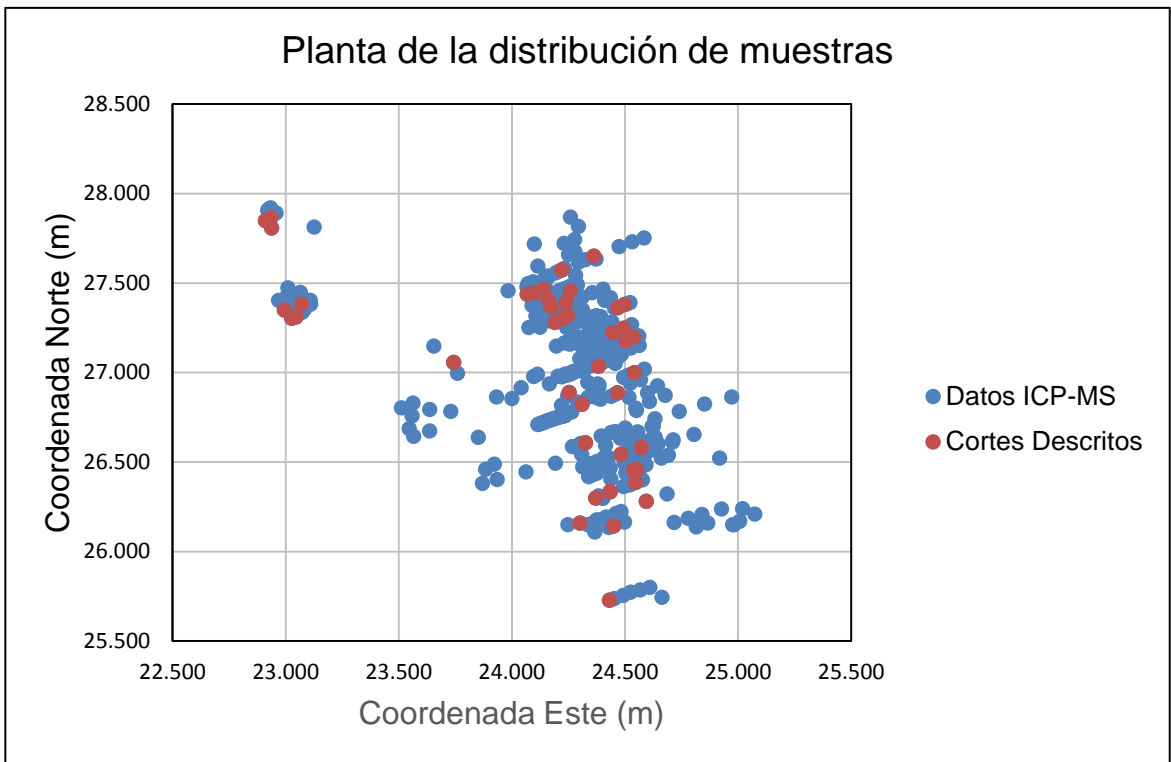


Figura 6-19 Mapa de distribución de muestras y cortes descritos (vista en planta).

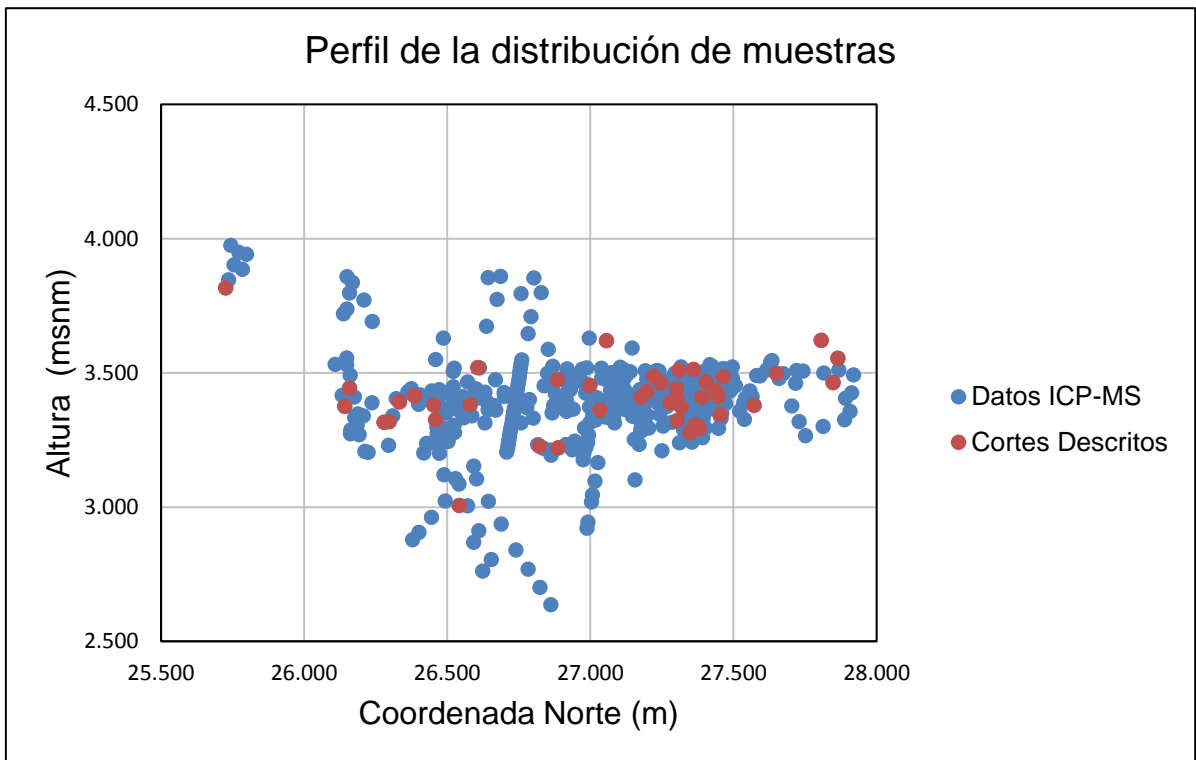


Figura 6-20 Mapa de distribución de muestras y cortes descritos (vista en perfil).

En cuanto a las litologías reconocidas en los cortes, un 56% corresponde a GDRB seguido con un 11% de BTGDCC y un 9% de BXPR, el resto de los valores se puede observar en la Figura 6-21.

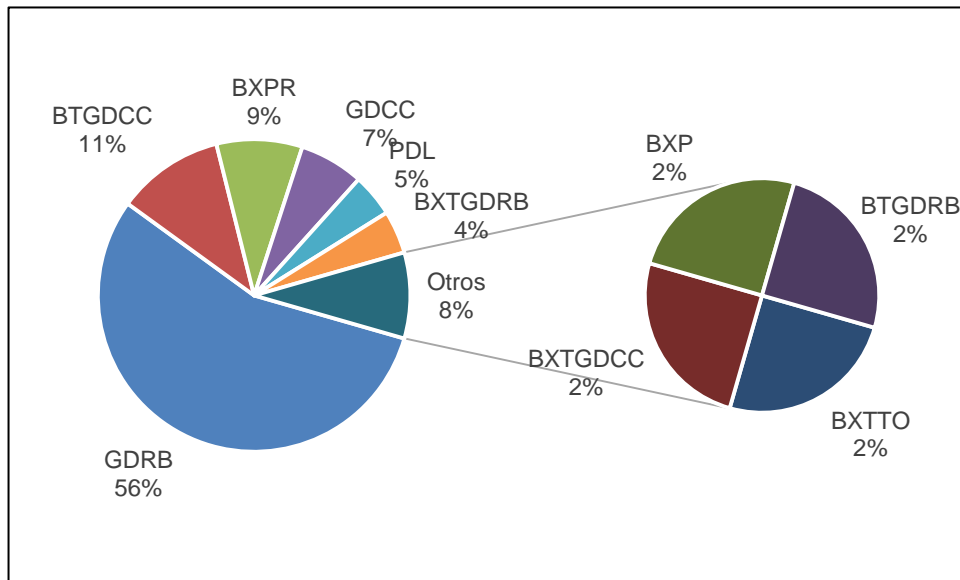


Figura 6-21 Gráfico de distribución de cortes descritos en las unidades litológicas.

La alteración dominante observada fue sericita gris verde (53%) y cuarzo-sericita (47%), a su vez, como alteración subordinada se observó biotita, sericita gris y carbonatos. Los tipos de alteración registrados se pueden observar en la Figura 6-22 y Figura 6-23.

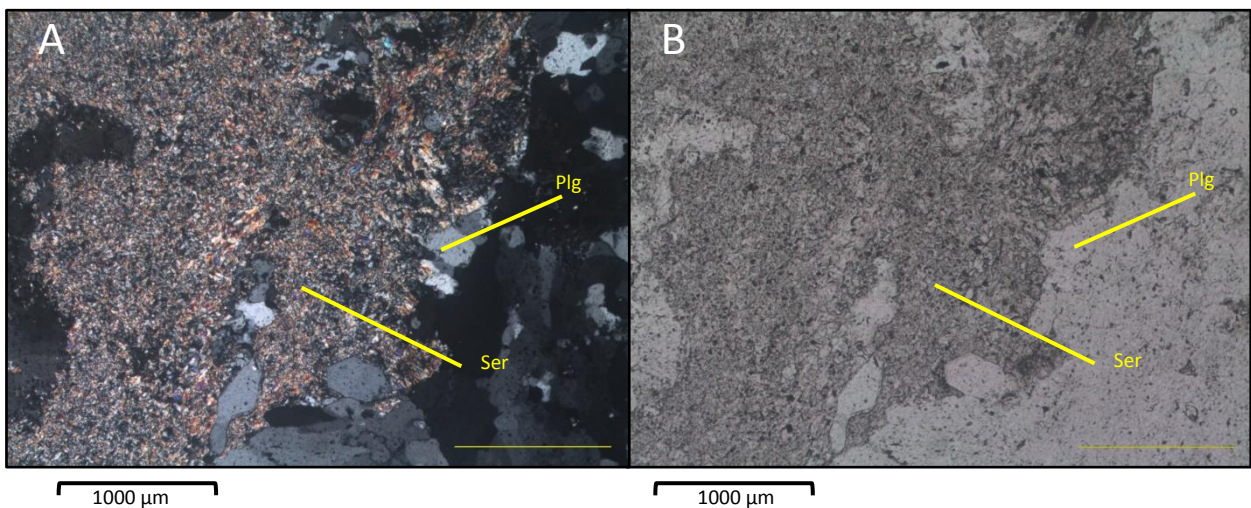


Figura 6-22 A) Fotomicrografía de la muestra M-3841 con alteración sericita gris verde en nicolas cruzados. B) Fotomicrografía de la muestra M-3841 con alteración sericita gris verde en nicolas paralelos.

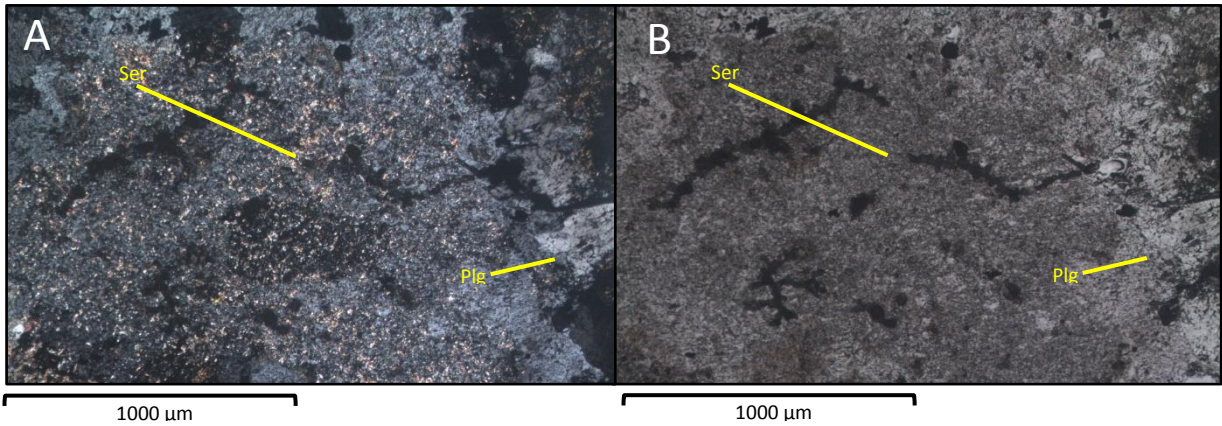


Figura 6-23 A) Fotomicrografía de la muestra M-4414 con alteración Cuarzo-Sericita en nicoles cruzados. B) Fotomicrografía de la muestra M-4414 con alteración Cuarzo-Sericita en nicoles paralelos.

La ocurrencia de la mena principal que corresponde a calcopirita en un 95% de los cortes descritos (el otro 5% corresponde a bornita) es principalmente diseminado, registrado en 80% de los cortes (Figura 6-24A) y en menor medida en vetillas y en halo, con un total de 20% (Figura 6-24B).

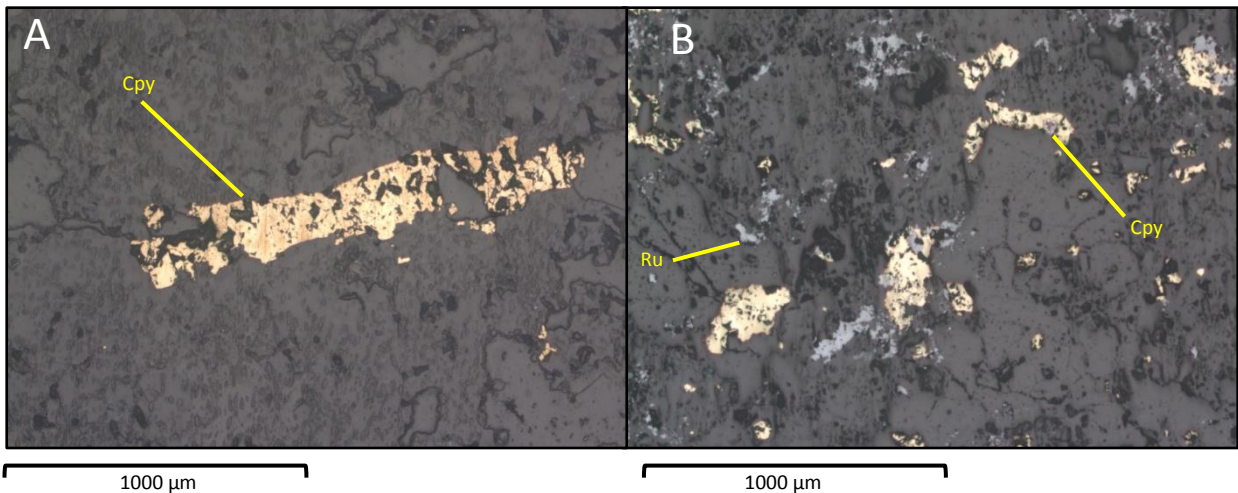


Figura 6-24 A) Fotomicrografía de la muestra M-4417 con calcopirita (Cpy) en una vetilla. B) Fotomicrografía de la muestra M-4363 con calcopirita (Cpy) diseminada con rutilo (Ru).

En cuanto a la zona mineral, se observó que un 60% de los cortes descritos pertenecen a la zona con predominancia de calcopirita, mientras que el otro 40% pertenece a la zona con dominio de pirita.

Del total de los cortes descritos, en 20 se observó tennantita-tetraedrita, con leyes visuales que varían desde un 1% a un 20% en base al total de minerales opacos, En el caso de la tennantita-tetraedrita se encuentra principalmente como reemplazo en debilidades de calcopirita (Figura 6-25) y en bordes (Figura 6-26 y Figura 6-27) y en algunos casos el reemplazo de la calcopirita es completo por lo que se observan granos diseminados de tamaño muy fino, vale decir menor a 200 micrones (Figura 6-26 y Figura 6-27).

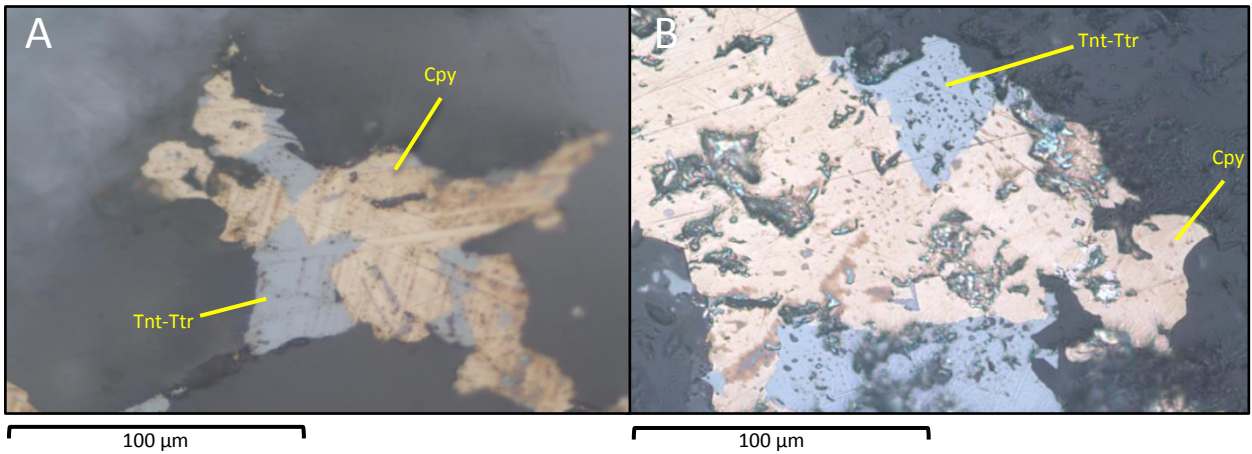


Figura 6-25 A) Fotomicrografía de la muestra M-4481 tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en planos de debilidades de calcopirita (Cpy). B) Fotomicrografía de la muestra M-4707 con tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en planos de debilidades de calcopirita (Cpy).

