



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Geológica

**“Modelamiento mineralógico de sulfuros de cobre-hierro en pozos de tronadura en
mina Rajo Sur, División el Teniente.”**

Martín Elías Celis López
Profesor(a) guía: Jack Cubillos Cadena

Memoria para optar al título y/o grado de Ingeniero Civil Geólogo

Rancagua, Chile

Enero 2023

índice

<i>RESUMEN</i>	2
<i>INTRODUCCIÓN</i>	3
<i>HIPÓTESIS</i>	5
<i>PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN</i>	5
<i>OBJETIVOS Y ALCANCES</i>	6
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
ALCANCES	6
<i>MARCO GEOLÓGICO</i>	7
LITOLOGÍA	8
GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL YACIMIENTO	14
ALTERACIÓN Y MINERALIZACIÓN	15
GEOLOGÍA DEL RAJO SUR	17
<i>METODOLOGÍA DE TRABAJO</i>	21
ANÁLISIS DE MUESTRAS Y CAPTURA DE DATOS GEOLÓGICOS.	21
DETERMINACIÓN DE CRITERIOS Y DOMINIOS	23
MODELAMIENTO	24
ESTIMACIÓN	25
MODELO DE BLOQUES	27
VALIDACIÓN DEL MODELO	28
<i>ANÁLISIS Y RESULTADOS</i>	29
ANÁLISIS DE MUESTRA	29
CRITERIOS Y DOMINIOS.....	29
MODELAMIENTO	32
ESTIMACIÓN Y MODELO DE BLOQUES	35
<i>DISCUSIONES</i>	38
<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	39
<i>REFERENCIAS</i>	41
<i>ANEXOS</i>	44

Resumen

La División El Teniente cuenta con 5 sectores productivos, estos son: Diablo Regimiento, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Recursos Norte y Rajo Sur. Esta última se encuentra ubicada en el lado sur del yacimiento. Uno de los problemas que afecta en la actualidad a la División El Teniente es la baja ley de cobre en el yacimiento, esta problemática conlleva que las decisiones de llevar a cabo un negocio minero tengan que ser tomadas con mucho más criterio y con una mayor cantidad de información disponible.

El objetivo de este trabajo es realizar un modelamiento mineralógico de sulfuros de cobre-hierro con base en información obtenida a través de la caracterización de detritos obtenidos de pozos de tronadura. La caracterización de detritos obtenidos de pozos de tronadura consiste en obtener datos geológicos tales como: mineralogía de sulfuros de cobre-hierro, litología y alteración. Esta información se utilizará para un modelamiento de los dominios mineralógicos, posterior estimación y generación de un modelo de bloques. El producto final se contrastará con datos mineralógicos históricos y con la caracterización de pozos elegidos aleatoriamente.

Se caracterizaron un total de 1.002 muestras, luego se realizaron dos análisis de muestra, un análisis gráfico y análisis estadístico. Entre los resultados obtenidos se pueden identificar cuatro dominios mineralógicos principales, estos son: Pirita dominante, Calcopirita predomina por sobre pirita, Pirita predomina por sobre calcopirita y Enriquecimiento. Finalmente, el producto final con base en datos geológicos obtenidos a través del mapeo de pozos de tronadura presenta bajas correlaciones entre los registros mensuales y las estimaciones del modelo. Posterior a la primera validación se procedió a realizar una segunda etapa de modelamiento, esta etapa muestra resultados similares a la primera etapa. En conclusión, este modelo de mineralización resulta ser un producto no válido para la generación de un modelo de bloques y estimación de mineralogía. Las recomendaciones para un futuro trabajo con esta metodología son: establecer mayor rigurosidad o incrementar el número de lecturas al momento de mapear, explorar otro tipo de parametrizaciones al estimar y agregar una nueva forma de validación del modelo.

Palabras claves: Modelamiento, Modelo de bloques, Pozos de tronadura, Rajo Sur y El Teniente

Introducción

La mina El Teniente es un yacimiento del tipo pórfido Cobre–Molibdeno que se encuentra en la Sexta Región de Chile, en el margen de la Cordillera de Los Andes, específicamente a 50 Km al noreste de la capital regional Rancagua. Este se encuentra entre la longitud $70^{\circ}21' \text{ W}$ y latitud $34^{\circ}14' \text{ S}$.

En el 2021 la División El Teniente produjo una cantidad de 459.817 toneladas métricas de cobre fino (Memoria Codelco, 2021) y es una de las minas subterráneas de cobre más grande del mundo que se compone de más 3.000 km de túneles, 1 km de profundidad y un área aproximada de 3 km².

Los sectores productivos dentro de este yacimiento son los siguientes: Diablo Regimiento, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Recursos Norte y Rajo Sur. El método de explotación dentro de la mina subterránea es del Block Caving y Panel Caving y por el método de cielo abierto ubicado en el sector sur del yacimiento donde se encuentra la Mina Rajo Sur (Figura 1.1).

Una de las problemáticas por la que se ha visto afectada la División El Teniente es la baja ley de cobre en el yacimiento, este problema conlleva que las decisiones de llevar a cabo un negocio minero tengan que ser tomadas con mucho más criterio y con una cantidad mayor de información disponible.

El propósito de este trabajo es realizar un modelamiento mineralógico de sulfuros de cobre–hierro con base en información obtenida a través de la caracterización de detritos obtenidos de pozos de tronadura. La caracterización de detritos consiste en obtener datos geológicos tales como mineralogía, litología y alteración a través de la observación con lupa binocular. Esta información se utilizará para un modelamiento de dominios mineralógicos y posterior estimación y generación de un modelo de bloques de minerales sulfurados de cobre–hierro.

El producto final se contrastará con datos mineralógicos históricos provenientes de microscopía mensual y cubicación de cantidad de minerales en cuerpos topográficos. En paralelo, este también se validará con la caracterización de 30 pozos elegidos aleatoriamente.

El beneficio que obtendrá la División el Teniente con este trabajo de título será conocer la mineralogía existente a través del modelamiento mineralógico de sulfuros de cobre-hierro en un sector de la mina Rajo Sur. Este permitirá indicar de manera anticipada la cantidad y tipo de minerales sulfurados de cobre-hierro con la cual será alimentada la planta de flotación. De esta manera, se podrá optimizar el uso de reactivos químicos para lograr una mejor captura de dichos minerales.

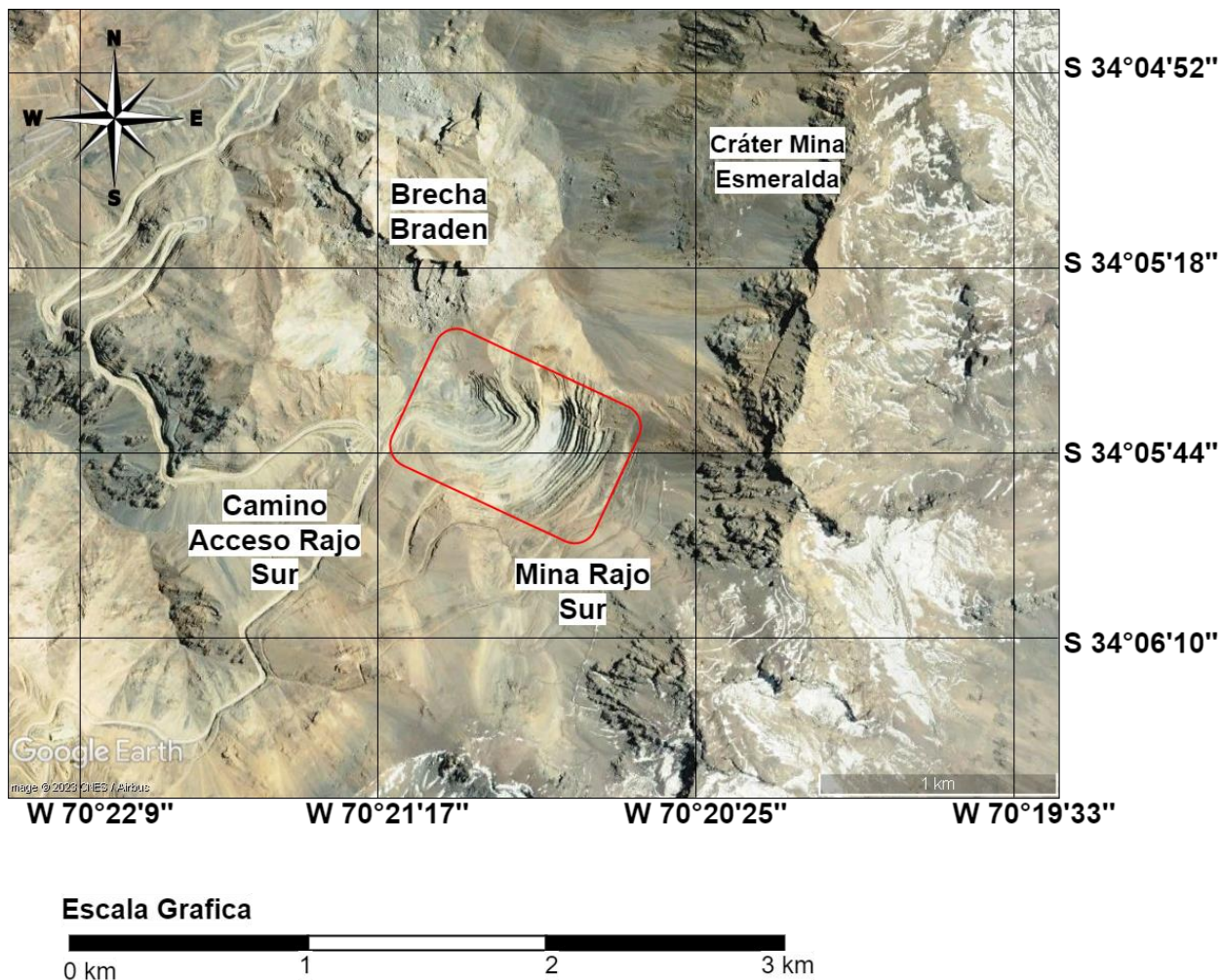


Figura 1.1. Mina Rajo Sur, ubicado al sur del Cráter Mina Esmeralda de la Mina el Teniente.

Escala 1:1000. Modificado de Google Earth.

Hipótesis

La hipótesis del presente estudio sostiene que la caracterización de muestras obtenidas en pozos de tronadura permitirá el desarrollo de un modelo mineralógico de sulfuros de cobre-hierro que prediga la distribución espacial de dichos minerales. Se espera que dicho modelo permita indicar de manera anticipada la cantidad y tipo de minerales sulfurados de cobre-hierro.

Preguntas de investigación

1. ¿Qué factores pueden afectar la calidad y la precisión de la caracterización de las muestras de pozos de tronadura?
2. ¿Por qué es importante generar una cantidad de datos geológicos estadísticamente significativos?
3. ¿Cómo se pueden determinar y definir los volúmenes de cuerpos mineralógicos?
4. ¿Cómo se podrá determinar criterios y dominios con base en la captura de información geológica?
5. ¿Qué estimador es el necesario para poder predecir de mejor manera los minerales sulfurados de cobre-hierro?
6. ¿Cómo se puede validar el producto final para conocer si este es viable?

Objetivos y alcances

Objetivo general

- Generar un modelo mineralógico con base en minerales sulfurados de cobre-hierro en la mina Rajo Sur, División El Teniente

Objetivos específicos

- Generar una cantidad de datos geológicos estadísticamente significativos que sustentan una distribución espacial.
- Determinar y definir volúmenes de cuerpos espaciales con características mineralógicas similares.
- Obtener unidades de estimación.
- Generar un modelo de bloques con base en la información adquirida
- Validar el producto final con registros históricos de mineralogía (mensuales) y registros al azar de muestras de pozos de tronadura.

Alcances

1. La representatividad de las muestras depende de la calidad del muestreo de los pozos de tronadura.
2. El levantamiento de información a escala visual podría generar subestimación o sobrestimación de las variables medidas.
3. No es posible re-mapear las muestras en etapas de calibración o modelamiento, ya que estas son eliminadas en la etapa de caracterización.

Marco Geológico

Geología del yacimiento

El yacimiento El Teniente se puede clasificar como un pórfido de tipo Cobre-Molibdeno, este pertenece a la franja metalogénica de edad Mioceno-Plioceno, ubicado en los Andes Centrales de Chile (Figura 2.1). Este yacimiento se caracteriza principalmente por la gran cantidad de mineralización sulfurada de cobre-hierro. Este tiene un origen hipógeno y supérgeno, se compone principalmente por pirita, calcopirita, bornita y molibdenita (Cuadra, 1986).

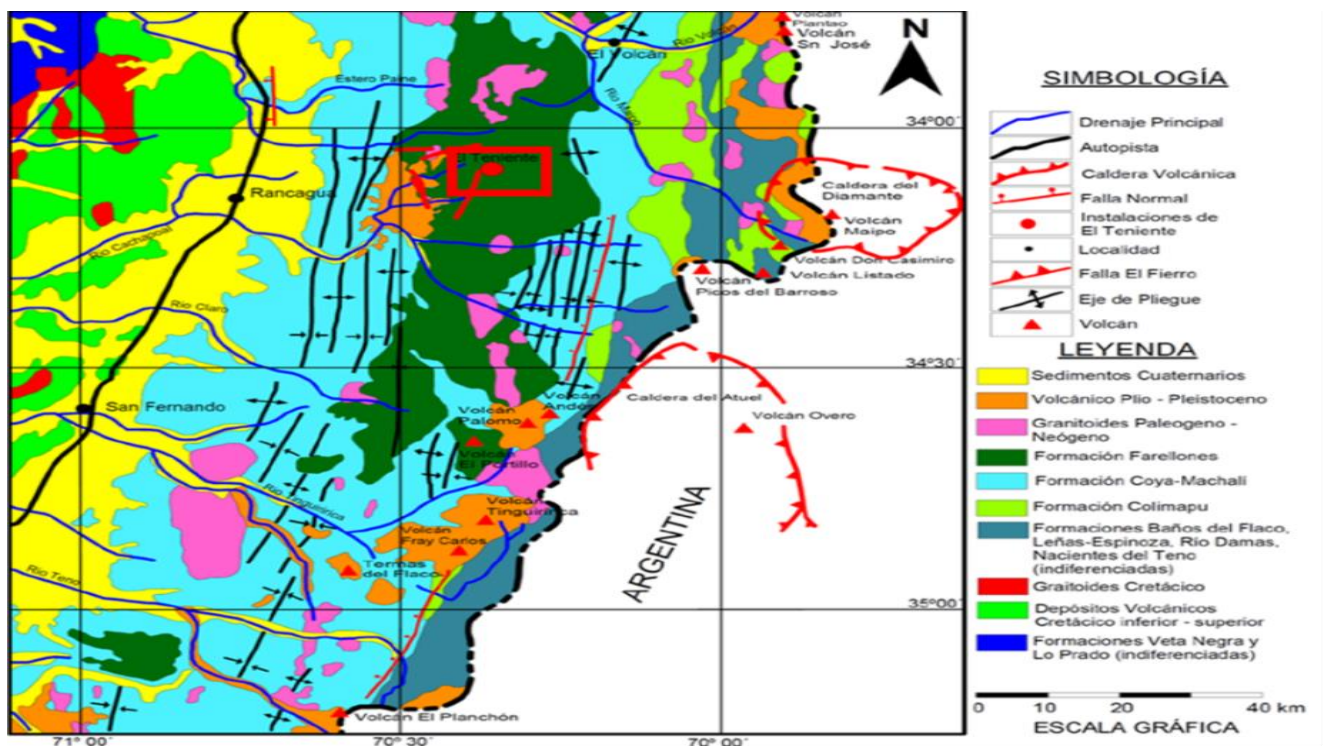


Figura 2.1: Mapa Geológico regional Chile Central escala 1:10 km, en el recuadro rojo, se encuentran las instalaciones de la División El Teniente, Modificado de Harrison, 2009.

Otra característica de este yacimiento es su gran tonelaje y la presencia de brechas magmáticas–hidrotermales, mineralizadas y estériles (Skewes & Stern, 1994). Las etapas de mineralización y la formación de las brechas hidrotermal–magmáticas están relacionadas a distintos episodios de intrusiones félsicas (Cuadra, 1986; Cannell et al., 2005).

En su gran mayoría, la mineralización hipógena de cobre se alberga en el Complejo Máfico El Teniente (Cannell et al., 2005) que se presentan principalmente como un conjunto de vetas polidireccionales llamadas *Stockwork* (Skewes et al., 2007).

El resto de la mineralización de cobre del yacimiento se encuentra diseminado en los cuerpos intrusivos félsicos y en el cemento de diversas brechas (Cuadra, 1986). La mineralización supérgena se encuentra en una cuenca de escurrimiento, ubicada en la parte más alta del yacimiento (Álvarez, 1990). Esta se compone principalmente por calcosina y en menor medida de covelina y cuprita (Álvarez, 1990).

Litología

En el yacimiento se compone por 4 grupos litológicos principales: Complejo Máfico El Teniente, Intrusivos Félsicos, Complejo Brechas Braden e Intrusivos Menores (Figura 2.2).

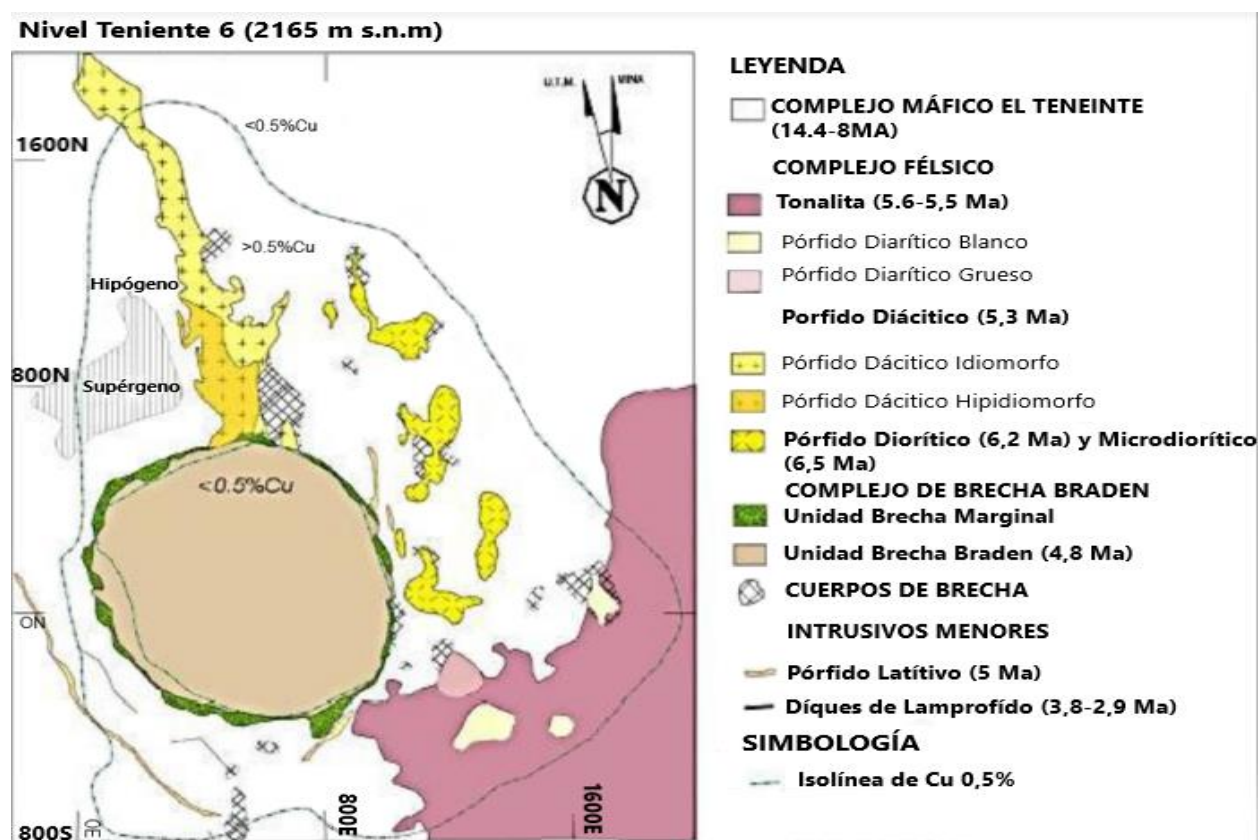


Figura 2.2: Mapa geológico del nivel Teniente 6 (2.165 m.s.n.m). Modificado de GRMD, Codelco División el Teniente.