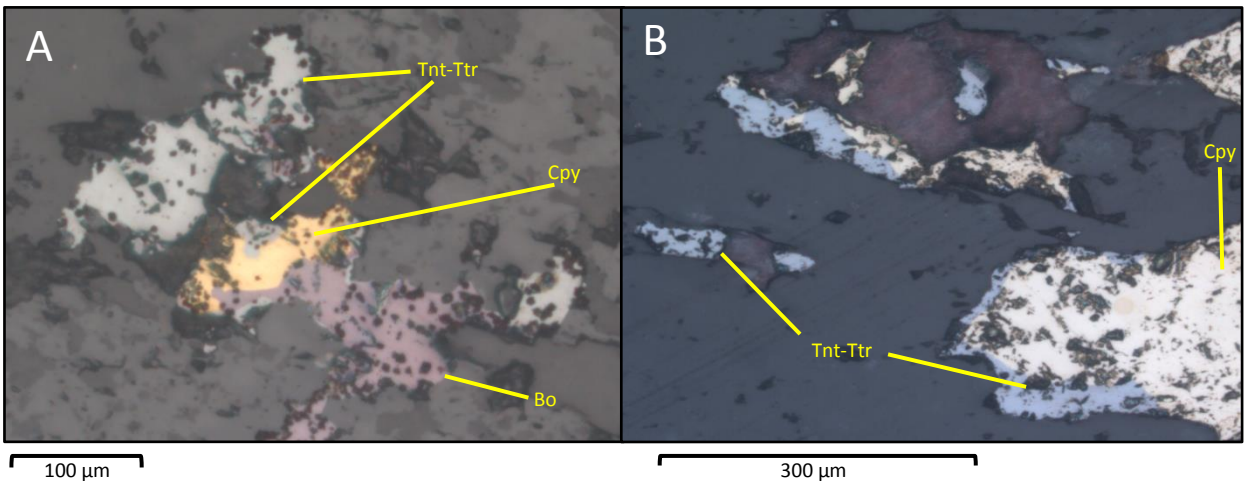


Figura 6-26 A) Fotomicrografía de la muestra M-3841 tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en bordes de calcopirita (Cpy) y bornita (Bo). B) Fotomicrografía de la muestra M-3845 con tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en bordes de calcopirita (Cpy).

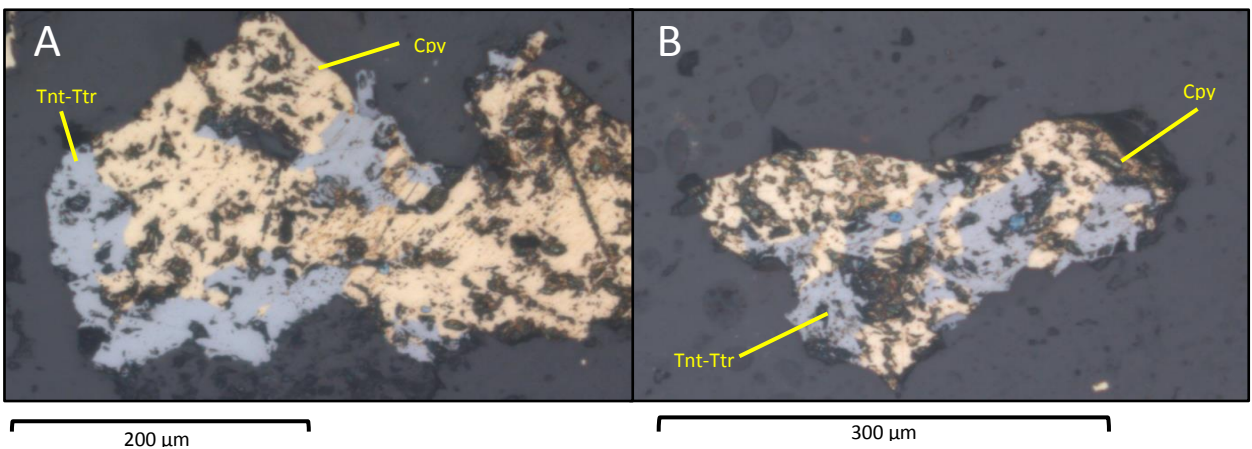


Figura 6-27 A) Fotomicrografía de la muestra M-3841 tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en bordes de calcopirita (Cpy) y bornita (Bo). B) Fotomicrografía de la muestra M-3845 con tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) en reemplazo en bordes de calcopirita (Cpy).

Para el caso de la pirita se observó en 36 cortes y con concentraciones de este mineral que varían entre 2% y un 80% en base al total de minerales opacos. En el caso de la pirita se encuentra mayormente diseminado (Figura 6-28B) y en vetillas (Figura 6-28A), y las que se encuentran en contacto con la mena principal se observa con textura de bordes mutuos (Figura 6-29).

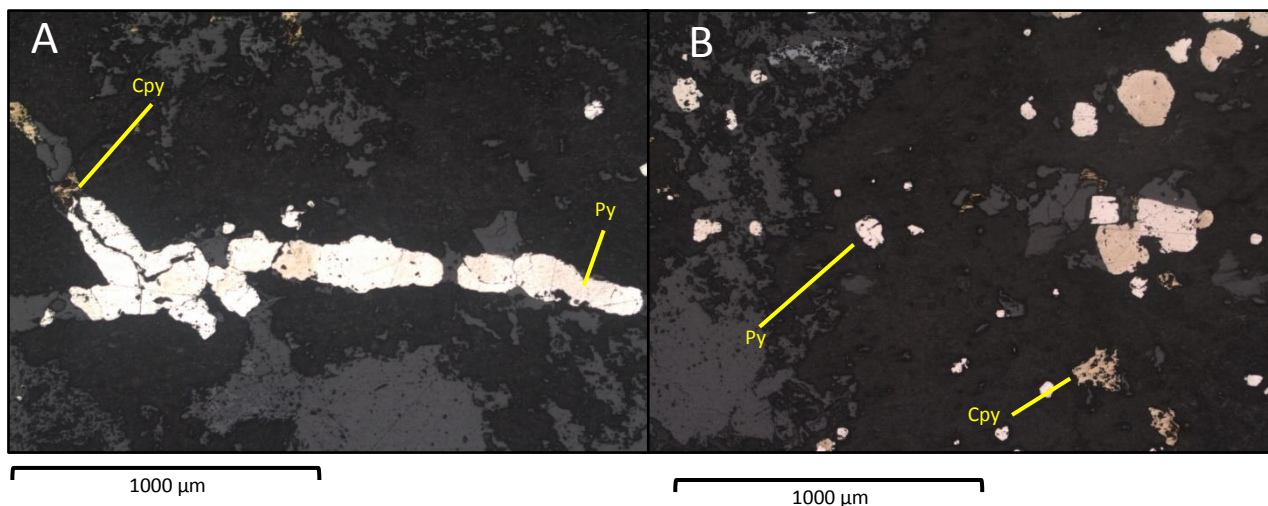


Figura 6-28 A) Fotomicrografía de la muestra M-3860 con pirita (Py) y calcopirita (Cpy) en vetillas. B) Fotomicrografía de la muestra M-3860 con diseminado de pirita (Py) y calcopirita (Cpy).

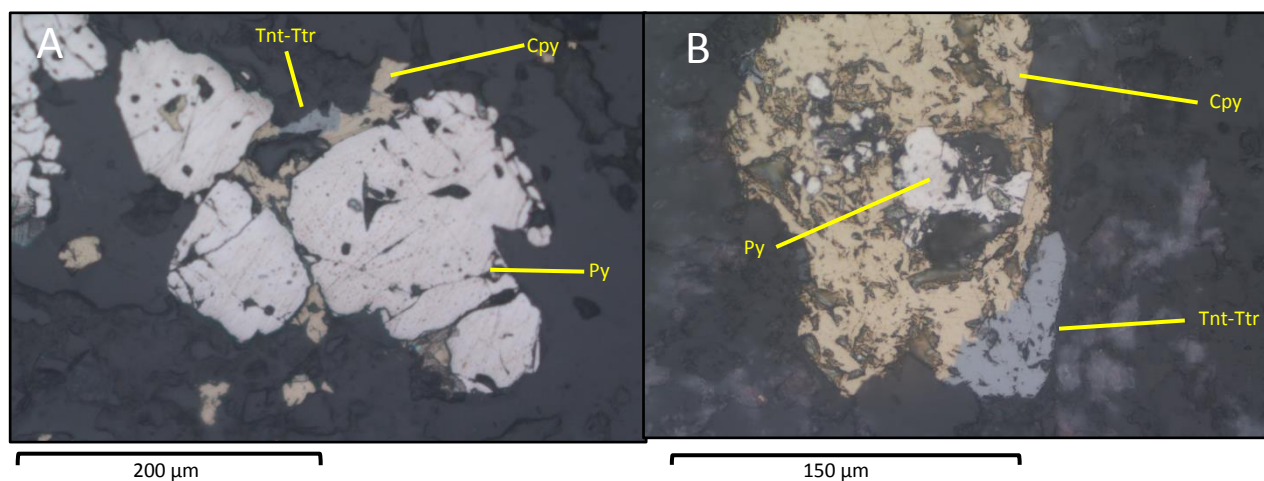


Figura 6-29 A) Fotomicrografía de la muestra M-4418 con pirita (Py) y calcopirita (Cpy) en contacto por bordes mutuos y tennantita-tetraedrita (Tnt-Ttr) reemplazando en debilidades a la calcopirita (Cpy). B) Fotomicrografía de la muestra M-3845 con de pirita (Py) con un borde envolvente de calcopirita (Cpy) y tennantita-tetraedrita reemplazando en bordes a la calcopirita (Cpy).

6.2.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

En el análisis mediante microscopía electrónica se leyeron 4 muestras, dos correspondientes a cortes transparentes/pulidos con los valores de mercurio más altos reportados según ICP-MS y dos briquetas de compuestos mensuales, correspondiente a concentrados finales de cobre de los meses de enero y febrero del 2016, que poseían altos valores de mercurio reportados mediante Absorción Atómica (AA). El límite de detección del detector presente en el microscopio electrónico de barrido es de 1000 ppm.

En total se realizaron 21 lecturas de granos minerales correspondientes a sulfosales (serie tennantita-tetraedrita) y sulfuros (pirita y calcopirita) en los cuales se observó la presencia de mercurio en 12 lecturas, este se alojaba en las sulfosales mencionadas.

Las lecturas arrojaron valores desde 0,16% hasta 1,32% (porcentaje en peso), con un promedio de 0,52%. Un resumen de los datos estadísticos se encuentra en la Tabla 4 y los valores obtenidos en cada lectura junto a su error se muestra en la Figura 6-30.

Las otras 9 partículas en las cuales no se obtuvo lectura de mercurio mediante esta técnica correspondían a partículas con calcopirita, pirita y tennantita-tetraedrita.

Tabla 4 Valores estadísticos para los resultados de análisis mediante SEM

	Hg (% en peso)	σ^2 (% en peso)
Mínimo	0,16	0,14
Mediana	0,47	0,18
Máximo	1,32	0,22
Promedio	0,52	0,44

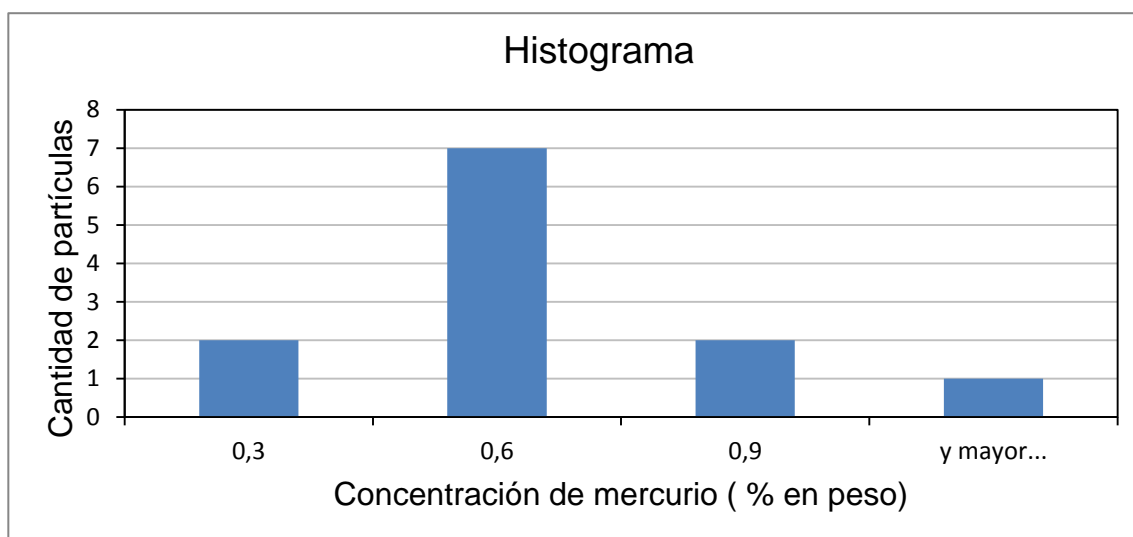


Figura 6-30 Histograma de las concentraciones de mercurio obtenidas mediante análisis químico EDS en el microscopio electrónico de barrido.

En la Figura 6-31 se puede observar un análisis a una partícula compuesta por calcopirita y tetraedrita reemplazándolo en el borde. Se observa que tanto el antimonio como el mercurio se distribuyen en toda el grano mineral de sulfosal, para el caso del arsénico se ve un mapa homogéneo, debido a que su concentración esta menor que el límite de detección, por lo que el mapa corresponde al ruido detectado por el sensor.

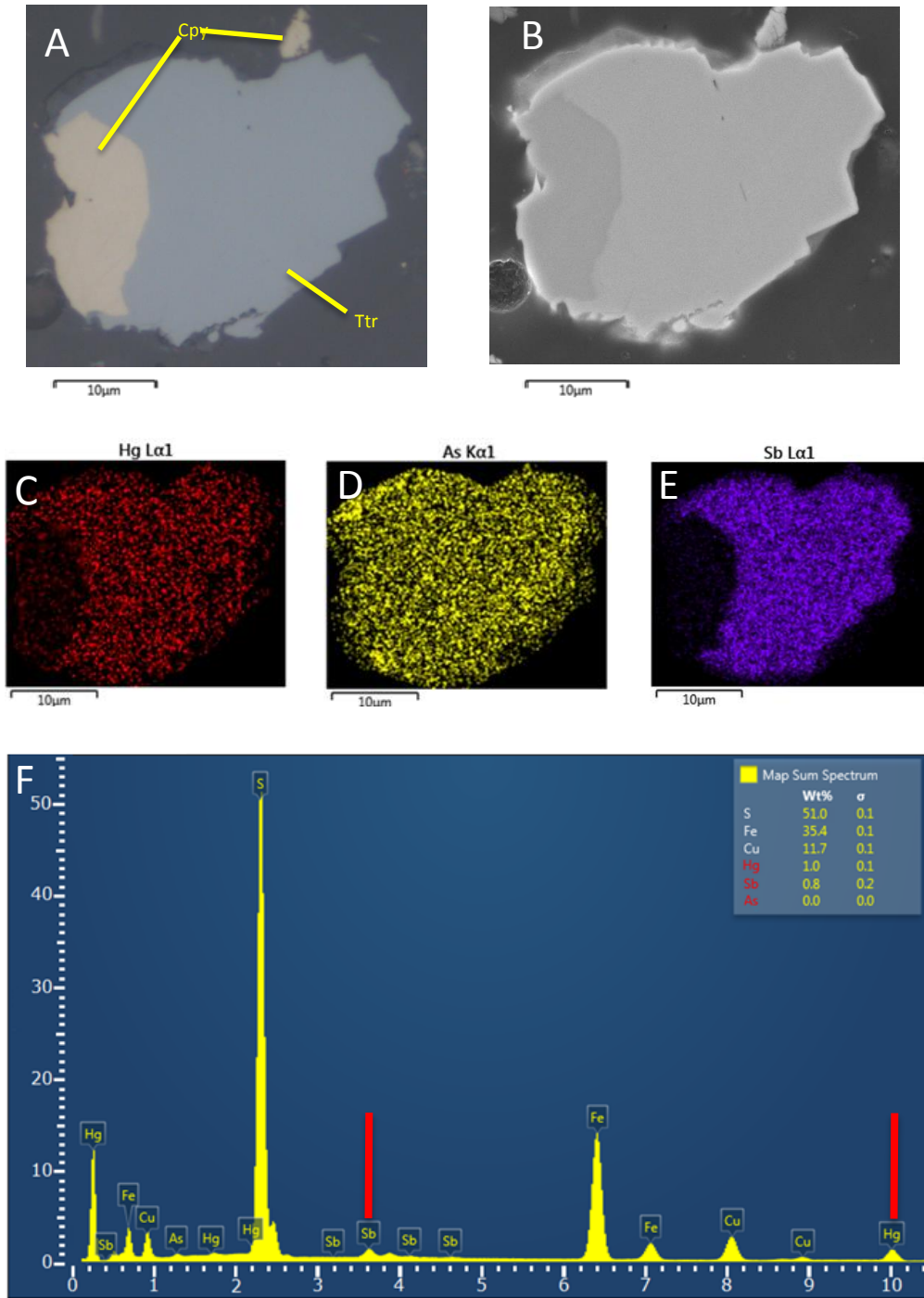


Figura 6-31 A) Fotomicrografía de la briqueta a luz reflejada. B) Fotomicrografía de la muestra con electrones retro dispersados. C) Distribución de mercurio en la partícula. D) Distribución de arsénico en la partícula. E) Distribución de antimonio en la partícula. F) Espectro de emisión EDS de la partícula, las líneas rojas marcan los niveles energeticos utilizados en los mapas D y E.

En la Figura 6-32 se puede observar un análisis a una partícula compuesta por tennantita, bornita y calcopirita. Se observa como el mercurio se distribuye en la tennantita pero no en la calcopirita, no así el antimonio que se observa distribuido homogéneamente en la partícula..

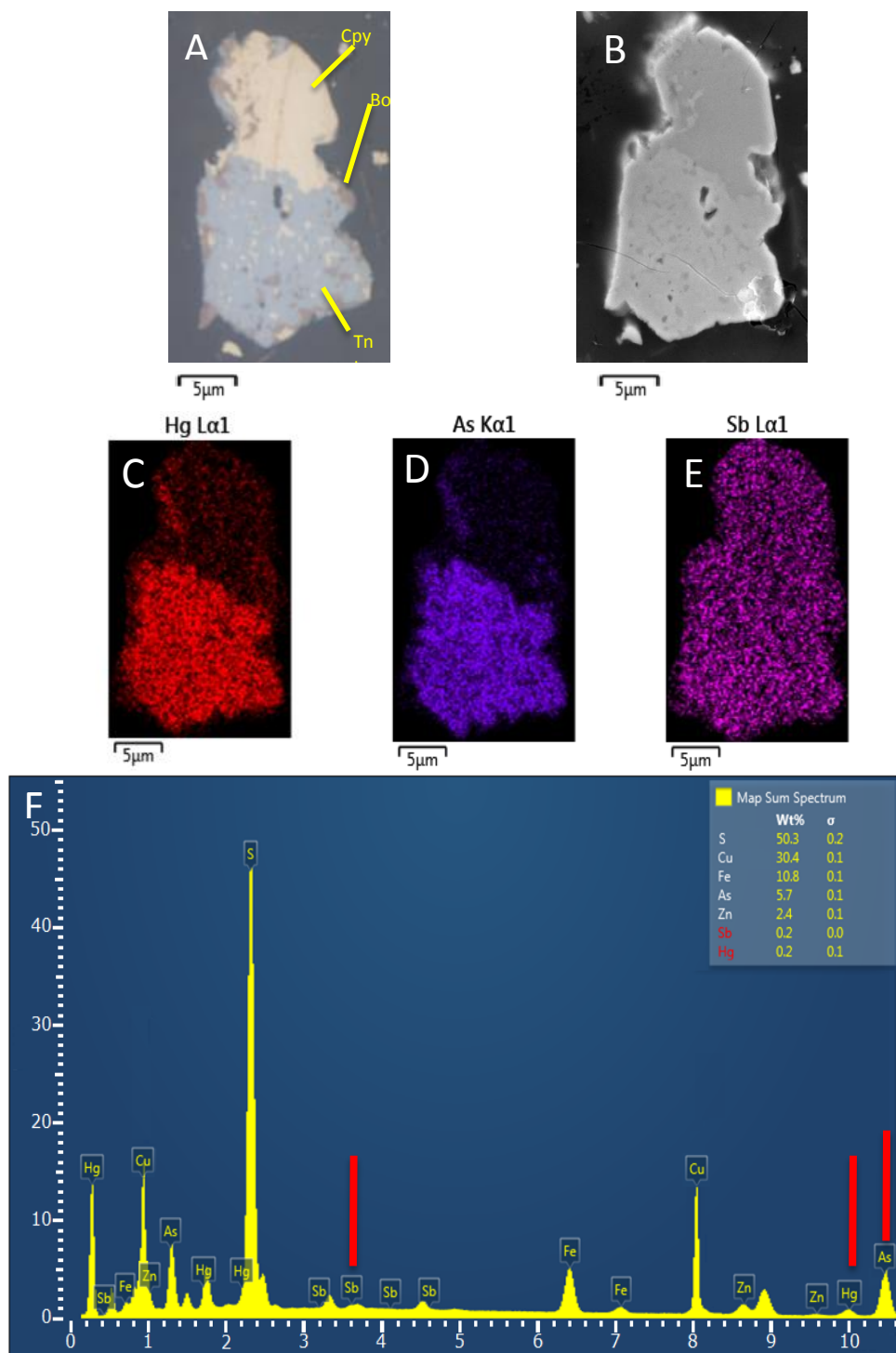


Figura 6-32 A) Fotomicrografía de la briqueta a luz reflejada. B) Fotomicrografía de la muestra con electrones retro dispersados. C) Distribución de mercurio en la partícula. D) Distribución de arsénico en la partícula. E) Distribución de antimonio en la partícula. F) Espectro de emisión EDS de la partícula, las líneas rojas marcan los niveles energeticos utilizados en los mapas C, D y E.

En la Figura 6-33 se puede observar un análisis a una partícula compuesta por calcopirita, digenita, enargita, tetraedrita y tennantita. Se observa como el mercurio se distribuye preferentemente en la tetraedrita y la tennantita y evita los cristales de enargita y calcopirita.

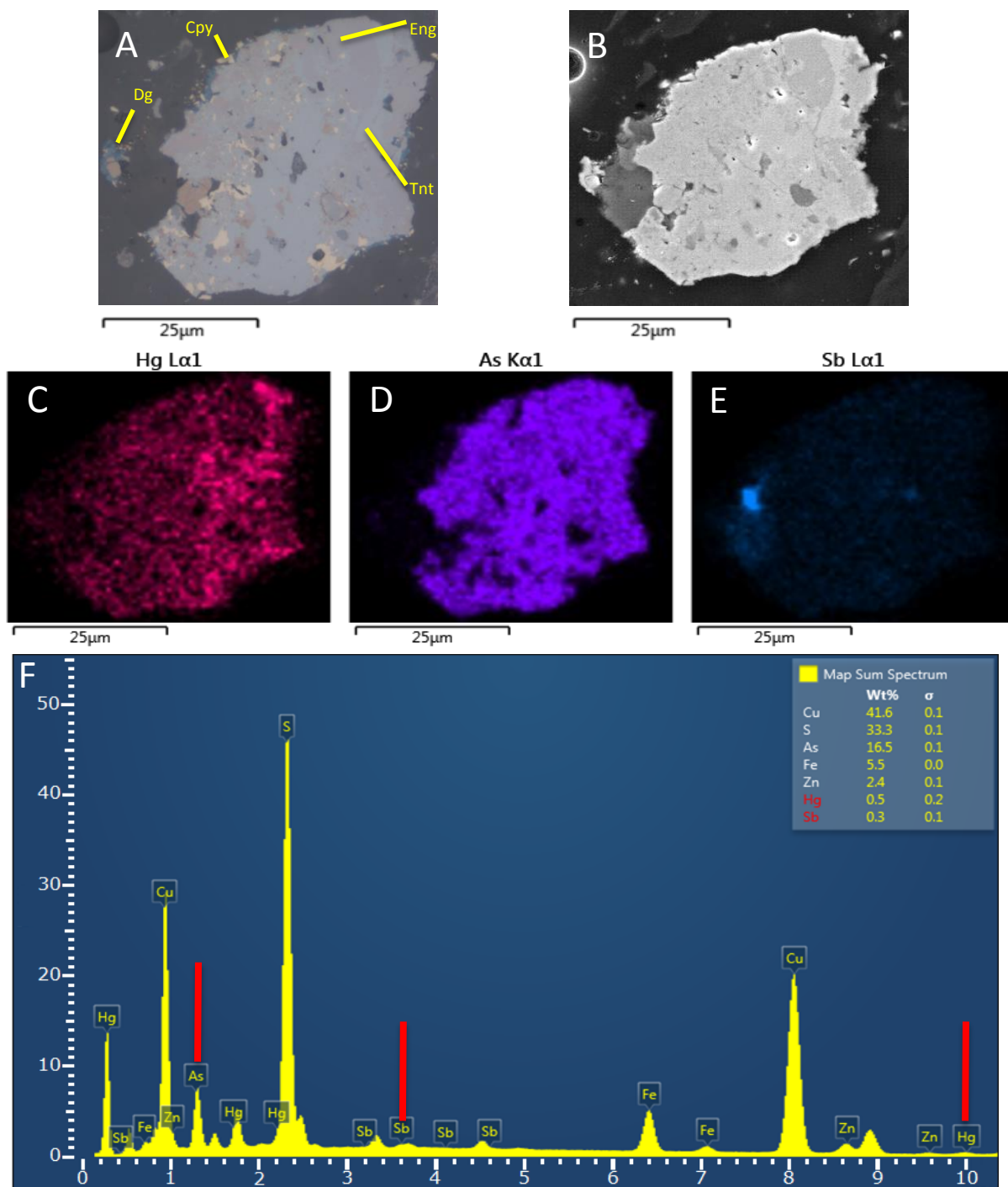


Figura 6-33 A) Fotomicrografía de la briqueta a luz reflejada. B) Fotomicrografía de la muestra con electrones retro dispersados. C) Distribución de mercurio en la partícula. D) Distribución de arsénico en la partícula. E) Distribución de antimonio en la partícula. F) Espectro de emisión EDS de la partícula, las líneas rojas marcan los niveles energeticos utilizados en los mapas C, D y E.

6.3 Distribución de mercurio en el yacimiento

6.3.1 Variografía

Para el estudio de la distribución del mercurio en el yacimiento se consideran 413 de los 417 datos obtenidos del estudio ICP-MS, dado que no se utilizaron los 4 valores más altos, porque estos valores se escapan de la tendencia de la población y afectan en el cálculo del variograma.

6.3.1.1 Variograma experimental

Para poder conocer la existencia de anisotropías en el yacimiento se procede a calcular el mapa variográfico en las 3 direcciones principales, lo cual se puede observar en la figura 6-34, además en la figura 6-35 se presenta el mapa con la densidad de pares de puntos en las 3 direcciones principales.

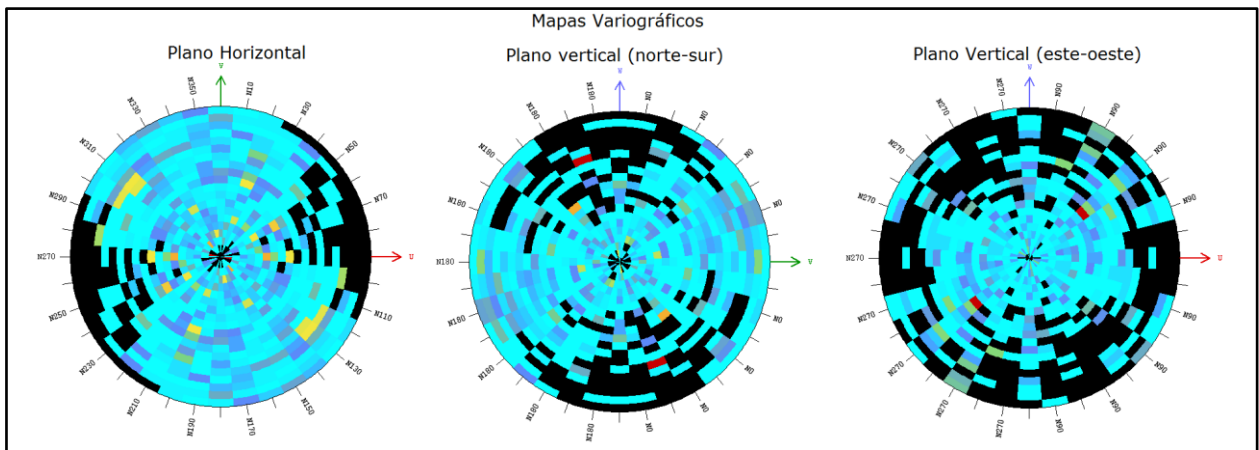


Figura 6-34 Mapa variográfico en las 3 direcciones ortogonales principales.

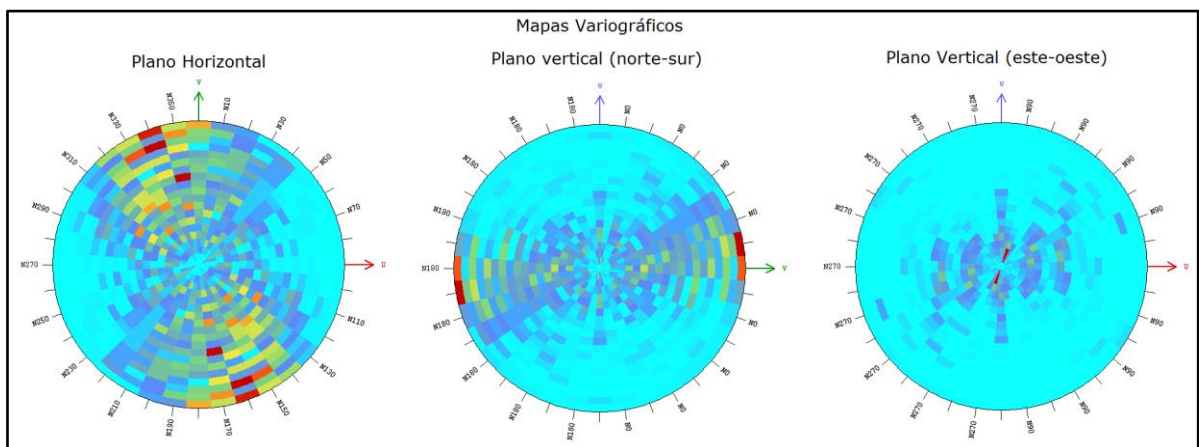


Figura 6-35 Mapa con la densidad de puntos para las 3 direcciones ortogonales principales.

Como en la Figura 6-34 y la Figura 6-35 no se observa con claridad una anisotropía, ya que el mapa variográfico tiene un comportamiento similar al mapa de pares de puntos, se considera el cálculo de un variograma omnidireccional.

Los parámetros utilizados para la obtención del variograma son:

- Paso promedio de 32 metros
- Tolerancia al paso de 16 metros

Finalmente se calculó el variograma para los primeros 20 pasos, vale decir hasta los 640 metros, esto se puede observar la Figura 6-36.

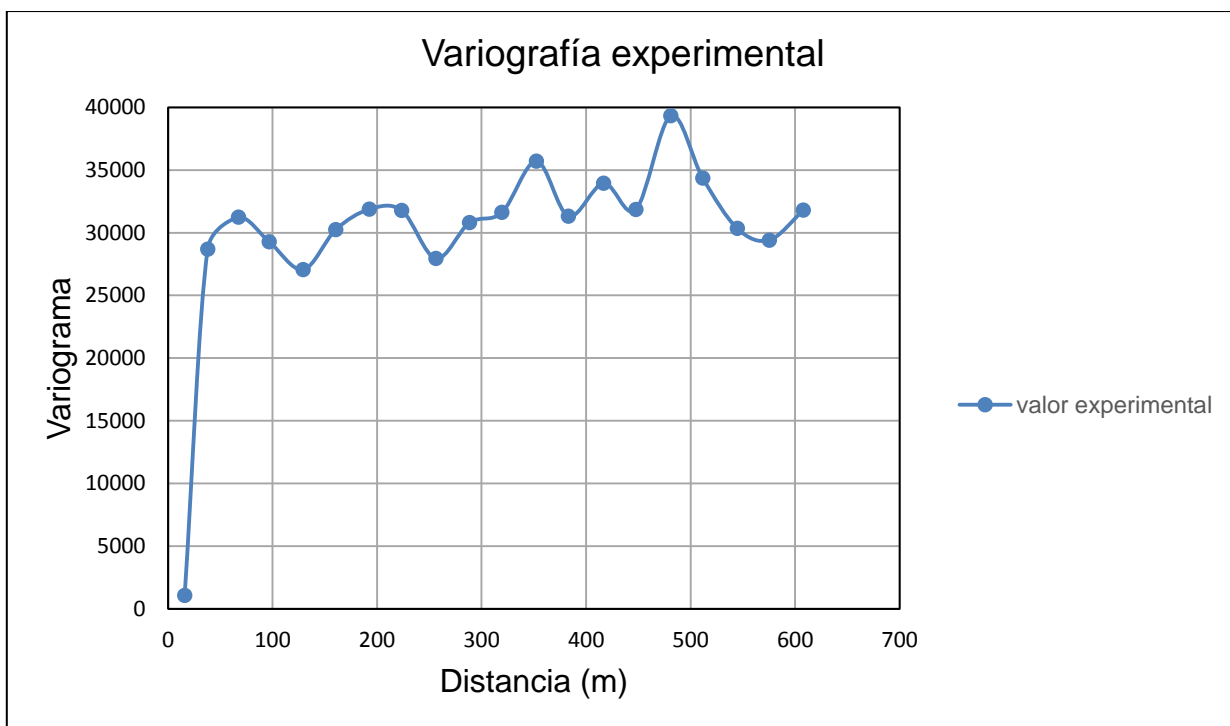


Figura 6-36 Variograma experimental: correlación espacial de las concentraciones de mercurio en el yacimiento Río Blanco.

6.3.1.2 Modelo Variográfico

Para realizar el modelo variográfico se considera un efecto pepita y dos estructuras esféricas, dado el comportamiento observado en la figura 6-33 en el cual se alcanza una meseta cercana a los 30.000 hasta los 238 metros, para luego aumentar y rondar cerca de los 35.000. El efecto pepita posee un valor de 1.200, la primera estructura esférica tiene una meseta de 25.700 y un alcance de 75 metros y la última estructura, también esférica, tiene una meseta de 6.710 y un alcance de 238 metros. Por lo que el resultado experimental queda modelado como se observa en la Figura 6-37.

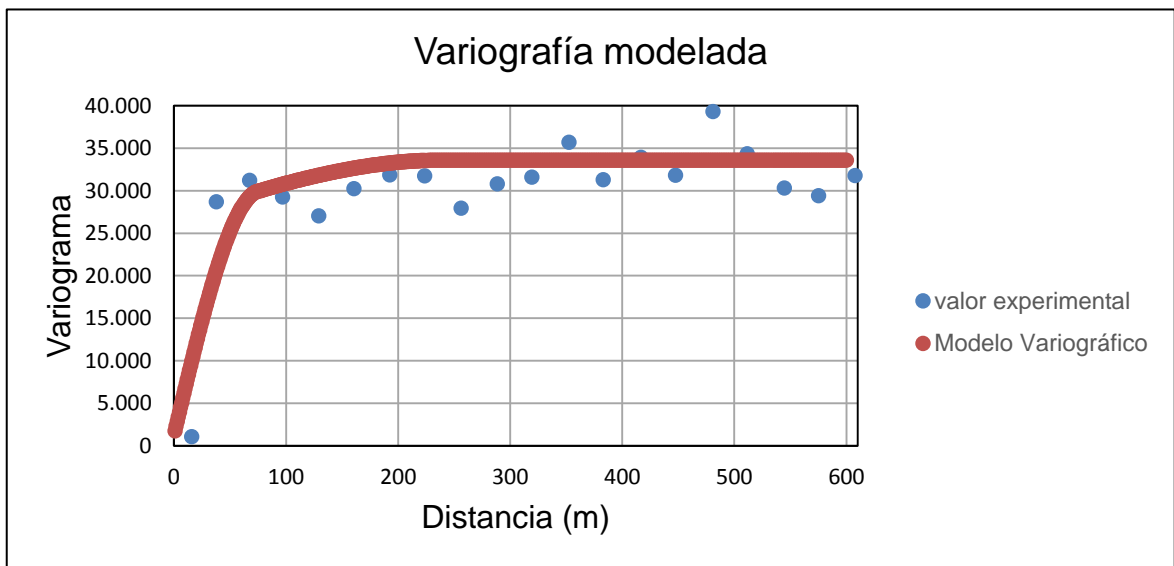


Figura 6-37 Modelo de variograma (línea roja) ajustado al variograma experimental (puntos azules) para las concentraciones de mercurio en el yacimiento Río Blanco.