Complejo Máfico El Teniente (CMET)

Se define como un gran cuerpo con forma de lacolito, donde la parte central de este tiene una extensión vertical mayor a 2 kilómetros y un volumen total de por lo menos 50 km³ (Stern *et al*, 2011). Estos cuerpos se conforman por rocas melanocráticas, con texturas afaníticas y porfídicas, entre las que se reconocen gabros, diabasas y basaltos porfídicos (Stern *et al*, 2011).

Los análisis químicos realizados indican que el contenido de óxidos de silicio (SiO₂) se encuentra entre un 46% y 52% en peso, entonces tienen una composición basáltica (Stern *et al*. 2011). Esta unidad aloja alrededor del 80% de mineralización de cobre (Camus, 1975) y se encuentra alterada, brechizada y mineralizada, por lo tanto, sus propiedades y texturas originales han sido modificadas (Arévalo *et al* , 2002) (Figura 2.3).

Complejo Máfico El Teniente (CMET)

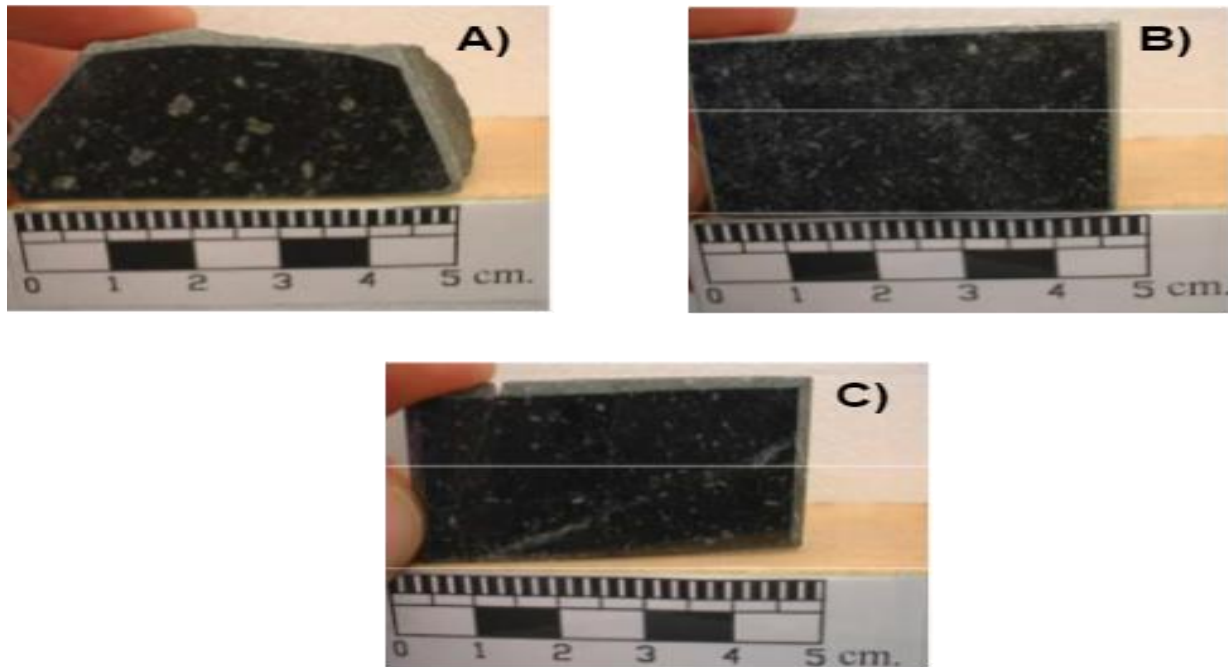


Figura 2.3: Fotografía de la litología Complejo Máfico el Teniente. A) diabasa con textura porfídica. B) gabro con textura es fanerítica fina, con cristales aciculares. C) basalto con textura porfídica fina. (Modificado de Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas) Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD), Codelco El Teniente.

Complejo de intrusivos félsicos

Se compone principalmente por un conjunto de cuerpos intrusivos subverticales en forma de stocks y diques. Este complejo intruye al CMET y tiene un contenido de SiO₂ mayor al 56% en peso, teniendo una afinidad calco–alcalina (Rabbia *et al.*, 2000). Estas se pueden clasificar como:

Pórfido Diorítico: Compuesto principalmente entre un 30% a 64% por fenocristales de plagioclasas, biotita y cuarzo subordinado (Figura 2.4) se presentan principalmente como una serie de vetillas y diques menores, con una dirección N30°W en la parte norte y centro del yacimiento. La masa fundamental está compuesta principalmente por microlitos de plagioclasas, cuarzo secundario, biotita y feldespato potásico (Hitschfeld, M., 2006).

Tonalita: Definida por Cuadra (1986) como un stock irregular que en superficie se extiende por 200 metros, aumentando en profundidad. Según Cuadra (1986) el stock está intruyendo al Pórfido Diorítico y se sitúa al sureste de Brecha Braden. Su textura es equigranular de grano medio, en cuanto a sus agregados está compuesta por plagioclasas, biotita y hornblenda parcialmente cloritizada, cuarzo y feldespato potásico (Arévalo *et al.*, 2002; Hitschfeld, 2006). En la periferia, las rocas presentan una textura porfídica, compuesta principalmente por, fenocristales de plagioclasa, biotita y relictos de anfíbol, en una masa fundamental de cuarzo, microlitos de plagioclasa y feldespato potásico (Cuadra, 1986)

Pórfido Dacítico: Está constituido por fenocristales de plagioclasa, biotita y cuarzo, donde se diseminan en una masa fundamental compuesta por microlitos de plagioclasa y feldespato potásico (Figura 2.4) (Cuadra , 1986). Algunos autores piensan que este pórfido es responsable de la mineralización, esto debido a que se encuentra una concentración de vetas de stockwork que contiene bornita asociado principalmente a una alteración potásica (Cuadra, 1986).

Pórfido Microdiorítico: Corresponde a una microdiorita que tiene un contacto con la Tonalita y CMET, esta se ubica principalmente en el sector central-este del depósito. Se compone por diorita de grano fino con abundantes xenolitos de andesita y biotitas (Figura 2.4) (Arredondo,1994). Además, contiene brechas ígneas de textura fanerítica de grano medio con clastos de CMET y Tonalita (Hitscheld,2006).

Intrusivos Félsicos

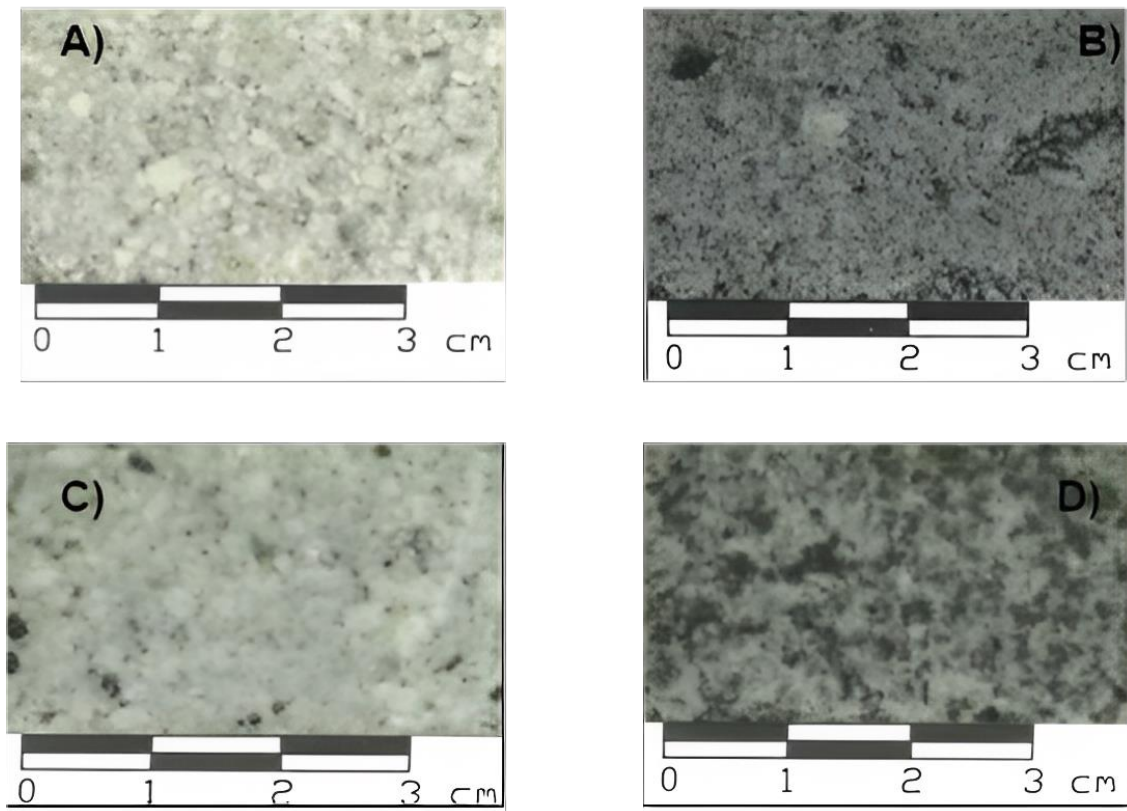


Figura 2.4: Fotografías de las litologías de Intrusivos Félsicos. A) Pórfido Diorítico con textura afanítica y fenocristales de plagioclasa y masa fundamental compuesta de cuarzo. B) Pórfido Microdiorítico con textura fanerítica y una matriz con clastos de roca félsica y máficas. C) Pórfido Dacítico con textura porfídica y presencia de fenocristales de plagioclasa y cristales tabulares de biotita. D) Tonalita con textura fanerítica con una distribución seriada del tamaño de cristales. (Modificado de Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas), GRMD, Codelco El Teniente

Complejo Brecha Braden o Chimenea Braden

Corresponde a una chimenea volcánica que se origina por una expulsión de gases que destruye y/o fragmenta la roca caja del complejo. Se puede observar como un cono invertido sub-vertical de diámetro 1.2 km y una profundidad de más 2.15 km desde la superficie (Cuadra 1986; Arévalo *et al* , 2002).