6.3.2 Plan de Kriging

Para la estimación del mercurio en el yacimiento se consideran 415 datos obtenidos del análisis ICP-MS (se excluyen 4 valores considerados *outliers*), para la estimación se consideran los valores más altos pero utilizando encapsulamiento de estos, para que su influencia sea solo en sectores cercanos. Se utilizó el método de estimación mediante kriging ordinario y se consideró una dirección de preferencia para la estimación, esta dirección corresponde a N30°E, misma dirección utilizada para el modelamiento de arsénico (Martínez, 2013) y de la plata (Martínez *et al*, 2012) que también se encuentran asociadas a las sulfosales y que poseen un control estructural en dicha dirección.

Para el cálculo se siguen 3 algoritmos distintos, debido a la poca cantidad de datos, de manera de hacer la estimación lo más precisa, la diferencia principal entre ellos radica en el tamaño del elipsoide que define la vecindad de kriging y el encapsulamiento de los valores más altos, un resumen de estos 3 algoritmos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5 Pasos de estimación para el modelo de bloques

Estimación	Vecindad de Kriging			Encapsulamiento de valores mayores			
	eje mayor	semi eje mayor	eje menor	valor limite	eje mayor	semi eje mayor	eje menor
1	200	50	50	-	-	-	-
2	500	100	100	5000	200	100	100
3	5000	1500	1500	500	500	300	300

6.3.3 Modelo de Bloques

La estimación realizada mediante kriging ordinario se realizó en un modelo de bloques que engloba el sector Don Luis, en total se tienen 2.190.150 bloques con dimensiones de 15 metros en la coordenada este, 15 metros en la coordenada norte y 16 metros de altura, con un origen en el punto 22.660 Este, 24.195,5 Norte y 2.220 m.s.n.m.

Las leyes obtenidas fluctúan entre 1,05 ppb y 1,4 ppm. Las muestras poseen una distribución aproximadamente log-normal con una anomalía de muestras con valores relativamente altos que se pueden apreciar en la figura 6-38 y un promedio de 125 ppb. Un resumen de los valores estadísticos de estos datos se encuentra en la Tabla 6.

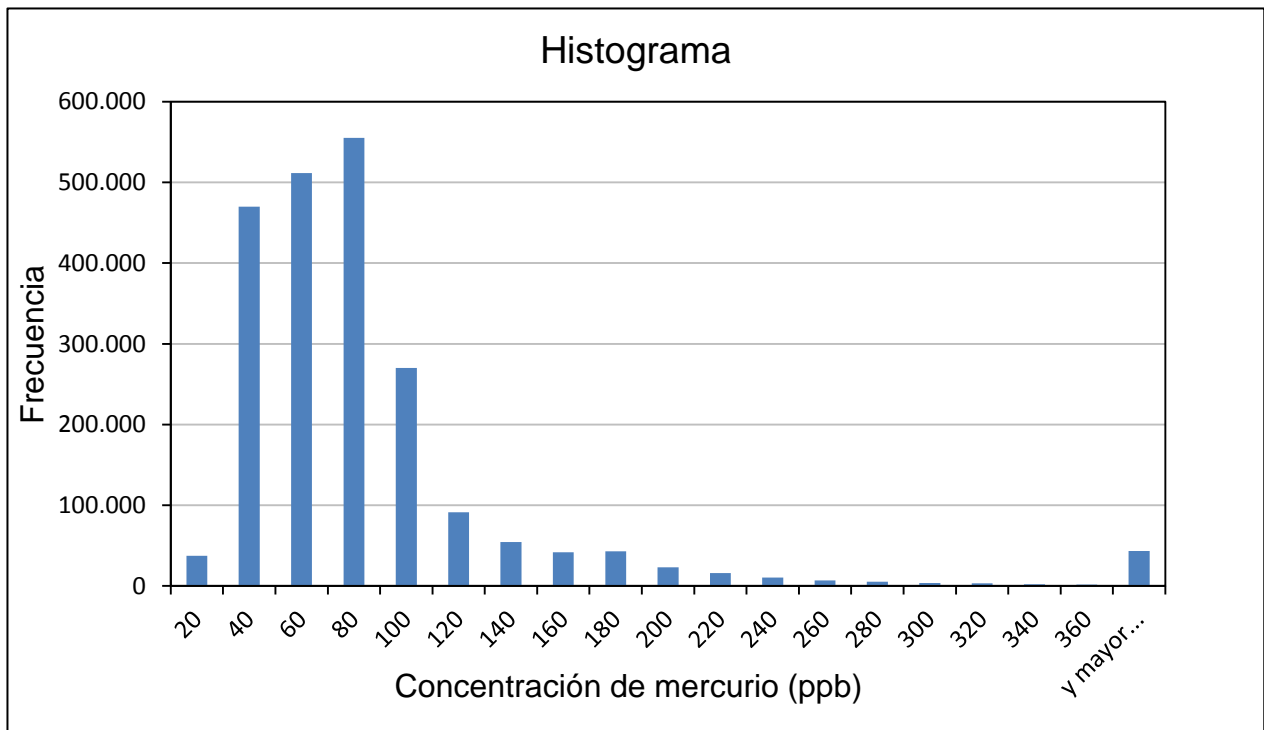


Figura 6-38 Histograma de leyes de mercurio en el modelo de bloques.

Tabla 6 Resumen estadístico para el modelo de bloques estimado.

	Hg (ppb)
Primer cuartil	42,07
Mínima	2,5
Mediana	62,89
Máxima	1.414,3
Tercer cuartil	84,77
Promedio	125,33

En la Figura 6-39 se tiene una vista en planta de cuerpos que delimitan zonas según sus leyes, por lo que su superficie se forma por cuerpo de alta ley con una deriva hacia los bordes con menores concentraciones. En rojo se observan los espacios donde existen leyes superiores a 1 ppm, en amarillo los sectores que poseen leyes superiores a 500 ppb y en tono celeste los cuerpos que poseen leyes superiores a 250 ppb.

Se muestra solo los cuerpos obtenidos para el sector Don Luis (mina rajo), dejando de lado el sector Río Blanco (mina subterránea), esto debido a que la mayor densidad de muestras se encuentra en este sector, por lo que la estimación realizada en este sector es más representativa.

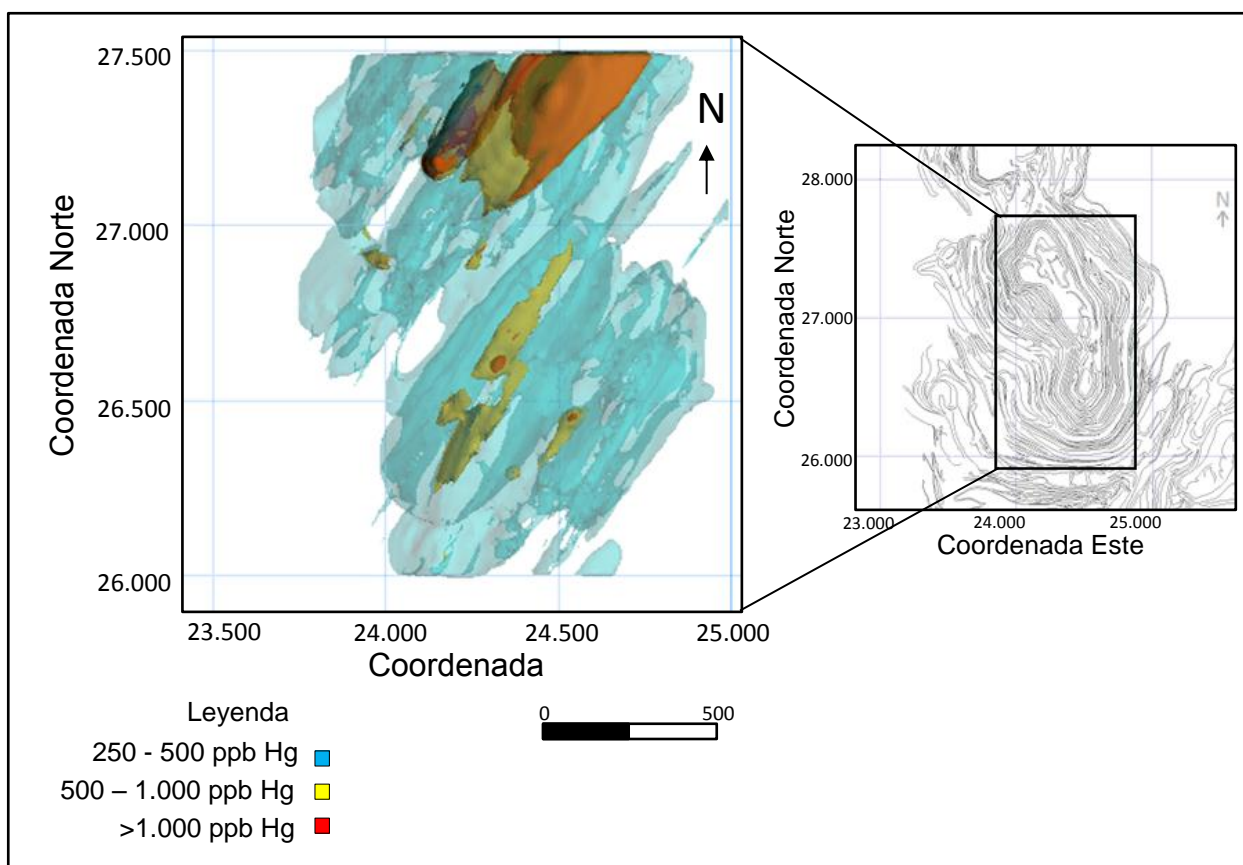


Figura 6-39 Vista en planta de los cuerpos con concentraciones bajas, medias y altas de mercurio.

En la Figura 6-40 se muestran dos perfiles longitudinales en los que se puede apreciar curvas de isoley para 3 intervalos. Los perfiles se trazan en la sección XC355 del yacimiento, que se ubica en el sector sur de Don Luis y cruza la zona productiva denominada fase 5. El perfil A corresponde a las zonas de alteración presentes en el sector y el perfil B corresponde a las unidades litológicas.

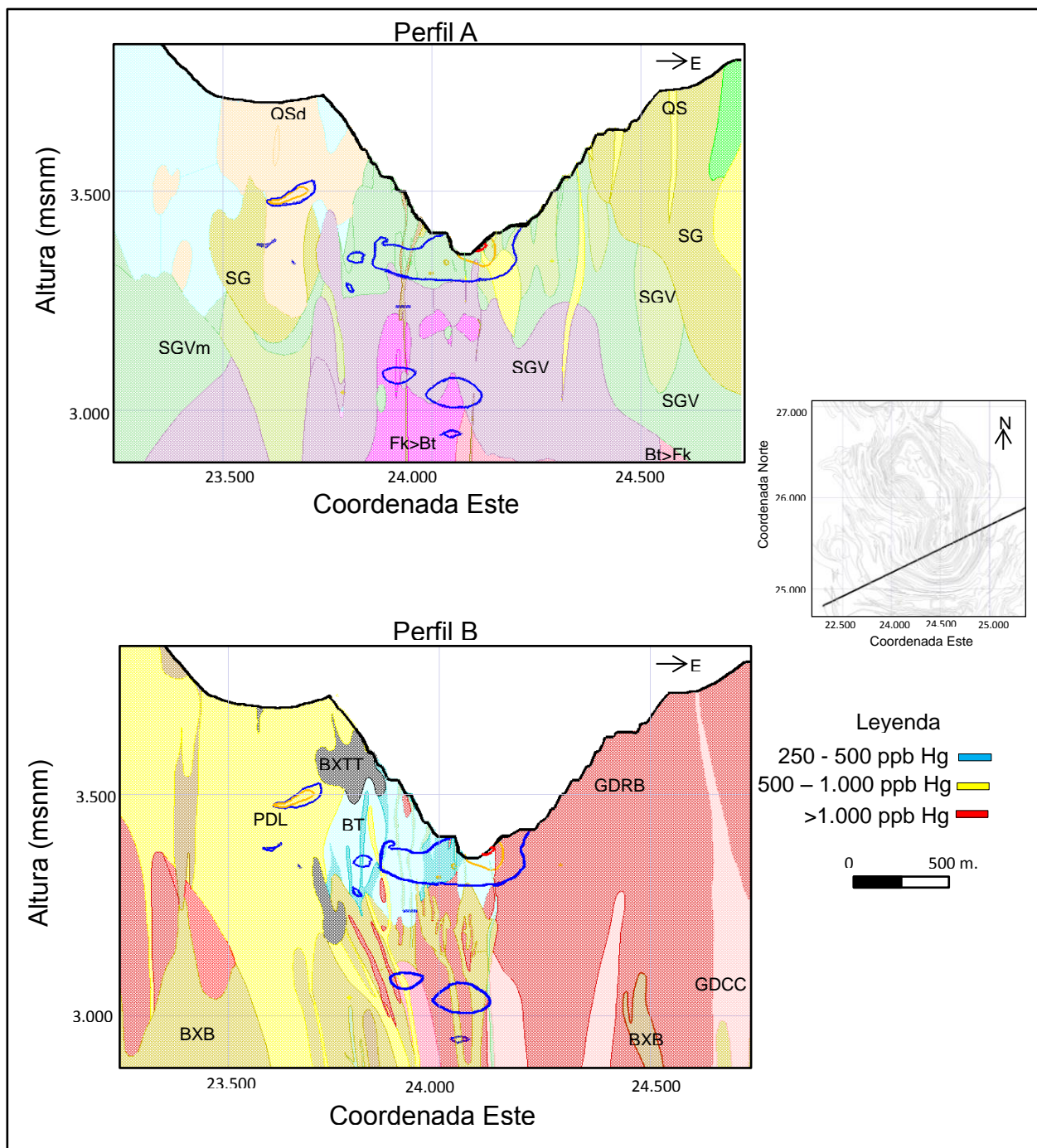


Figura 6-40 Perfiles de la sección XC355 del modelo de bloque con la topografía actual del sector Don Luis, en el perfil superior se pueden observar las zonas de alteración y en el perfil inferior se pueden observar las unidades litológicas.

En la Figura 6-41 se muestra un perfil longitudinal en el que se puede apreciar curvas de isoley para 3 intervalos. El perfil se traza en la sección XC185 del yacimiento, que se ubica en el sector norte de Don Luis y cruza la zona productiva denominada fase 4. El perfil corresponde a las unidades litológicas presentes en el sector.

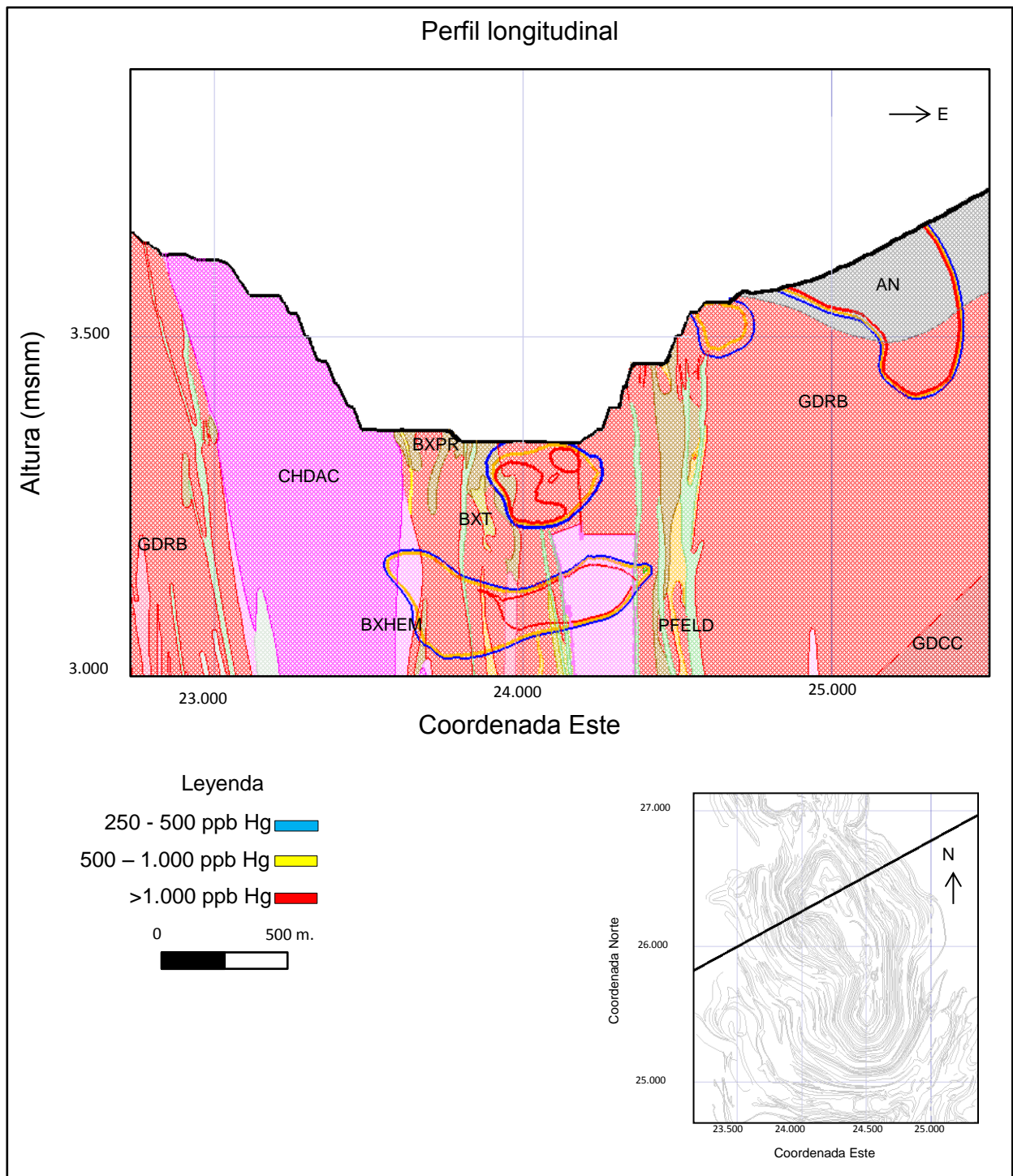


Figura 6-41 Perfil de la sección XC185 del modelo de bloque con la topografía actual del sector Don Luis, en el perfil se puede observar las unidades litológicas.

En la Figura 6-42 se muestra una vista en planta resaltando los sectores de los cuerpos que se intersectan con la topografía actual del yacimiento y una vista de las principales fallas que se encuentran en este sector.

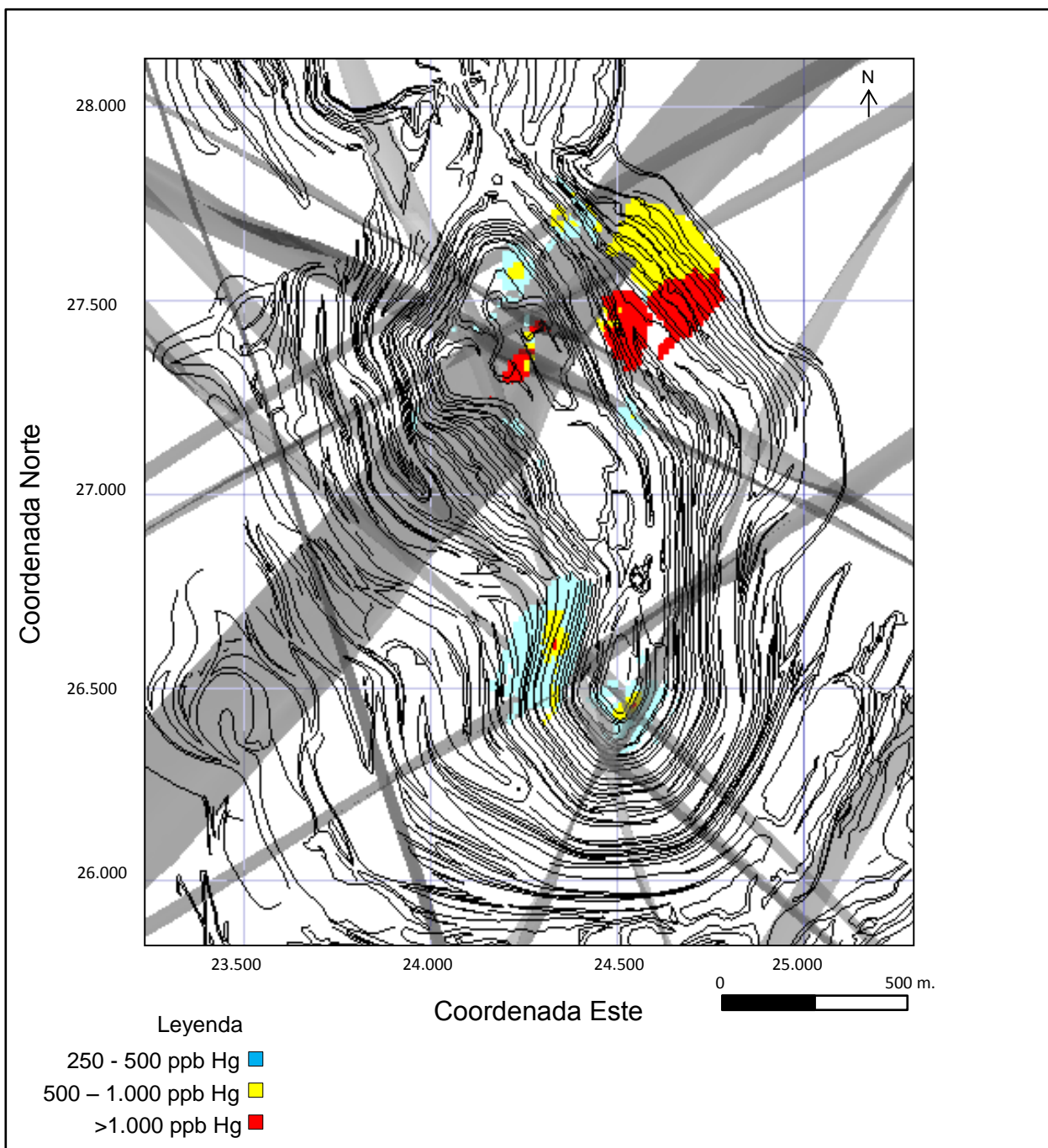


Figura 6-42 Vista en planta del sector Don Luis, las líneas negras corresponden a la topografía actual del sector., los polígonos grises corresponde a las fallas principales descritas para este sector.

7 DISCUSIÓN

7.1 Confiabilidad de los datos químicos y mineralógicos

Un punto importante a considerar es la validez de las bases de datos utilizadas, es por esto que es importante revisar los protocolos de muestreo y análisis y si son adecuados para obtener lecturas concordantes de los elementos de interés, en este caso, el mercurio.

El mercurio es un elemento altamente volátil por lo que el tratamiento de las muestras es muy importante para evitar pérdidas y malos resultados. Uno de los factores condicionantes es la especiación del mercurio ya que controla, entre otras cosas, su movilidad y reactividad (Renneberg y Dudas 2001).

En el caso del yacimiento Río Blanco, no existen estudios previos que reporten la existencia de minerales de mercurio (cinabrio o metacinabrio, los más usuales en sistemas hidrotermales y de pórfidos) y en el desarrollo de esta memoria tampoco se encontraron, solo se puede mencionar que se encuentra como impureza dentro de sulfosales (serie tennantita-tetraedrita aunque con mayor afinidad al extremo con antimonio) por lo que su estado de oxidación debería ser Hg^{2+} (Olmsted *et al.*, 1985), mismo estado de oxidación que en su forma sulfurada HgS.

Los sulfuros de mercurio requieren un ataque ácido concentrado para liberar todo el mercurio, por lo que el uso de agua regia (ácido nítrico y ácido clorhídrico en una relación de 1:3) es recomendado (Leybourne *et al.*, 2016), además que, debido a que se trata de un ácido fuerte, impide una reabsorción del mercurio, que es un problema común durante la digestión de muestras (Hall y Pelchat 2005).

El método utilizado en la preparación de las muestras tanto para los análisis ICP-MS y los análisis de AA incluyen la disolución de la roca mediante agua regia, cumpliendo también con estándares de control de temperatura, por lo que los resultados obtenidos no deberían tener pérdidas.

Aunque un punto que no es considerado en ninguno de los protocolos de preparación de la muestra es la conminución, ya que el tiempo de molienda y la cantidad de masa que se está conminuyendo son factores que determinar el aumento en la temperatura durante este proceso (Leybourne *et al.*, 2016) por lo que se deben tomar precauciones para obtener una lectura precisa (Corte y Dubois, 1975).

Respecto de los análisis minerales automatizados QEMSCAN, no se está exenta de errores, pese a que existe un catálogo muy preciso de la mineralogía existente en el yacimiento, se ha reportado inconsistencias en los reportes mineralógicos, tales como diferencias en los tiempos de análisis y de cantidad de puntos leídos, es por esto que, pese a que en el presente trabajo se utilizaron datos de mineralogía QEMSCAN, estos poseen un rango de error que no está especificado.

El microscopio electrónico de barrido posee un límite de detección de 1.000 ppm, que está por sobre la media de las concentraciones presentes en las muestras, que tienen un promedio de 0,1 ppm. Por lo que pese a encontrar el elemento de interés en un mineral en específico no se descarta la posibilidad de que se encuentre en otro mineral.

7.2 Análisis exploratorio de datos

En los análisis realizados mediante ICP-MS existe una baja representatividad para el sector Río Blanco, solo un 7% de las muestras se ubican en este sector, el resto de las muestras se ubican en el sector Don Luis. Por este motivo se centró el estudio en esta zona del yacimiento.

Las muestras son extraídas de sondajes, los cuales tienen un dirección de preferencia, debido a que su finalidad es conocer las leyes de cobre presentes en el yacimiento, no así del mercurio, por lo que se realizan según la dirección de mineralización conocida para el cobre en el yacimiento, por lo que este estilo de muestreo heterogéneo puede provocar errores al momento de la estimación, además de ser una grilla irregular, se tiene que las muestras son muy distantes entre sí, esto genera un sesgo, por lo que se sugiere aumentar la densidad de los análisis y así poder mejorar los estudios realizados en este trabajo para poder disminuir los errores.

En la distribución de las muestras según las unidades litológicas presentes en el yacimientos, podemos observar que un 74% de las muestras se encuentran alojadas en 4 unidades, el 26% restante se distribuyen entre 11 unidades litológicas y en estos casos llega hasta solo 4 muestras por unidad, es por esto que no se puede considerar una relación entre la litología y el mercurio, porque no se considera representativo debido al bajo número de muestras.

Al agrupar las unidades en el tipo de roca, se observa que la unidad más antigua, correspondiente a andesitas, concentra los mayores valores de mercurio, pero está compuesta solo por 16 muestras, esto puede ser considerado como un bajo número de muestras, por lo que no podemos indicar con certeza si existe un dominio de este tipo de roca en la concentración de mercurio.

En cuanto a la relación entre las concentraciones de mercurio y la zona de alteración, se observa que la alteración cuarzo-sericítica posee un promedio más bajo que la tendencia de las demás zonas. Respecto de las demás alteraciones, no se aprecia una clara influencia de estos factores, mas sí se aprecia una tendencia donde la alteración sericita gris verde débil y sericita gris concentran los valores más altos de mercurio. Estos datos se contraponen tanto a lo observado en los cortes transparentes, en donde la alteración QS y SGV fueron las alteraciones dominantes, como al control que ejerce alteración QS en la precipitación de sulfosales (Martínez, 2012; Martínez, 2013; Suazo, 2014.)

En la Figura 6-9, que agrupa las zonas minerales según su tipo de alteración, también muestra que no existe una alteración dominante que controle la mineralización de mercurio, ya que tanto el fondo, la alteración potásica y la alteración sericítica, tienen

una población de concentraciones muy similares. Sólo la alteración cuarzo-sericita posee un promedio menor, lo que nuevamente se contradice con lo descrito en los cortes transparentes.

En cuanto a la relación entre el mercurio y la zona mineral, lo que se evidencia en la Figura 6-10, es que hay una clara disminución de éste en los sectores en donde hay presencia de sulfosales, mientras que en las demás zonas la distribución es similar con un *peak* en las zonas con mayor presencia de pirita. Lo anterior se contradice con lo analizado en el microscopio electrónico de barrido, donde se aprecia que el mercurio se distribuye en las sulfosales, no así en la pirita. La incongruencia detectada se atribuye a que la zona mineral se modela con los datos obtenidos de la descripción macroscópica de los sondajes, por lo que a esa escala la presencia de sulfosales puede pasar inadvertida, ya que como se determinó, las sulfosales se encuentran predominantemente como reemplazo en bordes y debilidades.

Del análisis de la base de datos mineralógicos se puede decir que las concentraciones de pirita se encuentran hasta en 3 órdenes de magnitud mayor que las concentraciones de tennantita-tetraedrita, con un promedio de 2,7% de pirita en contraste con un promedio de tennantita-tetraedrita menor al 0,01%.

Al contrastar las concentraciones de los minerales nombrados anteriormente con las concentraciones de mercurio obtenidas para la misma muestra, vemos que la nube de dispersión de la serie tennantita-tetraedrita se correlaciona mejor (Figura 6-12) que la nube de dispersión para la pirita, en la cual no se observa alguna relación (Figura 6-13).

Al observar los datos de antimonio y compararlos con las concentraciones de mercurio de los compuestos mensuales desde enero del año 2013 hasta agosto del 2016, se aprecia que existe una relación que marca una nube de dispersión con pendiente positiva, con una regresión lineal que posee un coeficiente de determinación de 0,75 y un coeficiente de correlación de 0,87. Lo cual indica que el mineral que aloja estos elementos flota en las celdas de flotación, por lo que puede estar asociado a mineralización de mena como calcopirita y bornita, ya que las condiciones fisicoquímicas de las celdas de flotación están configuradas para favorecer la flotación de dichos minerales y depreciar la ganga como pirita, entre otros minerales.

Esta buena correlación también se puede observar en la Figura 6-15 en el que vemos que el mercurio y el antimonio se comportan de manera similar, es decir, cuando existen *peak* de un elemento, también existen *peak* del otro. Aunque no siempre en las mismas proporciones y también se puede observar como desde enero del 2013 hasta la fecha se están explotando zonas con mayor concentraciones de estos elementos, a excepción de julio del 2016 en donde las concentraciones disminuyeron y produjeron un quiebre en la tendencia.

Al observar los valores del factor de enriquecimiento (Figura 6-16) vemos que a menores leyes de mercurio en las cabezas mayor es el factor y al aumentar la ley este factor decrece de manera exponencial, esto quiere decir que los concentrados se enriquecen mucho más de mercurio cuando las leyes son menores, este

comportamiento es similar a lo observado en el arsénico (Martínez, 2013) que también se encuentra alojado en las sulfosales.

En este mismo gráfico también se aprecia dos líneas de tendencia, la de menores razones de enriquecimiento corresponde a muestras del año 2013 (a excepción de 2 puntos que corresponden a los meses de julio y agosto del 2016), y la de mayores razones de enriquecimiento corresponde a las producciones de enero 2014 a junio 2016.

No hay certeza de que exista un factor mineralógico y/u operativo correspondiente al control de las celdas de flotación o preparación de las muestras en las lecturas y se sugiere la realización de estudios con mayor detalle para definir la naturaleza de este cambio.

En las lecturas QEMSCAN de las briquetas realizadas para muestras de los compuestos mensuales arrojan que existe una buena correlación entre el contenido de tetraedrita (el extremo rico en antimonio de la solución sólida) y el contenido de mercurio, lo que se aprecia en la Figura 6-17.

7.3 Ocurrencia mineralógica del mercurio

De las muestras seleccionadas para realizar descripción petrográfica se puede mencionar que estas son representativas de la población de datos ICP-MS disponible, ya que abarcan desde las leyes más bajas hasta las más altas (con énfasis en las últimas) y se distribuyen de manera amplia por el yacimiento sin mostrar sectores con mayor densidad de muestras escogidas.

En los cortes se apreció que el estilo de mineralización de la serie tennantita-tetraedrita es por reemplazo, tanto en bordes como en debilidades y que al aumentar el contenido de mercurio el reemplazo llega a ser completo y se podían observar partículas individuales de estas sulfosales con vestigios de calcopirita, Esto se correlaciona con lo observado en las razones de enriquecimiento, ya que a mayores leyes de mercurio y por ende mayores contenido de tennantita-tetraedrita, el reemplazo es mayor por lo que en las celdas de flotación estas partículas decantan, en cambio cuando los contenidos son menores y solo están reemplazando bordes o debilidades, la partícula por tener mayor contenido de calcopirita flota y por ende el concentrado aumenta su contenido de mercurio.

En cuanto a la pirita observada en los cortes esta se encuentra mayormente diseminada y no en contacto con calcopirita, por lo que en los procesos de flotación estas partículas decantan y no flotan.

En algunos de los cortes descritos no se observó la presencia de tennantita-tetraedrita, en contraste de los análisis mineralógicos QEMSCAN en donde se reporta la existencia de sulfosales, esto deja en evidencia que en algunas ocasiones la muestra que se elige para construir el corte transparente/pulido no es completamente representativa de la zona descrita y de la cual se realizan lecturas. Esto se puede deber a que como el reemplazo es a pequeña escala, no se logra apreciar de manera

macroscópica por lo que se genera un sesgo al momento de describir un sondaje desde donde se extrae la muestra.

Los contenidos reportados en los análisis mediante SEM de mercurio son bajos, mostrando un máximo de 1,32% (porcentaje en peso), considerando que el límite de detección es de 0,1% (porcentaje en peso), se aprecia de manera difusa la distribución de mercurio y siempre con rangos de errores relativamente altos.

Debido a lo anterior, a pesar de encontrar mercurio en tennantita-tetraedrita y considerando que existen reportes con contenidos menores a 1000 ppm, no se puede descartar la presencia de este elemento en otras fases minerales, tales como otros sulfuros (Sladek *et al.*, 2002). Algunos autores han reportado la presencia de mercurio en piritas de hasta un 7% (porcentaje en peso) (LeFort *et al.*, 2011) o también como inclusiones de cinabrio, a niveles traza, en piritas ricas en arsénico (Deditius y Reich, 2016) o también como sustitución en esfalerita (Rytuba, 2003). Otros estudios sugieren también la presencia de mercurio en sulfatos y clorita (Aftabi y Azzaria 1983).

Por lo que se sugiere realizar análisis con técnicas que permitan tener una mejor precisión en la lectura de este elemento y con límites de detección menor, tales como la microsonda o LA-ICP-MS, para poder identificar otras fases minerales portadores de mercurio, como también si en todas las partículas de tennantita-tetraedrita hay presencia de mercurio o solo en algunas, como es lo observado en la distribución de la plata (Martínez, 2012.; Suazo, 2014).

Las bandas energéticas del mercurio son altas (bandas M) por lo que la configuración al momento de realizar la lectura es importante. Los valores recomendados para realizar análisis en SEM son un voltaje de excitación de 25 kV y un P.C (*probe current*) de 60 μ A.

En las lecturas EDS se puede observar que el antimonio se encuentra diseminado y pocas veces se encuentra mayormente concentrado, esto ya que como la serie es una solución sólida, pocas veces tenemos el extremo rico en antimonio (tetraedrita) o el extremo rico en arsénico (tennantita) por si solas, generalmente se encuentran estados intermedios o ambas minerales pero en contacto.

En algunas de las lecturas se puede observar que el mercurio se encuentra diseminado en la calcopirita, esto se puede deber a que existen reemplazos en menor escala que no se observan en el microscopio.

En las lecturas realizadas no se encontró mercurio en pirita, como se observa en la Figura 6-28, el mapa de distribución tanto de antimonio como de mercurio rodean al grano de mineral de pirita que se encuentra en el centro de una partícula de tennantita, tetraedrita y esfalerita.

7.4 Distribución de mercurio

Dada la baja cantidad de muestras con análisis ICP-MS, no fue posible analizar la presencia de anisotropías en la distribución del mercurio, como tampoco la influencia

de la litología o la alteración, por lo que solo se pudo realizar un variograma experimental omnidireccional, en el cual se escogió un paso en el que el comportamiento del variograma fuera lo más estable posible. Por lo que se sugiere realizar más lecturas para ampliar la batería de datos o utilizar al antimonio como co-variable para realizar estimación mediante co-kriging y mejorar la precisión de la estimación.

Los sectores alejados de la zona con mayor densidad de muestreo se estimaron con elipsoides de gran tamaño y tomando valores menores a 300 ppb, de manera de tener una estimación más conservadora.

Según bibliografía (Martínez 2013 y Suazo 2014) las sulfosales poseen dos controles, uno estructural, en el sector Don Luis sigue una dirección de preferencia de N30°E y en el sector Río Blanco sigue una dirección de preferencia de N70°E, y uno de alteración, en la cual la alteración de tipo cuarzo-sericita controla la precipitación de sulfosales. En el caso del presente trabajo solo se utilizó como referencia el control estructural del sector Don Luis, esto debido a que la mayor parte de las muestras se encuentran alojadas en este lugar, por lo que para un mejoramiento en el modelo se sugiere emplear las dos direcciones de preferencia junto con la alteración.