Esta brecha se conforma principalmente por fragmentos redondeados a subredondeados, polimícticos en una matriz de polvo de roca y cemento de sericita con cantidades menores de turmalina, calcita y sulfuros principalmente pirita (Cuadra, 1986).

Dentro de esta unidad se encuentran diversas subunidades que dependen del tamaño, selección y abundancia relativa de los clastos y por el contenido de turmalina en el cemento. Estas son: Brecha Braden Sericita y Sericita Fina, Brecha Braden Clorita, Brecha Braden Turmalina y Brecha Braden Turmalina en Bloques (Cuadra, 1986).

Cuerpos de Brechas Ígneas e Hidrotermales

En el yacimiento existen brechas hidrotermales e ígneas mineralizadas donde el origen está asociada a intrusiones de rocas félsicas. Arredondo (1994) identificó cuatro diferentes tipos de brechas en la mina: Brecha ígneas, Brechas hidrotermales de biotita, de anhidrita y de turmalina (Figura 2.5).

Brechas Ígneas: Brechas con matriz ígnea holocristalina y equigranular, compuesta por óxidos de hierro, biotita, cuarzo, plagioclasas, anhidrita y calcopirita. Cuando la matriz es de color claro, esta brecha tiene una cantidad grande de anhidrita, plagioclase y cuarzo, estas se le denominan brechas ígneas dacíticas (Arévalo *et al*, 2002). Al contrario, cuando la matriz es de color oscuro, su cemento es principal es biotita y se le denominan brechas ígneas andesitas (Arévalo *et al*, 2002) (Figura 2.5).

Brechas de Biotita: Se encuentran asociadas a la alteración biotítica tardimagmática. Se ubica en la Tonalita hacia la coordenada 100S, donde la biotita está como un cemento de y con clastos de plagioclasas, cuarzo, bornita, calcopirita, anhidrita y yeso (Arévalo *et al*, 2002) (Figura 2.5).

Brechas de Anhidrita: Está compuesto por un cemento de anhidrita y en menor medida por biotita, turmalina, cuarzo, yeso, apatito, calcopirita, pirita, bornita y rutilo (Arévalo *et al*, 2002). Se localizan en la periferia del pórfido Microdiorítico, Pórfido Diorítico y Pórfido Dacítico (Figura 2.5).

Brechas de Turmalina: Esta brecha se compone por una matriz formada principalmente por turmalina, que también tiene trazas de anhidrita, cuarzo, calcopirita, bornita y pirita. Los clastos se componen por rocas máficas y félsicas alteradas (Figura 2.5) (Arévalo *et al*, 2002).



Figura 2.5: Fotografías de las diferentes brechas que se presentan en el yacimiento,
Modificado de GRMD, Codelco División El Teniente, 2017

Intrusivos menores

Este corresponde a unos diques estériles, que intruyeron y emplazaron en las últimas etapas del yacimiento (Arévalo *et al*, 2002).

Pórfido Latítico: Diques anulares de 6 a 8 metros de potencia, emplazados alrededor de la Chimenea Braden. Se muestra con una textura porfídica con fenocristales de plagioclasas y biotita, la gran mayoría de los diques se encuentran alterados con sericita, clorita y calcita (Cuadra, 1986; Arévalo *et al*, 2002).

Lamprófido: Se definen como cuerpos tabulares ubicados al sur de la Chimenea Braden con potencias entre 0.5 a 2 m con una textura porfídica, con fenocristales de hornblenda y plagioclasas, anfíbol y óxidos de hierro (Cuadra ,1986).

Geología Estructural del yacimiento

La geología estructural es analizada por Garrido (1995), que define que el yacimiento El Teniente se sitúa en una zona de cizalla con orientación N65°E, definida como “Zona de cizalla El Teniente” que se extiende en un área de 14 Km de largo y 3 Km de ancho (Figura 2.6).

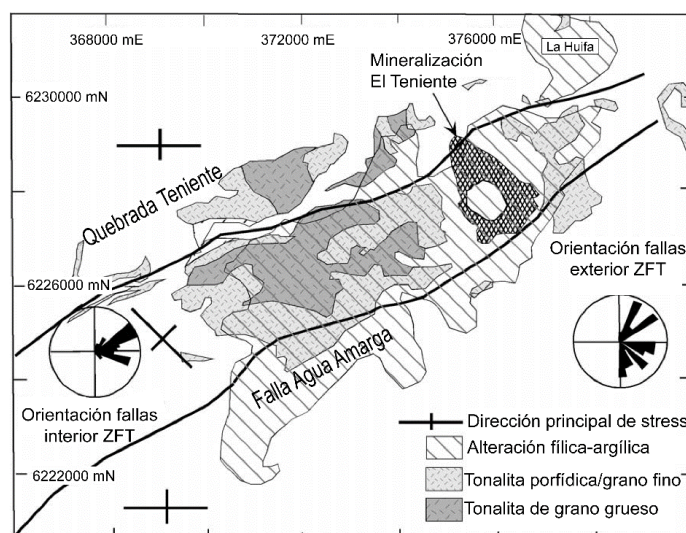


Figura 2.6: Mapa de la Zona de cizalla El Teniente, donde se muestran las orientaciones estructurales adentro y afuera de la zona. Tomado de Garrido (1995).

Clasificación de las estructuras del yacimiento

Las estructuras dentro del yacimiento El Teniente se clasifican en función de la longitud medible, esto quiere decir que se mide la continuidad y espesor de la estructura. En la tabla 1 se pueden encontrar las distintas clasificaciones de las estructuras dentro del yacimiento El Teniente.

Tabla 1: Clasificación de estructuras geológicas del Yacimiento El Teniente, Modificado de Estándares y Metodologías de trabajo para Geología de Minas, GRMD.

Tipo de estructura	Continuidad	Espesor
Menor	< 4 m	< 0.2 cm
Intermedia	Entre 4 y 100 m	Entre 0.2 a 0.5 cm
Mayor	Entre los 100 y 500 m	Entre 2 a 10 cm
Maestra	Entre los 500 m y 1 Km	Entre 10 a 5 cm
Distrital	>1 Km	> 1 m

Tipos de estructuras del yacimiento

Fallas.

Las fallas que se encuentran en el yacimiento se presentan como superficies planares irregulares, sinuosas al rumbo y en el manto. Se pueden encontrar en segmentaciones de fallas variadas, sistemas trenzados de alto ángulo, falla de bajo ángulo y terminaciones de cola de caballo llamadas “Splays”.

En su gran mayoría, las fallas tienen un rumbo con dirección hacia el NE (N 50°–80°E). Gran parte de la mineralización se encuentra en este tipo de estructuras. Estas fallas se encuentran rellenas por minerales de la etapa Hidrotermal tardía.

Vetas.

Diversos estudios se han realizado con el objetivo de clasificar los tipos de vetas que se encuentran en el yacimiento, entre todos estos se destaca el realizado por Vry (2010) que clasificó 13 tipos de vetas, que se encuentran en tres fases diferentes y que se clasifican en función de la litología, roca caja y observaciones visuales en corte transversal.

Alteración y mineralización

Las diferentes etapas de alteración y mineralización en el yacimiento El Teniente fueron descritas por Camus (1975), luego fueron actualizadas por Cuadra (1986) y Skewes (2002) donde se definen las siguientes etapas: Tardimagmática (TM), hidrotermal principal (HP), hidrotermal tardía (HT) y Supérgena.

Etapas de pre-mineralización

Se determina principalmente por el origen de vetillas de magnetita y el desarrollo de alteración de magnetita, plagioclasas cálcicas, cuarzo y actinolita. Luego de diferentes eventos de alteración esta se fue destruyendo, por lo tanto, esta se encuentra en los niveles más profundos de las minas (Arévalo *et al*, 2002).

Etapas Tardímagmática (TM)

Cuadra (1986) describe esta como una alteración potásica que afecta al intrusivo y a la roca de caja, donde se caracteriza por la presencia de minerales como feldespato potásico, biotita y una menor proporción de anhidrita, cuarzo, clorita, albita, turmalina y sericita. En cuanto la mineralización hipógena de cobre (calcopirita y bornita) ocurre en vetillas y en forma diseminada. En el pórfido dacítico esta alteración produce una zonificación marcada, formando un núcleo de bornita, una zona intermedia con calcopirita y en la periferia con una alta proporción de pirita (Cuadra, 1986).

Etapas Hidrotermal Principal (HP)

Esta etapa se impone a la anterior y consiste en franjas de alteración fílica, donde se observan minerales como cuarzo, sericita, clorita y anhidrita. Cuadra (1986) define que el origen de esta alteración es la interacción de aguas meteóricas con fluidos tardiomagmáticos. Los minerales metálicos asociados a esta alteración corresponden a calcopirita y pirita, frecuentemente diseminados en halos o formando parte del relleno de la vetilla.

Etapas Hidrotermal Tardía (HT)

Esta corresponde a una segunda etapa fílica que se le asocia principalmente a la Chimenea Braden (Cuadra, 1986). Las vetas formadas durante esta etapa cortan al Complejo de Brecha Braden. La densidad de las vetas y grado de alteración son mayores cuando están más cercanos a la Brecha Braden y disminuye cuando se aleja del complejo (Cuadra, 1986).

Los minerales asociados a esta alteración son: cuarzo, anhidrita, turmalina, yeso, carbonatos y baritina. En cuanto a los minerales metálicos estos son calcopirita, bornita, pirita, molibdenita y tennantita-tetraedrita que se encuentran en las vetillas y en el cemento de las brechas. Esta alteración se caracteriza por la asociación entre sericita, calcita y pirita en el cemento y por una alteración sericítica en los clastos (Cuadra, 1986).

Etapas Supérgena

Corresponde al último proceso de alteración del yacimiento, donde su génesis corresponde a la circulación de aguas subterráneas y barreras de baja permeabilidad que corresponden al pórfido Dacítico y al Complejo Brecha Braden que dan origen a una cuenca de escurrimiento subterráneo (Cuadra, 1986).

Sus minerales más abundantes son caolinita, montmorillonita, alunita y sericita. La zona lixiviada se caracteriza por la presencia de goethita, jarosita y hematita. La zona óxidos se representa por crisocola, malaquita, azurita, cuprita, cobre nativo y Copper pitch (Cuadra, 1986).

La última parte que esta etapa alteró fue la zona de enriquecimiento secundario que se caracteriza por calcosina como mena principal y covelina de manera secundaria, cobre nativo y cuprita. Estos minerales reemplazan a los minerales de cobre como la bornita y la calcopirita (Cuadra, 1986).

Geología del Rajo Sur

El sector del Rajo Sur abarca a un grupo pequeño de unidades descritas anteriormente. De acuerdo con la información obtenida de la GRMD de sondajes y mapeos de afloramientos en superficies de la mina Rajo Sur se reconocieron dos unidades litológicas dominantes estas corresponden al Complejo Máfico El Teniente (CMET) e Intrusivos Félsicos específicamente Tonalita (Figura 2.7).

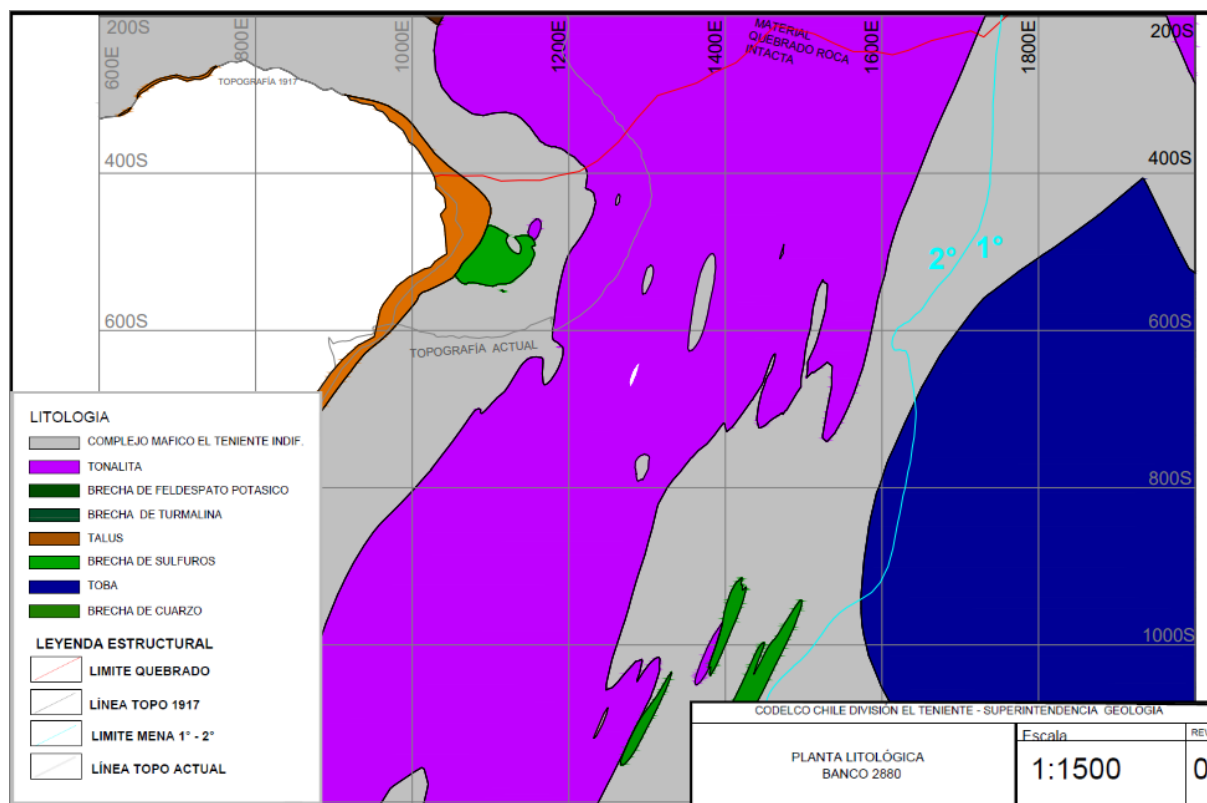


Figura 2.7: Planta Litológica de la mina Rajo Sur en la cota 2880 escala 1:1500. Modificado de GRMD Codelco División El Teniente.

Complejo Máfico El Teniente (CMET)

Corresponde a la unidad que se encuentra con menor presencia en el área de la mina Rajo Sur, ésta se ubica en la parte occidental del Rajo Sur. Las rocas expuestas en superficie están parcial o totalmente argilizadas esto debido a la alteración supérgena donde se reconocen arcillas y sericita como mineral dominante. Nuevos sondeos destacan que existen tramos sin alteración que muestran la textura original de la roca (SGL-I-123/2012).

Intrusivos Félsicos

Esta unidad se localiza en la parte oriental del Rajo Sur, donde su afloramiento que se observa de un color de gris claro a gris verdoso. La unidad félsica predominante en el Rajo Sur es la Tonalita y esta posee una alteración fílica dominante con presencia de cuarzo-sericita y biotitas (SGL-I-123/2012).

Brechas Hidrotermales

Se le asocian a intrusiones de cuerpos félsicos además de brechas de sericita, anhidrita y sulfuros, esta última tiene una mayor proporción por sobre las demás, esta se localiza en el sector occidental del Rajo Sur (SGL-I-123/2012).

Talus o Sobrecarga (Depósitos no consolidados)

Son depósitos no consolidados de diferente granulometría, su espesor varía entre los 1 a 25 m, Estas se ubican en los fondos de las quebradas y/o en lugares que tengan baja pendiente (SGL-I-123/2012).

Brechas de Ferrocreta

Compuestas por brechas polimícticas cementadas por limonitas, con alto contenido de óxidos de hierro y arcillas. En ocasiones estas brechas pueden presentar clastos mineralizados (SGL-I-123/2012).

Alteración y mineralización del Rajo Sur

Supérgena

Por lo general las rocas que afloran en la mina Rajo Sur presentan una fuerte alteración supérgena, esto es debido a la circulación y acción de aguas meteóricas en el sector. Presenta una zona lixiviada donde abundan minerales como la goethita, jarosita y hematita, además de una zona de oxidación que está marcada por minerales de cobre como crisocola, malaquita, brochantita y azurita (SGL-I-123/2012).

Hipógena

Dominan los minerales primarios como la pirita y calcopirita, esta última cada vez que se aleja hacia el NE va tomando una mayor ocurrencia dentro de los sondajes, mostrando un control estructural de la mineralización (SGL-I-123/2012).

Zonación Geotécnica

Dentro de la División El Teniente se define el límite primario o secundario en función de la estabilidad del mineral anhidrita, debido a que esta limita las condiciones geotécnicas de la roca, por lo cual esta se le conoce como límite primario–secundario geotécnico (Figura 2.8).

Las unidades litológicas presentes en Rajo Sur presentan categoría geotécnica "Secundario", esto debido a su baja resistencia a la molienda como a su cohesión (SGL–I–123/2012).