Al comparar los resultados del modelo de bloques con las muestras analizadas mediante ICP-MS, podemos observar que poseen la misma distribución (log-normal), poseen promedios muy similares, 115 ppb para las muestras de ICP-MS y 125 ppb para el modelo de bloque, también tienen similares valores para los cuartiles, 13 ppb y 96 ppb para el primer y tercer cuartil de los datos ICP-MS y 42 ppb y 85 ppb para el modelo de bloques. Por lo que se aprueba el modelo pero al igual que en la variografía se sugiere aumentar el número de datos.

Dado que la mayor densidad de datos se encuentra en el sector Don Luis se considera que en este lugar la estimación es más exacta, por lo que se sugiere solo tomar como referencia la estimación para el sector Río Blanco.

8 CONCLUSIÓN

Los análisis químicos y mineralógicos presentados en esta memoria indican que el mercurio se encuentra alojado como impureza en las sulfosales o serie de los 'cobres grises', más específicamente en la solución sólida de tennantita (extremo con arsénico) y tetraedrita (extremo con antimonio). En la estructura este elemento se encuentra probablemente como Hg^{2+} reemplazando al Cu^{2+} (Olmsted *et al.*, 1985).

En el yacimiento, las sulfosales se encuentran reemplazando a los sulfuros de cobre (calcopirita y bornita) y dicho reemplazo se observa tanto en bordes como en planos de debilidades de los granos de mineral. En zonas con alta presencia de tennantita-tetraedrita se pueden observar granos diseminados, los cuales corresponden a un reemplazo completo de los sulfuros de cobre. No se logró identificar una especie mineralógica de mercurio, además no se descarta que este elemento se encuentre como impureza en otros sulfuros como por ejemplo la pirita, dado el alto límite de detección del microscopio electrónico de barrido en comparación a las concentraciones detectadas mediante ICP-MS.

Existe una buena correlación entre el mercurio y el antimonio presente en el yacimiento, con índices de correlación de 0,93 en el mineral de alimentación de la planta y de 0,84 en el producto de la planta (concentrado de cobre), por lo que la fase portadora de estos dos elementos es la misma, vale decir, la serie tennantita-tetraedrita.

El estilo de mineralización de estas sulfosales es determinante en los procesos de flotación de cobre, debido a que los parámetros operativos de las celdas de flotación en la planta concentradora de la División Andina están calibrados para recuperar la calcopirita (y en menor medida bornita). Por consiguiente al encontrarse en menores cantidades y solo reemplazando parcialmente los bordes, las sulfosales flotan y se concentran y por consiguiente aumentando los niveles de mercurio en los concentrados de cobre. Es por esto que las razones de enriquecimiento son tan altas para valores bajos de leyes de mercurio en el material que ingresa a la planta.

Según el modelo de mercurio realizado, se identificaron dos zonas con altas leyes (sobre 1 ppm), de importante tamaño y elongados hacia la dirección N30°E y que se ubican en el extremo norte del sector Don Luis, una de ellas en la pared nor-este y otra en el fondo de la actual topografía de la mina rajo. Pero es necesario aumentar el número de datos para mejorar la confiabilidad de la estimación.

9 BIBLIOGRAFÍA

- AFTABI, A. y AZZARIA, L.M. 1983. Distribution of mercury compounds in ore and host rocks at sigma gold mine val d'or, Quebec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 19: p. 447-464.
- AGUIRRE, L. 1960. Geología de los Andes de Chile Central, Provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile. Boletín n°9: 70p.
- BERTENS, A. Y SOLÉ, M.; 2013. Informe de cierre, Programa de Estudio Geocronológico U/Pb, Ar/Ar, Re/Os. Yacimiento Río Blanco. Informe interno, División Andina. Codelco-Chile.
- BUSTAMANTE, M.; SILVA, C.; VIVALLOS, J.; CORTÉS, R.; PINCHEIRA, W.; ORTIZ, M.; CÁCERES, D. y WALL, R. Exploración geológica para el fomento de la energía geotérmica: Área Termas del Plomo, Región Metropolitana de Santiago [informe inédito]. Santiago: SERNAGEOMIN, 2010.
- CHARRIER, R.; BAEZA, O.; ELGUETA, S.; FLYNN, J.J.; GANA, P.; KAY, S.M.; MUÑOZ, N.; WYSS, A.R. y ZURITA, E. 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 15: p. 117-139.
- CHARRIER, R.; WYSS, J.; FLYNN, C.; SWISHER III., NORELL, F.; ZAPATTA; MCKENNA y NOVACEK. 1996. New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35°s), central Chile. *Journal of South American Earth Science*, Vol. 9(5-6): p. 393-422.
- CORTE, G.L. y DUBOIS, L. 1975. Determination of trace amounts of mercury in rock samples. *Mikrochimica Acta*, Vol. 1: p. 69-77.
- DEDITIUS, A. y REICH, M. 2016. Constraints on the solid solubility of Hg, Tl, and Cd in arsenian pyrite. *American Mineralogist*. Vol. 101, in press.
- FOCK, A. 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S. Memoria de Magíster en Ciencias, Mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago.
- FRIKKEN, P. 2003. Breccia-hosted copper-molybdenum mineralisation at Rio Blanco, Chile. Tesis de doctorado. University of Tasmania (Inédito): 290 p., Tasmania
- GONZALEZ, O. 1963. Observaciones geológicas en el valle del rio Volcán. *Minerales*, Vol. 18, n°81: p. 20-61.
- HALL, G.E.M. y PELCHAT, P. 2005. The design and application of sequential extractions for mercury, part 2. Reabsorption of mercury into the sample during leaching. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 5: p. 115-121.

- HALLAM, A., BIRÓ-BAGÓZKY, L. y PEREZ, E., 1986. Facies analysis of the Lo Valdés Formation (Tithonian-Hauterivian) of the High Cordillera of central Chile, and the paleogeographic of the Andean Basin. *Geological Magazine*, Vol. 123: p. 425-435.
- KLOHN, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó, Instituto de investigaciones geológicas, Chile. Boletín n°8: 95 p.
- LEFORT, D., HANLEY, J., y GUILLONG, M. 2011. Subepithermal Au-Pd Mineralization Associated with an Alkalic Porphyry Cu-Au Deposit, Mount Milligan, Quesnel Terrane, British Columbia, Canada. *Economic Geology*. Vol. 106: p. 781-808.
- LEYBOURNE, M.; BLOOM, L. y COUGHLIN, B. 2016. hg in rocks, soils and sediments: speciation and implications for sample processing and analysis. *Explore*. Vol. 17: Canada.
- MAKSAEV, V. 2001. Reseña metalogénica de Chile y de los procesos que determinan la metalogénesis andina. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- MARÍN, F. 2016. Influencia del estilo de mineralización en la recuperación de cobre en el bloque piloto Don Luis, yacimiento río blanco, región de Valparaíso, Chile. Tesis para optar al grado de geólogo. Universidad de Concepción (Inédito): 95 p., Concepción.
- MARTÍNEZ C., BUSTOS C., CRUZ J. y CUADRA C. 2012. Estudio de los contenidos de plata (Ag) en el yacimiento Río Blanco y su proyección en la extracción de mineral período 2012-2035 PND 2011. Informe Interno GRMD-SGEO-010-2012.
- MARTÍNEZ, C. 2013. Caracterización mineralógica, química y dominios minerales asociados al arsénico, Yacimiento Río Blanco, División Andina, CODELCO-Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Mineralogía Aplicada, mención Geometalurgia. Universidad de Concepción (Inédito): 152 p., Concepción.
- MARTINEZ, R. y OSORIO, R. 1963. Consideración preliminar sobre la presencia de carofitas fósiles en la Formación Colimapu. *Minerales*, Vol. 18, N°82: p. 26-43.
- PATTRICK, R. y HALL, A. 1983. Silver substitution into synthetic zinc, cadmium and iron tetrahedrites. *Mineralogical Magazine*. Vol. 47: p. 441-451.
- OLMSTED, R. y LOUCKS, R. 1985. Thermodynamic properties of tetrahedrite-tennantites: constraints on the interdependence of the Ag-Cu, Fe-Zn, Cu-Fe, and As-Sb exchange reactions. *American Mineralogist*. Vol. 70: p. 1270-1289.
- RENNEBERG, A.J. y DUDAS, M.J. 2001. Transformations of elemental mercury to inorganic and organic forms in mercury and hydrocarbon co-contaminated soils. *Chemosphere*, Vol. 45: p. 1103-1109.

- RIVANO, S. 1995. Notas para Carta Geológica de Chile, Hojas Quillota y Portillo, regiones de Valparaíso y Coquimbo, V Región. Servicio Nacional de Geología de Chile. *Carta Geológica de Chile*. N° 73: 1-202.
- RIVANO, S.; GODOY, E.; VERGARA, M. y VILLARROEL, R. 1990. Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de los Andes de Chile Central (32-34°S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. 17, (2): p. 205-214. Santiago.
- RIVANO, S.; SEPÚLVEDA, S.; HERVÉ, F. y PUIG, A. 1985. Geocronología K/Ar de las Rocas Intrusivas entre los 31°-32° latitud sur, Chile. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 24: p. 63-74. Santiago.
- RYTUBA, J.J. 2003. Mercury from mineral deposits and potential environmental impact. *Environmental Geology*, Vol. 43: p. 326-338.
- SERRANO, L.; VARGAS, R.; STAMBUK, V.; AGUILAR, C.; GALEB, M.; HOLMGREN, C.; CONTRERAS, A.; GODOY, S.; VELA, I.; SKEWES, A.M. y STERN, C. R. 1996. The late Miocene to early Pliocene Río Blanco-Los Bronces copper deposit, central Chilean Andes. *Society of Economic Geologists, Special Publication*. Vol. 5: p. 119-130.
- SKEWES, M. A. y HOLMGREN, C. 1993. Solevantamiento andino, erosión y emplazamiento de brechas mineralizadas en el depósito de cobre porfídico Los Bronces, Chile central (33°S): aplicación de geotermometría de inclusiones fluidas. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 20, (1): p. 71-83. Santiago.
- SKEWES, M. A. y STERN, C. R. 1995. Genesis of the giant late Miocene to Pliocene copper deposits of central Chile in the context of Andean magmatic and tectonic evolution. *International Geology Review*. Vol. 37, (10): p. 893-909.
- SLADEK, C., GUSTIN, M.S., KIM, C.S., y BIESTER, H. 2002. Application of three methods for determining mercury speciation in mine waste. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 2: p. 369-376.
- STAMBUK, V.; SERRANO, L. y VARGAS, R. 1985. Geología del sector Sur-Sur, yacimiento Río Blanco. Congreso Geológico Chileno N°4. Actas 2: p. 383-404. Antofagasta
- SOLÉ, M.; DÍAZ, C.; TAPIA, C. y RODRÍGUEZ, J. 2014. Modelamiento geológico integrado del sector comprendido entre las secciones XC-055 a XC-455: sectores Río Blanco-Don Luis, Yacimiento Río Blanco. CODELCO Chile, División Andina. Informe inédito: 71 p. Los Andes.
- SUAZO, H. 2010. Procedimiento para la descripción general de muestras petrocalcográficas. CODELCO Chile, División Andina. Informe inédito: 58 p. Los Andes.

- SUAZO, H. 2014. Ocurrencia y asociación mineralógica de la plata presente en los concentrados finales de cobre de División Andina, yacimiento Río Blanco, CODELCO-Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Mineralogía Aplicada a la Geometalurgia. Universidad de Concepción (Inédito): 87 p., Concepción
- THIELE, R. 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. Instituto de Investigaciones Geológicas. *Carta Geológica de Chile*. N°39: p. 1-51. Santiago.
- TORO, J. C.; ORTÚZAR, J.; ZAMORANO, J.; CUADRA, P.; HERMOSILLA, J. y SPRÖHNLE, C. 2012. Protracted magmatic-hydrothermal history of the Río Blanco-Los Bronces district, Central Chile: development of world's greatest known concentration of copper. *Society of Economic Geologists, Special Publication*. Vol. 16: p. 105-126.
- WARNAARS, F. W.; HOLMGREN, C. D. y BARASSI, S. 1985. Porphyry copper and tourmaline breccias at Río Blanco-Los Bronces, Chile. *Economic Geology*. Vol. 80, (6): p. 1.544-1.565.

10 ANEXO A

Tabla Anexo 1 Resumen análisis SEM para las 12 partículas con presencia de mercurio.

Partícula	Lectura	Elementos						
		Fe	Cu	Zn	As	S	Sb	Hg
1	Concentración Aparente	10.29	54.86	7.7	12.57	61.48	0.4	0.33
	k Ratio	0.10286	0.54861	0.07697	0.06681	0.61478	0.00405	0.00298
	Wt%	5.16	27.85	3.84	11.56	51.05	0.33	0.21
	Wt% Sigma	0.04	0.11	0.06	0.12	0.16	0.05	0.15
2	Concentración Aparente	38.02	40.45	-	1.63	71.97	0.42	0.95
	k Ratio	0.38022	0.40448	-	0.00866	0.71971	0.00421	0.00862
	Wt%	20	21.87	-	1.58	55.63	0.35	0.57
	Wt% Sigma	0.09	0.1	-	0.08	0.16	0.05	0.15
3	Concentración Aparente	11.31	40.49	5.33	8.4	56.38	2.53	0.73
	k Ratio	0.11305	0.40487	0.05333	0.04465	0.56381	0.02533	0.00662
	Wt%	6.81	24.47	3.16	9.01	53.54	2.47	0.54
	Wt% Sigma	0.07	0.16	0.08	0.17	0.25	0.09	0.23
4	Concentración Aparente	3.78	54.72	15.74	12.14	56.64	2.79	0.5
	k Ratio	0.03781	0.54725	0.15736	0.06453	0.56635	0.02794	0.00455
	Wt%	1.9	27.74	7.84	11.64	48.27	2.28	0.34
	Wt% Sigma	0.05	0.19	0.12	0.2	0.27	0.1	0.24
5	Concentración Aparente	9.91	57.52	8.65	9.86	53.81	2.21	0.69
	k Ratio	0.09908	0.57519	0.08654	0.05239	0.53809	0.02209	0.00626
	Wt%	5.18	30.6	4.52	10.02	47.34	1.86	0.48
	Wt% Sigma	0.09	0.24	0.13	0.23	0.33	0.11	0.29
6	Concentración Aparente	21.82	59.56	4.71	5.86	62.69	0.3	0.25
	k Ratio	0.21822	0.59558	0.04706	0.03117	0.6269	0.00302	0.0023
	Wt%	10.84	30.41	2.36	5.75	50.25	0.24	0.16
	Wt% Sigma	0.06	0.12	0.05	0.1	0.16	0.05	0.14
7	Concentración Aparente	2.86	58.3	11.49	14.22	54.13	2.33	0.47
	k Ratio	0.02865	0.58303	0.11488	0.07559	0.54131	0.02335	0.00428
	Wt%	1.45	29.79	5.77	13.57	47.18	1.92	0.32
	Wt% Sigma	0.04	0.15	0.08	0.16	0.21	0.07	0.18
8	Concentración Aparente	67.33	17.66	-	1.63	31.55	0.23	1.52
	k Ratio	0.67327	0.17663	-	0.00865	0.31554	0.00235	0.01376
	Wt%	47.46	13.64	-	2.37	34.97	0.24	1.32
	Wt% Sigma	0.22	0.12	-	0.16	0.23	0.08	0.22

Tabla Anexo 2 Resumen análisis SEM para las 12 partículas con presencia de mercurio (continuación).

Partícula	Lectura	Elementos						
		Fe	Cu	Zn	As	S	Sb	Hg
10	Concentración Aparente	7.95	55.66	3.25	12	27.43	0.29	0.46
	k Ratio	0.07946	0.5566	0.0325	0.0637	0.2363	0.0028	0.00415
	Wt%	5.47	41.58	2.4	16.45	33.34	0.3	0.46
	Wt% Sigma	0.04	0.13	0.05	0.13	0.11	0.05	0.18
11	Concentración Aparente	18.4	31.53	7.9	3.58	59.54	1.8	1.05
	k Ratio	0.18402	0.3153	0.0790	0.0190	0.5954	0.0180	0.0095
	Wt%	11.65	20.14	4.94	4.1	56.55	1.85	0.78
	Wt% Sigma	0.07	0.1	0.07	0.11	0.18	0.07	0.17
9	Concentración Aparente	6.19	48.21	10.21	10.86	50.44	0.42	0.49
	k Ratio	0.06195	0.4821	0.1021	0.0577	0.5044	0.0042	0.00446
	Wt%	3.6	28.38	5.91	11.87	49.46	0.4	0.38
	Wt% Sigma	0.09	0.27	0.15	0.28	0.39	0.12	0.34
12	Concentración Aparente	3.56	48.67	8.64	9.81	58.65	7.56	1.11
	k Ratio	0.03557	0.4867	0.0864	0.0521	0.5864	0.0756	0.01007
	Wt%	1.92	26.03	4.53	9.59	50.67	6.51	0.75
	Wt% Sigma	0.02	0.09	0.05	0.09	0.13	0.06	0.12

Tabla Anexo 3 Resumen descripción litológica de cortes transparentes-pulidos

ID Muestra	HG ppb	LITOLOGÍA										
		Litología	BRECHAS									
			Clasto Dom	% Clasto Dom	Clasto Subord	%Clasto Suboord	Otros Clastos	%Clastos	Lito Matriz	%Matriz	Total	
M-4707	525	BT	GDCC	95						turmalina	5	
M-4456	878	GDRB										
M-4300	1029	PDL										
M-4707	525	BT	GDCC	95						turmalina	5	100
M-4481	1249	BT	GDCC	95					95	turmalina	5	
M-4435	182	GDRB										
M-3845	644	GDRB										
M-3841	840	GDRB										
M-4534	1467	PDL										
M-3880	353	BXPR Tardía	GDRB	70						polvo roca	30	100
M-3876	1319	GDRB										0
M-3875	50000	BT	GDRB	96						turmalina	4	100
M-4298	89	BXPR Tardía	GDRB	60						polvo roca	40	
M-3870	689	BT	GDCC	95						turmalina	5	100
M-4363	338	GDCC										
M-4321	390	GDCc										0
M-3893	756	GDRB										0
M-4424	706	GDRB										0
M-4418	12744	GDRB										0
M-3902	52	BXPR Tardía	GDRB	50	Aplita	20				polvo roca	30	100
M-4498	69	BXP										
M-3898	928	BXPR Tardía	GIND	50						polvo roca	50	
M-3918	223	BXT	GDRB	70						turmalina	30	
M-3948	38	BXT	GDCC	60						biotita	40	
M-4272	11	BXT	gdcc	65						turmalina	35	
M-4715	574	BXT	GDCC	85						turmalina	15	100
M-4306	418	BXT	PDL	35				INDF	30	Turmalina/taoba	35	100
M-4264	14	GDCC										
M-3852	858	GDRB										0
M-3859	716	GDRB										0
M-3860	156	GDRB										0
M-3879	555	GDRB										0
M-3885	8174	GDRB										0
M-4278	319	GDRB										
M-4301	317	GDRB										