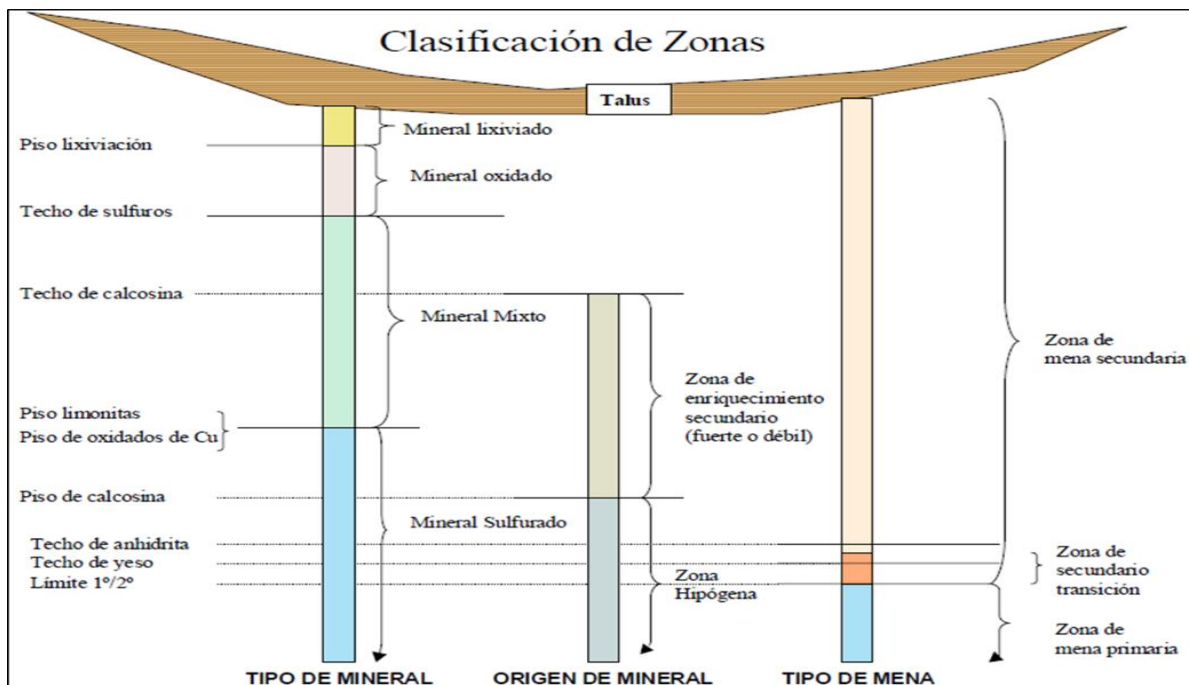


Figura 2.8: Clasificación de las zonas geotécnicas. Tomado de GRMD, Codelco División El Teniente.

Metodología de Trabajo

En este estudio se implementó la metodología de captura de información geológica a través de lupa binocular, donde se obtendrá información como la litología, el porcentaje total de minerales sulfurados de cobre-hierro y el porcentaje de minerales en base sulfuros que hay en cada muestra en la mina Rajo Sur, División El Teniente. Además, se consideran diferentes procedimientos los cuales implican el manejo de la base de datos creada, modificación de parámetros a través de software de modelamiento y estimación y análisis estadístico de los datos obtenidos.

A continuación, en la figura 3.1, se presenta un resumen de las etapas de la metodología:

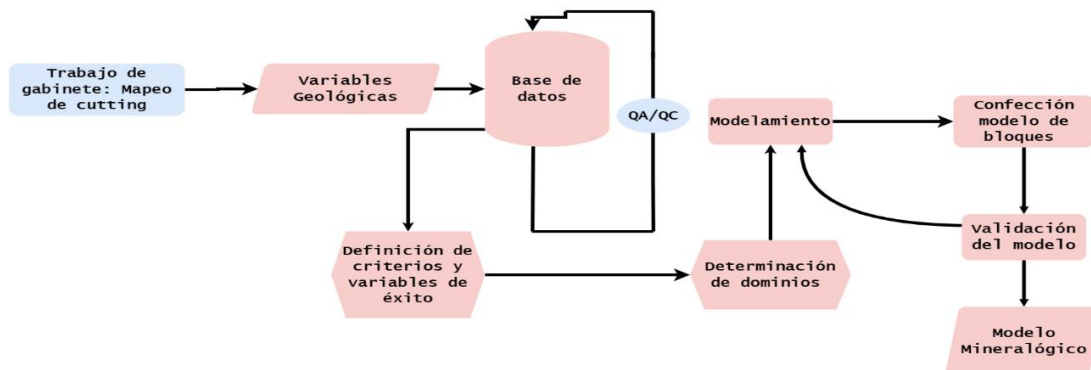


Figura 3.1: Diagrama de la metodología de trabajo

Análisis de muestras y captura de datos geológicos.

Para poder realizar la caracterización macroscópica de los pozos de tronadura se utiliza una muestra especial llamada Cutting, tomada en terreno, la cual consiste entre 50 y 100 gr de detrito (Ver anexo 1), esta es lavada y posteriormente observada bajo lupa binocular (Figura 3.2). La metodología de caracterización se basa principalmente en diagramas de estimación de proporciones de minerales y en paralelo se realiza un repaso bibliográfico de las características diagnósticas y estequiometría de sulfuros de cobre-hierro presentes en la mina Rajo Sur. A continuación, se realiza una etapa de pre-mapeo para reforzar las diferencias entre los minerales sulfurados de cobre-hierro (pirita, bornita, calcopirita, calcosina y covelina) y óxidos verdes de cobre (Figura 3.4).

Los datos obtenidos se almacenan en una base de datos (Ver anexo 2) donde las variables a reconocer son: porcentaje total de minerales sulfurados de cobre-hierro en base mineral, porcentaje de minerales sulfurados de cobre-hierro presentes en base sulfuros normalizado al 100% y litología. Posterior a la construcción de la base de datos, se realizará una validación a la consistencia de los datos, donde se asegurará que la actividad realizada alcance un grado de calidad aceptable. El objetivo de este proceso es prevenir alguna inconsistencia o ausencia de datos. Cabe destacar que en este análisis se reportaron minerales como traza (TR) cuando la presencia relativa de esta es mínima en relación con los otros minerales (valores entre 0.5% a 1% normalizado en base sulfuros).

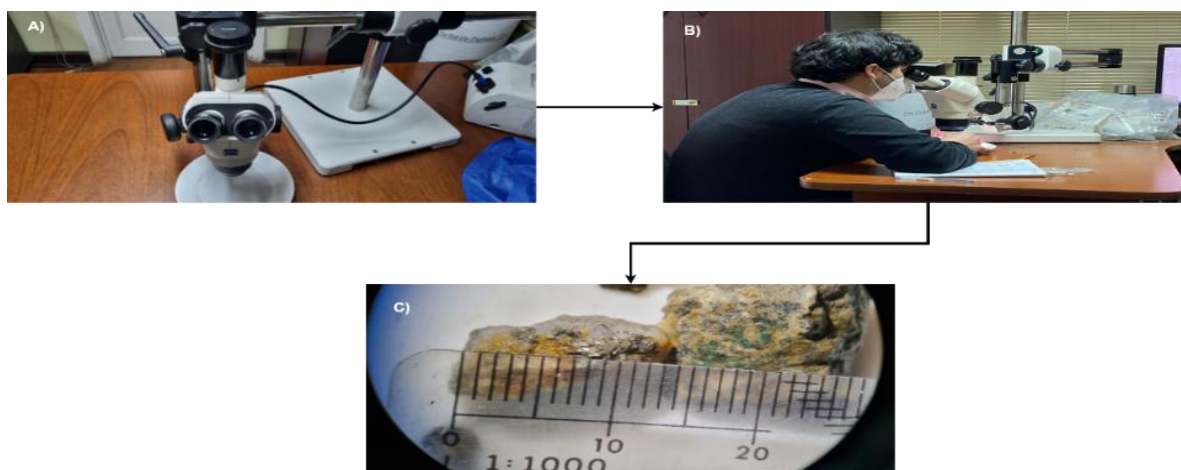


Figura 3.2: Diagrama de Análisis de muestra y captura de datos geológicos. A) Lupa binocular *Zeiss - Stemi 2000-C*. B) Metodología de mapeo bajo lupa binocular. C) Vista de muestra lavada bajo lupa binocular, escala 1:1000.

En la figura 3.3 se observan las diferencias que existen entre una muestra no lavada y una lavada, en el apartado A) se observa el material fino con pequeños detritos de roca molida y un cristal de pirita. Es importante destacar que, al momento de lavar la muestra, es altamente probable que se genere una eliminación involuntaria de partículas finas, que al momento del análisis visual puede o no influir en el porcentaje total de sulfuros y/o en el porcentaje relativo del mineral.

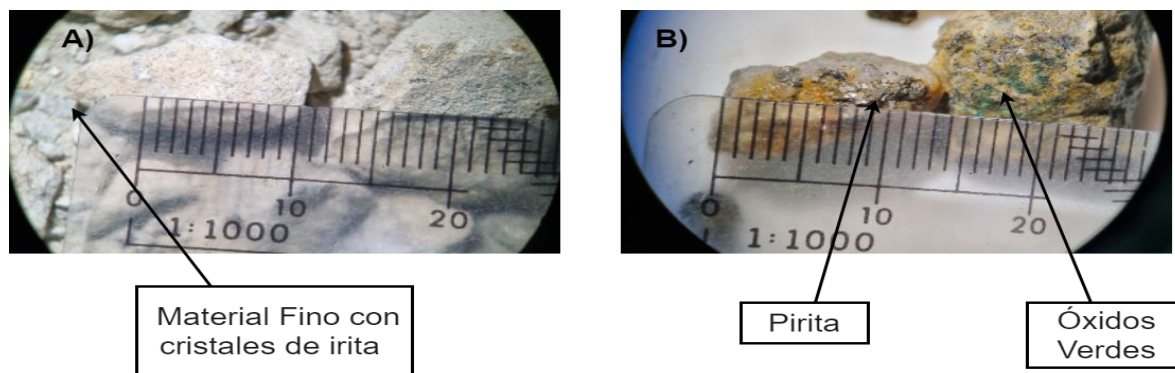


Figura 3.3: Diferencias entre muestra lavada y no lavada bajo lupa binocular. A) muestra no lavada, se destaca el material fino y B) muestra lavada, se destaca la aparición de los minerales después del lavado.



Figura 3.4: Minerales vistos bajo lupa binocular, se observan las propiedades diagnósticas de los minerales Pirita, Calcosina, Calcopirita y Óxidos verdes.

Determinación de criterios y dominios

Para poder definir los dominios mineralógicos, se realizó un análisis estadístico de los datos adquiridos en la etapa anterior (Histogramas y frecuencia relativa acumulada), y con esta información se obtendrán los límites superiores e inferiores de los minerales sulfurados de cobre-hierro como Pirita, Calcopirita, Covelina y Calcosina. Cabe destacar que para este análisis se determinó agrupar los minerales covelina-calcosina, debido a que la mineral covelina no aparece de forma regular, además de que representa la paragénesis de covelina-calcosina, esto

debido a que son minerales que aparecen en la misma roca, formados por el mismo proceso genético durante una misma etapa.

En la categorización de las muestras se puede notar algún error, heredado desde la etapa de caracterización, esto debido a la subestimación o sobreestimación de las proporciones de los minerales sulfurados de cobre-hierro. Es por esto que se necesita validar las categorizaciones sin recurrir al re-mapeo.

La validación de los criterios se realizará mediante la aplicación de herramientas estadísticas, tal como el diagrama de violín que ayudará en la validación de cada dominio establecido. Este tipo de diagrama es una combinación entre los diagramas de cajas y bigotes y diagrama de densidad de datos, por lo tanto, nos permite visualizar de mejor manera la distribución de los datos y la densidad de probabilidad.

Modelamiento

En esta etapa se requiere que cada una de las muestras analizadas se ubiquen correctamente en el espacio; para esto se obtendrán las coordenadas norte, este, cota y profundidad de cada muestra mapeada, para luego cargar la base de datos al programa. El software utilizado requiere disponer de 4 archivos, estos son:

1. Identificador: El cual contiene la identificación de los pozos, posición (Este, Norte, Profundidad) del collar, y su largo.
2. Variables: Contiene la información de las variables de cada pozo, en este caso son el porcentaje total de mineral sulfurado cobre-hierro y el porcentaje de cada mineral en base sulfuro.
3. Geología: el cual contiene parámetros geológicos por tramo de los pozos, códigos para tipo de roca, alteraciones y categorización.
4. Disposición de los pozos: Contiene información relacionada con variables angulares de los pozos. Este contiene la dirección del pozo y el ángulo con el que se dispone el pozo.

Luego, se confeccionarán 20 secciones en la dirección E-W desde las coordenadas mina 800E a 1400E correspondientes a 600 metros. Posteriormente se generarán los perfiles que representan a cada dominio por sección en donde se modelarán cada uno de los dominios mineralógicos, finalmente se construirán los cuerpos mineralógicos a partir de todos los perfiles.

Composición de las muestras

Generalmente los intervalos de muestreo en los pozos de tronadura no son similares con los intervalos de trabajo en una fase de estimación. El procedimiento de regularización de los datos o composición es el cálculo el cual las muestras de los análisis se combinan en intervalos regulares, que no sean similares con el tamaño original de los pozos (Anexo 3). Estos nuevos datos compostados se calculan usando el promedio ponderado de la muestra por la longitud de los pozos. Barnes (1980) indica que el objetivo de la composición es obtener muestras representativas de una unidad litológica o de mineralización las cuales pueden ser usadas para estimar diferente información geológica (ley, litología, porcentaje mineral, entre otros) de un volumen mucho mayor a la unidad real. Además, para que los datos sean compostados de forma óptima, se realizará una nueva validación de la consistencia de los datos, con el fin de eliminar datos duplicados. Con el objetivo de tener una base de datos que sea representativa para la estimación de las variables de interés, la composición se realizará en intervalos regulares de 10 metros. Debido a que los pozos de tronadura perforados para en la mina Rajo Sur son de una longitud aproximada de 10 metros.

Estimación

La estimación es un conjunto de técnicas estadísticas que permite aproximar un valor de una población a partir de los datos obtenidos de una muestra. En este caso, para la estimación del modelo de bloques, se utilizó el estimador de inverso a la distancia al cuadrado.

Este método atribuye a cada dato un peso estadístico proporcional al inverso de su distancia al que se encuentra de la muestra. Es decir, si el bloque a estimar se encuentra a una

distancia más cercana de la muestra, este tendrá un mayor peso estadístico. El método de inverso a la distancia es sencillo de aplicar y tiene por ventaja su velocidad de cálculo y que no requiere de información previa como la variografía. Los pesos estadísticos se calculan según la ecuación (1).

$$\mu_i = \frac{\frac{1}{c + d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{c + d_i^2}} \quad (1) \quad z(x_0) = \sum_{i=1}^n u_i * z(x_i) \quad (2)$$

La fórmula (1) muestra el cálculo del peso estadístico donde u_i es el peso estadístico, c es una constante de estimación y d corresponde a la distancia entre la muestra y el bloque a estimar. La fórmula (2) muestra la ecuación utilizada para la estimación de acuerdo con la variable u_i y el valor estimado $z(x_0)$. Para un mejor desarrollo de la estimación, se realizaron 2 estimaciones por cada mineral y dominio mineralógico. En la tabla 2 se muestra un resumen de los parámetros utilizados para la estimación. En la figura 3.5 se muestra un ejemplo del método inverso a la distancia.

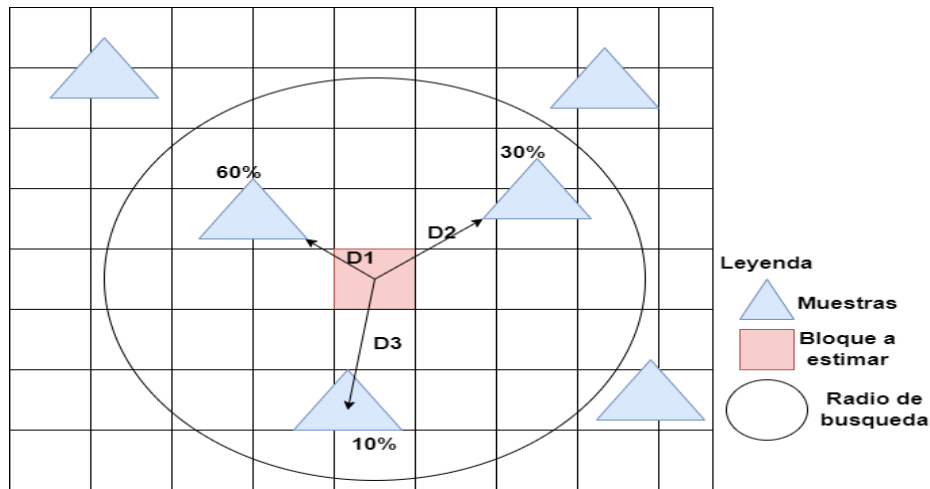


Figura 3.5: Ejemplo de la aplicación del estimador inverso a la distancia. Las muestras más cercanas al bloque a estimar tienen un mayor peso estadístico en comparación con las muestras más alejadas.

Tabla 2 : Parámetros de estimación para inverso en la distancia al cuadrado.

Estimación	Método	Parametros de estimación			Pasos de discretización
		Radio de búsqueda x,y,z	N°Muestras mínima	N°Muestras máxima	
1	Inverso a la distancia al cuadrado	10,10,10	2	6	3
2	Inverso a la distancia al cuadrado	20,20,20	1	8	3

Modelo de Bloques

Un modelo de bloques es una representación sintetizada de un yacimiento minero o un sector de la mina. Este se puede considerar como un conjunto de bloques apilados que representan volúmenes de roca en un depósito. Cada bloque puede contener información del mineral, ley de cobre, litología, entre otros. Para la construcción del modelo de bloques se necesitan los límites del modelo en general, tanto la longitud (x), ancho (y) y la altura (z) mínimas y máximas, estos límites definirán la disposición de cada bloque. Además, se necesita de las dimensiones de cada bloque, tanto la longitud (x), ancho (y) y la altura (z).

El modelo de bloque se generó a partir de las dimensiones utilizadas para la mina Rajo Sur. En la tabla 3, se observan las dimensiones utilizadas para la construcción del modelo de bloques.

Tabla 3: Dimensiones utilizadas para la construcción del modelo de bloques.

Dimensiones modelo de bloques			Tamaño de bloques		
	Inicio	Final	Mínimo	Máximo	
x	200	1800	2.5	5	
y	-1800	-540	2.5	5	
z	2500	4000	1.5	10	

Se agregarán 5 variables por cada mineral, las cuales son: las distancias entre las muestras, el número de muestras que se utilizó para la estimación, la densidad de la roca, la zona mineral y la unidad de estimación para cada mineral. Los datos de densidad de la roca fueron obtenidos desde la base de datos otorgada por la Superintendencia de Geología, Codelco División el Teniente. Por otro lado, este modelo de bloques se limitó con los cuerpos mineralógicos que se realizaron en la etapa anterior. La tabla 4 muestra un resumen de las variables incorporadas en este modelo de bloques.

Tabla 4: Variables del modelo de bloques.

Variables modelo de bloques	
Variable	Descripción
zmin	Dominio en que se encuentra el bloque
Flag	Zona mineral donde se realizó la estimación
Dist	Distancia entre las muestras estimadas
Nm	Número de muestras que se utilizó para estimar
Densidad	Densidad de la roca en que se encuentra el bloque
Pirita, Calcopirita, Calcosina-Covelina	Unidades de estimación para cada mineral

Validación del modelo

Posterior a la obtención del modelo, es necesario validar el producto para que este sea confiable. Para esto se contarán de 2 etapas: una validación visual y una validación con registros históricos.

Validación visual

Esta etapa de validación constará de elegir, al azar, muestras de cutting no mapeadas y repetir los mismos procedimientos que en la etapa de análisis de muestra y captura de datos geológicos. Luego se comparan los datos obtenidos de este nuevo mapeo con los porcentajes relativos obtenidos del modelo.

Validación con registros históricos

Con la información de los compuestos mensuales, se procederá a comparar con el modelo mineralógico de sulfuros de cobre-hierro y analizar si es que los valores obtenidos con este se asemejan a los indicados en los registros mineralógicos. Si hay una diferencia semejante a nuestra variable de éxito, se infiere que el proceso de modelamiento y construcción del modelo se encuentra dentro de los rangos de aceptabilidad.