Tabla Anexo 4 Resumen descripción litológica de cortes transparentes-pulidos (continuación)

ID Muestra	HG ppb	LITOLOGÍA										
		Litología	BRECHAS									Total
			Clasto Dom	% Clasto Dom	Clasto Subord	%Clasto Suboord	Otros Clastos	%Clastos	Lito Matriz	%Matriz		
M-4409	640	GDRB										
M-4414	235	GDRB										
M-4417	430	GDRB										
M-4454	626	GDRB										
M-4464	9	GDRB										
M-4469	418	GDRB										
M-4470	14	GDRB										
M-4554	13	GDRB										
M-4703	8	GDRB										

Tabla Anexo 5 Descripción de sulfuros presentes en los cortes transparentes-pulidos

ID Muestra	Alteración Controladora de la Mena	Opacos	Sulfuros (% base opacos)														
	Alteración		Total Opacos	py	cpy	bo	cc	cv	dg	ten	en	lz	tet	esf	gal	apy	mo
M-4707	Sericita GV	5	18	65						10				1	1		
M-4456	Cuarzo sericita	2	50	18	2					20							
M-4300	cuarzo sericita	3	35	45						10							
M-4707	Cuarzo Sericita	4.5	24	65						5							
M-4481	Cuarzo Sericita	3.5	25	60						5							
M-4435	Sericita GV	3	25	60						5					1		
M-3845	Sericita GV	3		80						4							1
M-3841	Sericita GV	1.5		30	60					6							
M-4534	Cuarzo Sericita	1.5	50	35						5	5						
M-3880	Sericita G	2.5	45	35						3							1
M-3876	Sericita GV	2.4		80	8					3							1
M-3875	Sericita GV	3	2	40	48					2	1						
M-4298	Cuarzo Sericita	3	15	70	4					2							
M-3870	Sericita GV	2.5	20	68						2							5
M-4363	Sericita GV	2.5	10	80						2							
M-4321	sericita GV	4.5	45	40						1							
M-3893	Sericita GV	3		60	29					1							
M-4424	Sericita GV	3	30	60						1							0.5
M-4418	Sericita GV	2	10	80						1							
M-3902	Cuarzo sericita	2.5	20	54.5						0.5							
M-4498	Cuarzo Sericita	2.4	65	29													1
M-3898	Cuarzo Sericita	2.5	65	25		2											
M-3918	sericita GV	4	40	55													
M-3948	Cuarzo Sericita	6	80	10		2	1										
M-4272	Cuarzo Sericita	4	20	75													0.5
M-4715	Sericita GV	3.1	25	60													
M-4306	cuarzo sericita	4.5	78	10													2
M-4264	sericita GV	2	20	60													0.5
M-3852	Sericita GV	3.2		70	20												
M-3859	Cuarzo Sericita	2.5	75	20	0												
M-3860	Cuarzo Sericita	3	75	20													
M-3879	Cuarzo Sericita	1.8	75	20													
M-3885	Sericita GV	3.5	5	60													
M-4278	Sericita GV	20	15	35													
M-4301	Sericita GV	3	25	65													
M-4316	Sericita GV	4		80													
M-4409	Cuarzo Sericita	2	60	25	1						1	0					0.3

Tabla Anexo 6 Descripción de sulfuros presentes en los cortes transparentes-pulidos (continuación)

ID Muestra	Alteración Controladora de la Mena	Opacos	Sulfuros (% base opacos)													
	Alteración	Total Opacos	py	cpy	bo	cc	cv	dg	ten	en	lz	tet	esf	gal	apy	mo
M-4414	Sericita GV	1.6		40												
M-4417	Sericita GV	2.2	40	50												
M-4454	Cuarzo Sericita	3.2	60	20												
M-4464	Sericita GV	3.2		60	5											
M-4469	Cuarzo Sericita	3.4	55	35												
M-4470	Cuarzo Sericita	4.5	80	15												
M-4554	Cuarzo Sericita	2.5	50	38												
M-4703	Cuarzo Sericita	3.2	55	20												

Tabla Anexo 7 Descripción de relación textural de la mena principal y la serie tennantita-tetrahedrita presente en los cortes transparentes-pulidos

ID Muestra	Ocurr. Mena ppal	Ocurr. Sulfosales	relación textural sulfosales-mena								
			Mineral	textura	%	Mineral	textura	%	Mineral	textura	%
M-4707	Diseminado	Reemplazo	CPY	RBO	80	CPY	TBM	10	PY	TBM	10
M-4456	Reemplazo	Diseminado	CPY	TBM	70	CPY	SCE	25	CPY	RBO	25
M-4300	Diseminado	Reemplazo	CPY	RBO	100						
M-4707	Diseminado	Reemplazo	CPY	RBO	100						
M-4481	Diseminado	Diseminado	CPY	TBM	90	CPY	INCM	10			
M-4435	Diseminado	Vetillas	CPY	TBM	100						
M-3845	Diseminado	Reemplazo	CPY	RBO	90	CPY	RDIS	10			
M-3841	Diseminado	Diseminado	CPY	TBM	100						
M-4534	Diseminado	Reemplazo	CPY	RDIS	100						
M-3880	Diseminado	Reemplazo	CPY	RBO	90	PY	TBM	10			
M-3876	Diseminado	Reemplazo	BO	RBO	10	CPY	RBO	40		RDIS	50
M-3875	Diseminado	Reemplazo	BO	RBO	80	CPY	RBO	15	-	NA	5
M-4298	Diseminado	Diseminado	CPY	TBM	90	BO	TBM	10			
M-3870	Diseminado	Reemplazo	CPY	RBO	90	CPY	RDIS	10			
M-4363	Diseminado	Reemplazo	CPY	RBO	80	CPY	TBM	10			
M-4321	halo	Reemplazo	CPY	RBO	100						
M-3893	Vetillas	Reemplazo	CPY	RED	100						
M-4424	Diseminado	Reemplazo	CPY	RDIS	100						
M-4418	Diseminado	Reemplazo	CPY	RBO	100						
M-3902	Diseminado	Reemplazo	CPY	TBM	100						

Tabla Anexo 8 Descripción de relación textural de la mena principal y la pirita presente en los cortes transparentes-pulidos

ID Muestra	Ocurr. Pirita	relación textural pirita-mena					
		Mineral	textura	%	Mineral	textura	%
M-4707	Diseminado	CPY	TBM	40	CPY	INCG	20
M-4456	Vetillas	CPY	TBM	40		NA	60
M-4707	Diseminado	CPY	TBM	20	CPY	INCM	5
M-4481	Diseminado	CPY	TBM	30			
M-4534	Diseminado	CPY	TBM	30			
M-3880	Diseminado	CPY	TBM	20	CPY	INCM	2
M-3875	Diseminado	CPY	TBM	40			
M-4298	Diseminado	CPY	TBM	40	CPY	INCM	15
M-3870	Vetillas	CPY	TBM	20	CPY	INCG	5
M-4363	Diseminado	CPY	tbm	20			
M-4321	Vetillas	CPY	TBM	45	CPY	INCM	10
M-4424	Diseminado	CPY	TBM	35	CPY	MCG	10
M-4498	Diseminado	CPY	TBM	60	CPY	INCM	1
M-3918	diseminado	CPY	TBM	40	CPY	INCM	10
M-3948	Cemento de Brecha	CPY	TBM	10			
M-4272	Diseminado	CPY	TBM	30			
M-4715	Diseminado	CPY	TBM	35	CPY	INCM	4
M-4306	Diseminado	CPY	tbm	30			
M-4264	Diseminado	CPY	TBM	45	Mgt	TBM	15
M-3860	halo	CPY	TBM	30			
M-3879	Vetillas	CPY	TBM	50	CPY	INCM	3
M-3885	Diseminado	CPY	TBM	80	CPY	EXM	5
M-4301	Diseminado	CPY	TBM	35	CPY	SBX	15
M-4409	Diseminado	CPY	TBM	30	CPY	INCM	5
M-4417	Vetillas	CPY	TBM	40			
M-4454	Vetillas	CPY	RENV	20	CPY	TBM	10
M-4469	Diseminado	CPY	TBM	80	CPY	SCE	20
M-4470	Diseminado	CPY	TBM	10			
M-4554	Diseminado	CPY	TBM	30	HEM	TBM	5
M-4703	Diseminado	CPY	TBM	20			

Tabla Anexo 9 Abreviación utilizadas para las litologías

Litologías	Abreviación
Sobrecarga	SOB
Andesita	AND
Craquelado de Turmalina	BT
Brecha Anhidrita	BXANH
Brecha Biotita	BXB
Brecha chimenea dacítica	BXCHDAC
Brecha chimenea riolítica	BXCHRIOL
Brecha granodiorita	BXGDRB
Brecha hematita	BXHEM
Brecha pórfido	BXP
Brecha polvo roca tardía	BXPR Tardía
Brecha polvo roca temprana	BXPR Temprana
Brecha con clastos de feldespato-sílice	BXSK
Brecha de turmalina	BXT
Brecha de turmalina tobácea	BXTTO
Chimenea dacítica	CHDAC
Chimenea riolítica	CHRIOL
Diorita	DIOR
Granodiorita cascada	GDCC
Granodiorita Rio Blanco	GDRB
Pórfido Don Luis	PDL
Pórfido Feldespático	PFELD
Pórfido cuarzo-monzonítico	PQM

Tabla Anexo 10 Abreviación utilizada para las texturas de asociación de minerales

Tipo de Asoc. Ganga Metálica	Abreviación
Asociados en vetillas	AVET
Textura de entrecrecimiento	ENT
Exsolución de ganga en mena	EXG
Exsolución de mena en ganga	EXM
Inclusiones de ganga en mena	INCG
Inclusiones de mena en ganga	INCM
Mena en contornos de ganga	MCG
Textura de reemplazo en bordes	RBO
Textura de reemplazo diseminado	RDIS
Textura de reemplazo en debilidades	RED
Textura de reemplazo envolvente	RENV
Textura de sobrecrecimiento brechizado	SBX
Textura de sobrecrecimiento envolvente de mena	SCE
Textura de bordes mutuos	TBM
No asociado	NA

11 ANEXO B

11.1 Tecnología QEMSCAN

La tecnología QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscope”) combina la tecnología de microscopía electrónica, rayos X y análisis de imágenes de forma automatizada. Esta técnica ha sido ampliamente aplicada en la industria minera en la caracterización mineralógica de material particulado de composición variable, análisis de imágenes en determinaciones modales de especies minerales de mena y ganga, asociaciones mineralógicas y estudios de granulometría y grado de liberación para la Geometalurgia (Flores, 2006).

Su sistema instrumental está basado en un microscopio electrónico equipado hasta con 4 detectores EDS (Sistema Dispensor de Energía) de rayos X que miden la intensidad de la emisión BSE (Electrones retro dispersados) y el espectro de la energía dispersiva de rayos X, que resulta de la interacción entre un haz de electrones y una muestra (Figura Anexo 1). El equipo se encuentra conectado a un computador que controla el movimiento de las briquetas o muestras y el haz de electrones y que paralelamente obtiene, almacena, analiza y reporta la información captada por los equipos (Flores 2006).

Esta técnica microanalítica reporta parámetros tales como contenido, química, tamaño de grano, distribución, asociación y liberación son determinados de forma estadísticamente robusta, contrariamente a los métodos tradicionales manuales, tales como conteo de puntos o petrografía óptica, los cuales pueden ser más subjetivos y consumidores de tiempo (Figura Anexo 2).

Antes de realizar los análisis se debe realizar una validación de la identificación de minerales mediante análisis de muestras conocidas del yacimiento, en el caso de División Andina se construyó una librería tipo denominada SIP (Species Identification Profile) (Pooler y Belmar, 2008), con el objeto que la determinación de minerales metálicos, minerales formadores de roca y minerales de alteración sea confiable y reproducible.

11.1.1 Modos de lectura

El equipo permite realizar 4 tipos de lectura:

- 1) BMA (Bulk Mineralogical Analysis o análisis de minerales a granel-)

El BMA es un método rápido de lectura por líneas, usado para identificar el número y largo de las intersecciones con especies minerales en cada línea. La información puede posteriormente ser usada para determinar la abundancia modal, área de las partículas y fases minerales, asociaciones minerales y tamaños de granos minerales y partículas (SGS Minerals, 2011).

2) PMA (Particle Mineralogy Analysis o análisis de minerales en partículas-)

El haz recorre la briqueta para ubicar cada partícula en un mapa coordinado bidimensional. La superficie completa de cada partícula es recorrida en una grilla regular de espaciamiento pequeño. Este modo de lectura entrega información textural detallada de las fases minerales presentes y es particularmente útil para conducir análisis de liberación. Es usado para caracterización mineralógica detallada de partículas hasta 1mm. Una imagen de cada campo de observación, es analizada para determinar el perímetro de partícula y ubicación dentro de un mapa de la briqueta.

Posteriormente un análisis es realizado para cada partícula en una grilla regular de espaciamiento pequeño. El espaciamiento es definido para resolver adecuadamente la textura de cada fase presente en la partícula. La identificación mineral es realizada en cada punto usando el mismo procedimiento usado en BMA. Para un tiempo de medición similar, la exactitud de la composición modal entregada por PMA es inferior a BMA dada la cantidad menor de partículas analizadas, sin embargo, la información que entrega PMA, partícula por partícula es ideal para conducir análisis de liberación (SGS Minerals, 2011).

3) SMS (Specific Mineral Search o análisis de búsqueda de minerales específicos-)

Este análisis es idéntico al PMA, excepto que las imágenes son creadas solo para las fases que presentan una respuesta (brillo) BSE particular. Es usado para ubicar minerales específicos en muestras con bajas leyes. Aunque cada partícula podría ser caracterizada en detalle, el interés podría centrarse solo en aquellas partículas que contengan el o los minerales de interés. Una secuencia de campos es leído, registrándose la respuesta BSE en cada punto, para crear una imagen. La imagen es almacenada para lograr la ubicación espacial de cada partícula y específicamente para ubicar las que tengan una respuesta BSE superior a cierto valor (usado para discriminar entre tipos de minerales). Estas partículas así seleccionadas, son analizadas a espaciamientos menores (definidos por el usuario), para proveer un mapa mineral detallado de ellas. El resto de las partículas es ignorada. Este modo es usado para analizar especies presentes en concentraciones de 0.5% en volumen, o menores, La cantidad de partículas leídas dependerá de la concentración de la fase específica de interés. El SMS y el BMA son usualmente usados combinadamente para obtener información general y detallada (SGS Minerals, 2011).

4) TMS (Trace mineral search o análisis de búsqueda de trazas de minerales-)

Este modo de lectura es usado solo cuando la fase de interés está presente a nivel de trazas en la muestra. TMS es una función de hardware (mientras que SMS es de software), la cual, a través de un monitoreo continuo del brillo BSE y su comparación con un valor umbral, clasifica los campos en los que contienen o no contienen fases brillantes. Los campos que si contienen fases brillantes son analizados por SMS, mientras que los demás son ignorados. TMS puede entenderse como una versión superior de SMS, ya que identifica campos de interés mientras que SMS identifica partículas de interés. SMS es usado cuando existe una probabilidad razonable de que

un campo contendrá una partícula de interés. TMS ahorrará tiempo considerable dado que será usado cuando la mayoría de los campos se esperará que sean lastre o material estéril (SGS Minerals, 2011).

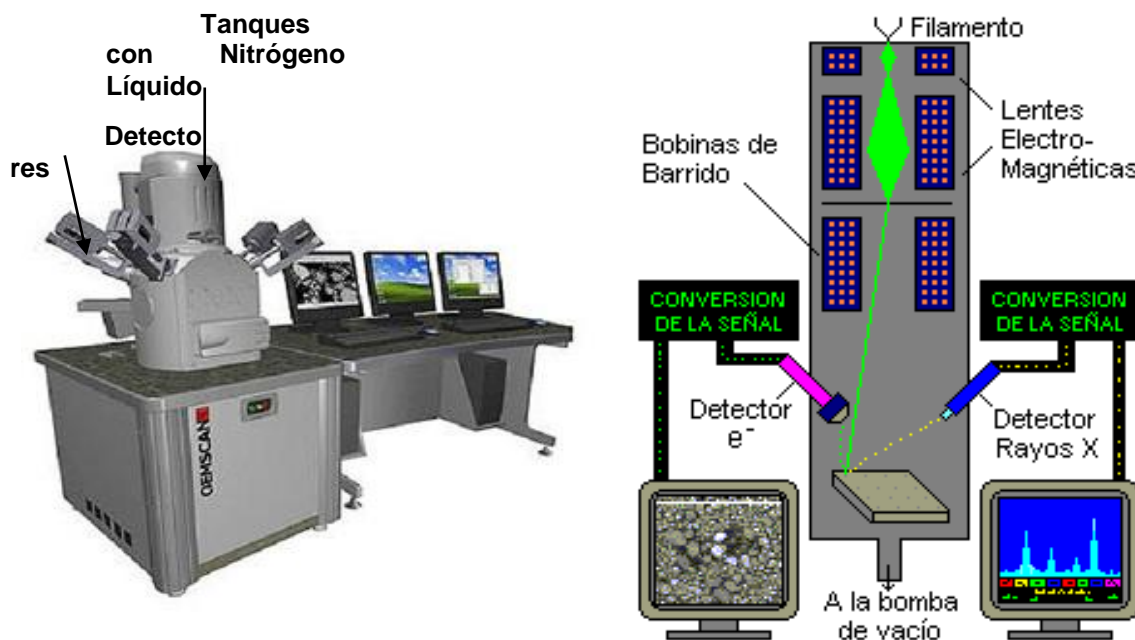


Figura Anexo 1 Equipo QEMSCAN y Esquema del principio. Los Qemscan son simples herramientas; la mineralogía de alta definición es el producto (<http://www.fei.com>).

How QEMSCAN™ Identifies Minerals

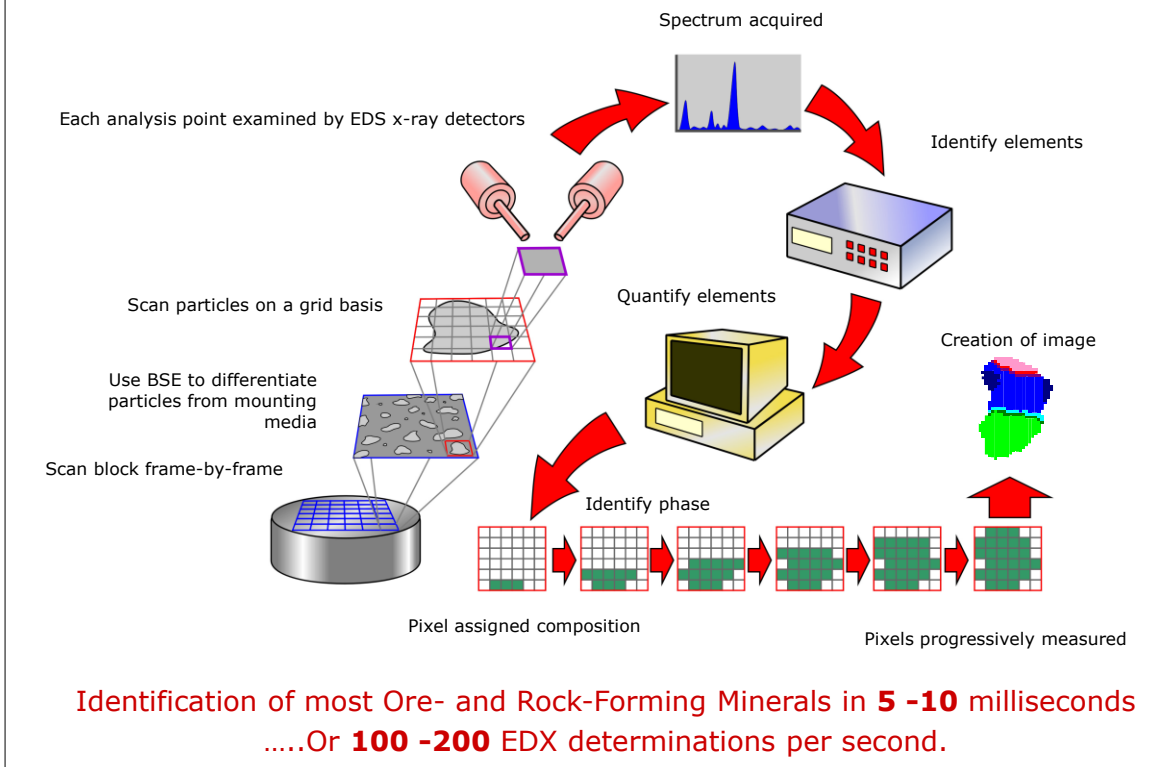


Figura Anexo 2 Flujograma para la tecnología Qemscan. Se muestra desde la lectura de la briqueta (scaneo) utilizando EDS (Sistema Dispersor de Energía) de rayos X para medir la intensidad de la emisión BSE (Electrones retro dispersados) obteniendo la imagen de la partícula siguiendo con la medición del espectro de la energía dispersiva de rayos X, identificación de los elementos, identificación del mineral y creación de la imagen con las fases (SGS Minerals, 2011).

11.2 Antecedentes teóricos del proceso de concentración

En División Andina se explotan sulfuros de cobre, siendo el mineral mayoritario la Calcopirita y en bastante menor proporción bornita, tennantita, enargita y covelina-Calcosina como mena de cobre. Por lo tanto el método de concentración es la flotación.

11.2.1 Flotación

La flotación es un método útil para separar físicamente minerales, basado en diferencias entre las propiedades superficiales del mineral de mena que se quiere recuperar y la ganga (Mendez et al, 2009). Se define como un proceso físico químico de tensión superficial que separa los minerales sulfurados del metal de interés, de otros minerales y especies que componen la mayor parte de la roca original (Codelco Educa, 2007).

Los principios básicos, en que se basa el proceso de flotación son (Castro, 2003):

- 1) Existencia de mineral hidrofóbico, que repele y desplaza agua de la superficie de sus partículas. Esto permite la acción de las burbujas de aire que se unen a las partículas.
- 2) Las burbujas de aire pueden mantener las partículas en la superficie de ellas, si se forma una espuma estable.

Estos principios están relacionadas con la mojabilidad de las partículas, es decir el comportamiento de los sólidos frente al agua: las partículas hidrofóbicas (aquellos que desplazan el agua de su superficie), se adhieren a las burbujas de aire para ser transportadas hasta la superficie de la celda de flotación (Figura Anexo 3 y Figura Anexo 4), siempre y cuando tengan la resistencia suficiente para soportar turbulencia y agitación. Una vez en superficie son recolectadas y recuperadas como concentrado. Mientras que las partículas hidrofílicas (mojables), no se adhieren a la burbuja, permanecen en la pulpa y constituyen las colas o relave.

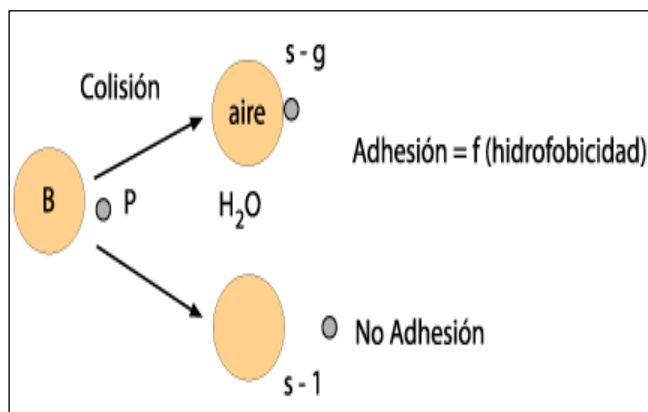


Figura Anexo 3 Esquema adhesión selectiva. Modificada de Castro (2003) B=burbuja; P=partícula; s-g=sólido-gas; s-l=sólido-líquido (Castro, S., García, J. 2003).

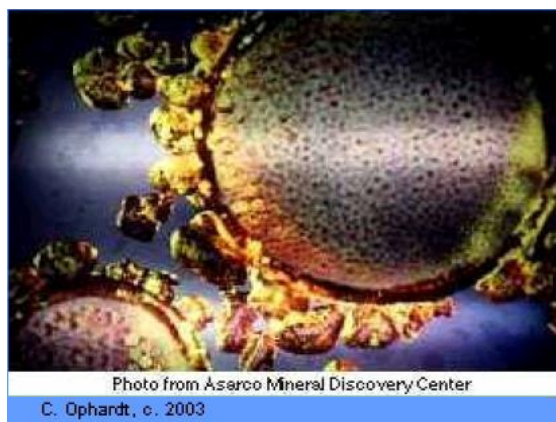


Figura Anexo 4 Figura 80. Burbuja de aire rodeada por los granos de calcopirita (extraído de Guerrero, N. 2010).

Para optimizar este proceso es necesaria la optimización de los procesos previos a la flotación, es decir, chancado, molienda, clasificación y acondicionamiento de las pulpas (Figura Anexo 5).

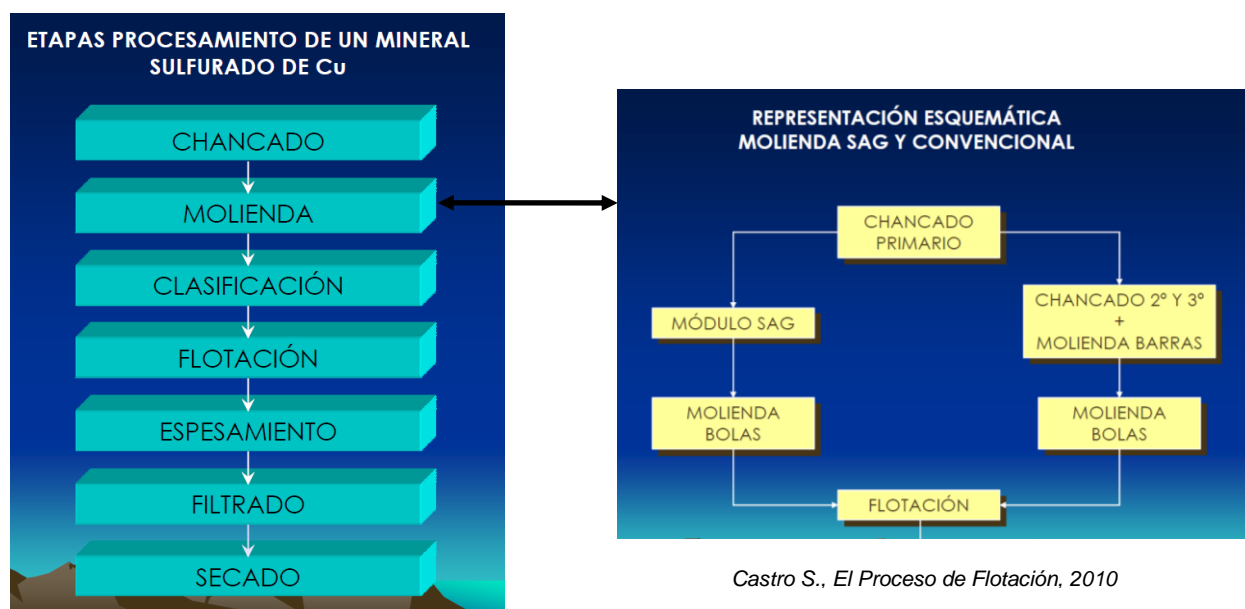


Figura Anexo 5: Esquema de etapas involucradas en el proceso de flotación de minerales sulfurados. En la etapa de molienda se muestra el esquema para un sistema SAG y Convencional (Castro, 2010).

En la etapa previa (molienda), se obtiene la roca finamente dividida y se le incorporan los reactivos para la flotación. El objetivo de estos reactivos es otorgarle a las partículas las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas, según corresponda ya que son pocas las partículas de especies minerales que poseen flotabilidad natural (molibdenita, grafito), por lo que es necesario invertir las propiedades superficiales de las partículas para poder flotarlas (Castro 2003; Codelco Educa, 2007). Estos agentes de flotación se

conocen como colectores, espumantes, depresores y modificadores (Castro, S., García, J. 2003). Sus acciones principales son:

- Hacer la superficie del mineral de interés, repelente al agua.
- Prevenir o evitar que otros minerales se hagan repelentes al agua.
- Formar una espuma razonablemente estable.

A continuación se define brevemente cada uno de estos reactivos:

- Colectores: reactivos químicos orgánico del tipo surfactante que se adsorbe selectivamente en la superficie del mineral y cuya función es favorecer la condición hidrofóbica de las partículas de sulfuro de cobre para que se puedan adherir a las burbujas de aire.
- Espumantes: reactivos que se adsorben selectivamente en la interfase gas-líquido y alteran la tensión superficial del líquido. El objetivo es la formación de burbujas resistentes para que se adhiera el mineral de interés, estabilizar la espuma, disminuir la tensión superficial del agua, mejorar la cinética de interacción burbuja-partícula y disminuir el fenómeno de unión entre dos burbujas (coalescencia).
- Depresantes: cumplen la función opuesta a los colectores con el fin de evitar que especies no deseadas (ganga) se concentren en el proceso.
- Modificadores: la función es crear condiciones favorables en la superficie de los minerales para el funcionamiento selectivo de los colectores. Estos reactivos pueden ser de tres tipos: modificadores de pH, activadores y depresores.
- Modificadores de pH: ácidos y bases (Ej.: HCl, NaOH, etc.). Estabilizan la acidez de la pulpa.
- Activadores: Son reactivos químicos orgánicos o inorgánicos que ayudan al colector a adsorberse en la superficie del mineral a flotar.
- Depresores: Son reactivos químicos orgánicos o inorgánicos que impiden la acción del colector en la superficie del mineral.

En la etapa previa de Molienda, al mineral se le incorporan los reactivos, anteriormente mencionados, necesarios para el proceso de flotación. Esto para obtener una pulpa homogénea que será sometida al proceso de flotación. Esta pulpa contiene aproximadamente 40 % de sólidos.

Una vez ingresada la pulpa a la celda de flotación, desde el fondo de ésta, se inyecta aire el que aparece como burbujas, además la pulpa es agitada con el fin de mantenerla en movimiento, con el objetivo de facilitar el contacto entre el mineral, el reactivo, el agua y las burbujas de aire, siendo estas últimas el medio de transporte de la mena. Las burbujas de aire arrastran las especies sulfuradas de cobre hasta la

superficie, rebasando el borde de la celda de flotación (Figura Anexo 6). El producto cae a una canaleta receptora y es enviada a la etapa siguiente.

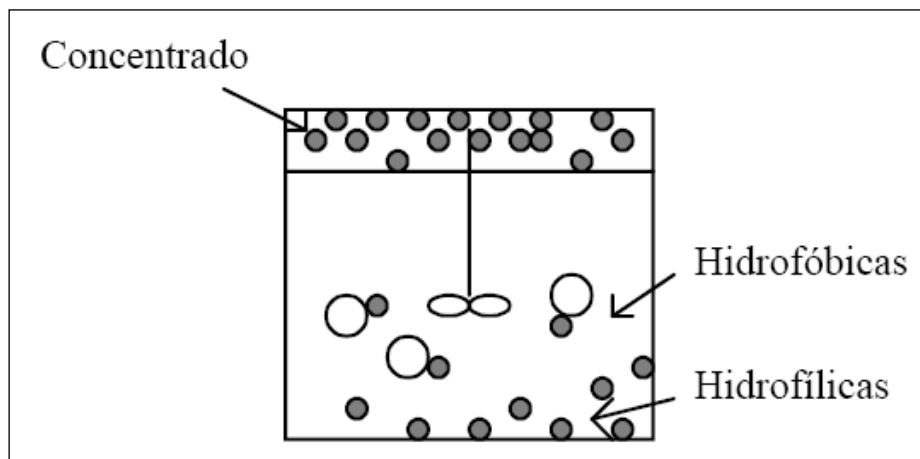


Figura Anexo 6. Esquema celda de flotación (Castro, S., García, J. 2003).

El proceso de flotación puede ser reiterado en varios ciclos, de manera que en cada uno de ellos se vaya produciendo un producto cada vez más concentrado. Esto es conocido como circuitos de flotación; de estos existen 2 tipos de circuitos:

- Recuperadores: con 2 tipos de circuitos denominados rougher (primario) y scavenger (barrido). El circuito rougher es la primera flotación después de la molienda y acondicionamiento del mineral y tiene como objetivo obtener la mayor recuperación metalúrgica posible. El circuito scavenger se alimenta de las colas del circuito anterior.
- Limpiadores: con 2 tipos de circuitos denominados cleaner y recleaner, ambos de limpieza, cuyo objetivo es aumentar la ley de los concentrados hasta obtener valores comerciales.

Adicionalmente, se puede realizar un segundo proceso de flotación, con el fin de recuperar el concentrado de otro metal de interés. El procedimiento es igual que el anterior, pero utilizando reactivos y acondicionadores de pH distintos, lo que permite obtener concentrados de dos metales de interés económico.

La primera flotación se denomina colectiva, donde el concentrado contiene dos o más componentes, y la segunda corresponde a la flotación selectiva, donde se efectúa una separación de compuestos complejos en productos que contengan no más de una especie individual. Un ejemplo de esto es la flotación de cobre y de molibdenita como es el caso de División Andina.

Para determinar si el proceso de flotación se está desarrollando de manera eficiente y satisfactoria, se lleva a cabo una evaluación metalúrgica. Los principales índices considerados para evaluar la operación de concentración son (Figura Anexo 7):

La recuperación (R) se define como la razón entre la masa del material útil (fino) obtenido en el concentrado y la masa del material útil de la alimentación.

$$R = \frac{C * c}{F * f} * 100 = \frac{c * (f - t)}{f * (c - t)} * 100$$

La razón de concentración (R_c) se define como el cociente entre la masa de alimentación y la masa de concentrado. En otras palabras son las toneladas de mineral necesarias de procesar para obtener una tonelada de concentrado.

$$R_c = \frac{F}{C} = \frac{(c - t)}{(f - t)}$$

La recuperación en peso (R_p) se define como la razón entre la masa total de concentrado y la masa total de alimentación.

$$R_p = \frac{C}{F} = \frac{(f - t)}{(c - t)}$$

La razón de enriquecimiento se define como el cociente entre la ley de concentrado y la ley de alimentación.

$$R_s = \frac{c}{f}$$

Leyenda

- f** = leycabeza
- t** = leycola
- c** = ley concentrado
- C** = masa de concentrado
- F** = masa de alimentación

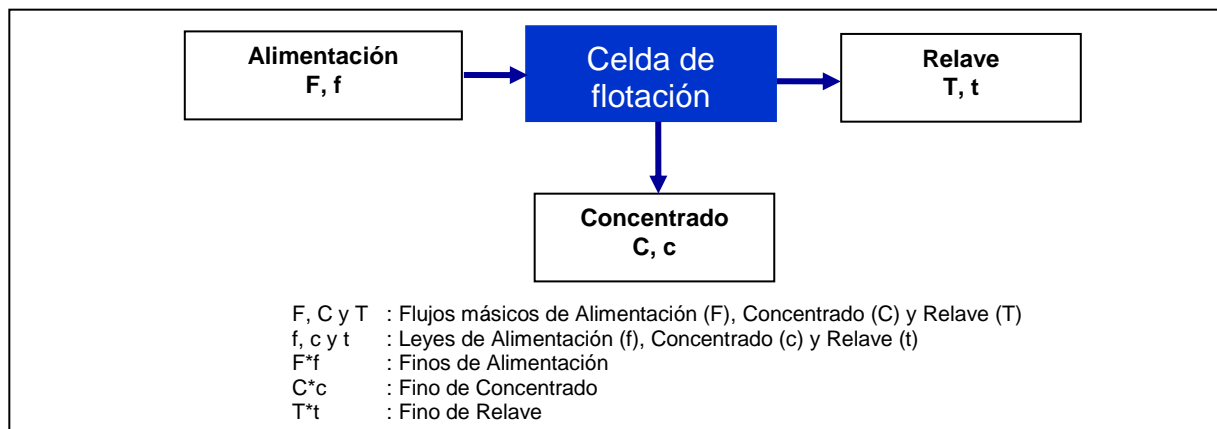


Figura Anexo 7. Parámetros considerados en una evaluación metalúrgica.