Análisis y Resultados

Análisis de muestra

Se analizaron un total de 1.002 muestras (Cutting) que se distribuyeron entre diferentes bancos de la mina Rajo Sur (Anexo 4). Del total de muestras, el 90% corresponde al Complejo de intrusivos félsicos (Tonalita) y el otro 10% corresponde a CMET. En cuanto a su alteración, en su gran mayoría presenta una alteración supérgena evidenciada por la paragénesis covelina-calcosina, además de la presencia de minerales verdes de cobre.

Criterios y Dominios

Para obtener los dominios mineralógicos se realizó un análisis gráfico de los datos obtenidos, este se basó en el estudio de histogramas y gráficos de frecuencia relativa acumulada. Se decidió utilizar estos tipos de gráficos porque la combinación de estos facilitó la obtención de los límites superiores e inferiores.

En el anexo 5 se puede observar las representaciones gráficas de los porcentajes relativos de pirita, calcopirita y covelina-calcosina y la cantidad de muestras por porcentaje. En estos se establecen los límites superiores e inferiores en base a los quiebres de pendiente en la frecuencia acumulada y en el porcentaje de mineral visto en el histograma. Estas zonas representan las áreas de dominio de cada mineral.

En la tabla 5, se observan los límites superiores e inferiores de cada zona para los minerales pirita, calcopirita y covelina-calcosina. El procedimiento para establecer los dominios mineralógicos a partir de los datos obtenidos anteriormente se basa en la categorización según los rangos de proporción de mineralógica de sulfuros de cobre-hierro presentes en cada pozo de tronadura obtenidos desde el anexo 5.

Tabla 5: Intervalos de porcentaje relativos de cada mineral en base sulfuros.

Zona	Pirita	Calcopirita	Calcosina-Covelina
1	[0 - 32,5]	[0 - 22,5]	[0-5]
2	[32,5 - 52,5]	[22,5 - 42,5]	[5,0-10]
3	[52,5 - 77,5]	[42,5 - 58]	[10-17,50]
4	[77,5 - 100]	[58 - 100]	[17,50-100]

En función de los datos de la tabla 5, se obtuvieron los siguientes criterios:

1. Pirita dominante (Py): Debe tener un contenido relativo de pirita mayor al 77,5% con respecto a los otros minerales en base sulfuros.
2. Calcopirita dominante (Cpy): Debe tener un contenido relativo de calcopirita mayor al 58% y pirita menor al 33% en base sulfuros.
3. Calcopirita predomina por sobre pirita (CpyPy): El contenido de pirita debe estar entre 35% y 52% y la calcopirita debe estar ser menor al 58% en base sulfuros.
4. Pirita predomina por sobre calcopirita (PyCpy): El contenido debe ser mayor al 52% y menor al 78% y el contenido de la calcopirita debe ser menor al 43%.
5. Enriquecimiento secundario (Enriquecimiento): Debe contar con presencia de minerales de calcosina-covelina mayor al 10% relativo, debido a que este es el porcentaje mínimo del cual, en el proceso de flotación, empieza a afectar negativamente a la recuperación del cobre.

En la tabla 6 se observa un resumen de las categorizaciones antes mencionadas.

Tabla 6: Criterios de categorización de dominios mineralógicos

Criterios	Categoría
Covelina-Calcosina mayor o igual al 10%	Enriquecimiento
Calcopirita mayor a 58%	Cpy
Calcopirita menor a 58% ,Pirita mayor al 35% y menor a 52%	CpyPy
Pirita mayor al 52% y menor al 78% ,Calcopirita menor al 43%	PyCpy
Pirita mayor al 78%	Py

La tabla 7 muestra los resultados de la cantidad total de muestras y su porcentaje relativo.

Además, se asignó una codificación a cada categorización, esto para facilitar el proceso de modelamiento.

Tabla 7: distribución de los datos por categoría

Distribución de categorías			
Categorización	Código	Total Muestras	% relativo
Py	1	144	14%
PyCpy	2	542	54%
CpyPy	3	105	10%
Cpy	4	7	1%
Enriquecimiento	5	204	20%
Total		1002	100%

Se decidió eliminar la categoría de Cpy, debido a que contiene un número de muestras que no es estadísticamente válido para este estudio.

Validación de las categorías a través de razones elementales

Una de las formas de validar las categorías obtenidas es a través de las razones elementales. Con la información de las leyes de Cobre, Hierro y azufre se obtienen las razones elementales, las cuales nos entregan valores medios característicos para cada caracterización según su proporción mineral y la composición elemental de estos.

Además de los datos geológicos, se recopiló los datos de leyes de Cobre total (CuT), Cobre no soluble (CunS), Hierro Total (FeT) y Azufre (S), obtenidos desde la base de datos de la Superintendencia de Geología de la División el Teniente. La ley de CuNS corresponde a el cobre proveniente de especies no sulfuradas. Con los datos de CuT, CunS, FeT y ST se generaron las razones elementales. Las razones como la razón de solubilidad (CunS/CuT) y las razones de estequiometría (CuT/Fe Y CuT/S) resultan valores que dan indicios de cada zona según la mineralización dominante.

La figura 4.1 muestra los Boxplot de las razones elementales para cada categorización. En general, se puede observar que en los valores de CuT son mayores en la categorización de enriquecimiento, esto debido a la presencia de los minerales secundarios como la covelina y calcosina. En las categorías de CpyPy y PyCpy podemos observar que los valores medios de CuT van disminuyendo debido al poco contenido de cobre, esto por la composición elemental de la calcopirita y pirita.

En cuanto a los valores de CunS/CuT se puede observar que los valores medios son mayores a 0.8 y este aumenta en la categorización de enriquecimiento secundario, además en la categorización Py y PyCpy podemos ver valores altos de CunS/CuT en comparación con las otras unidades con valores medios cercanos al 0.5. Esto debido a que se pueden encontrar en sectores con un enriquecimiento débil de cobre, zonas de óxidos o zonas de baja mineralización de cobre.

En cuanto a CuT/FeT se observa que los valores medios son mayores a 0.2 en la caracterización de enriquecimiento. Esto debido a que puede contener un mayor porcentaje de

pirita o calcopirita y esto aumenta el valor de FeT debido a su composición mineral. Los gráficos CuT/S muestran que los valores son más altos en categorizaciones con alto contenido de pirita y calcopirita.

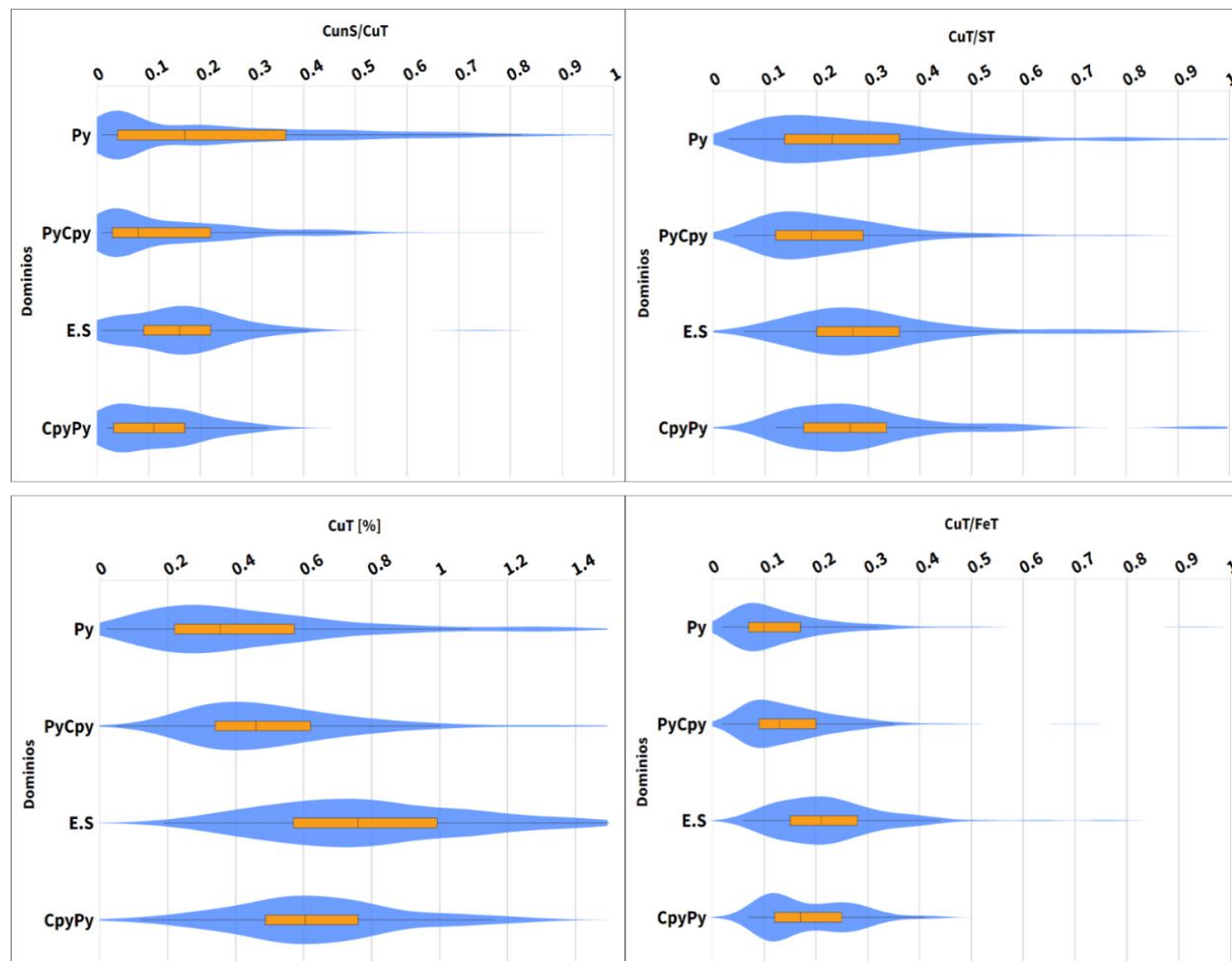


Figura 4.1: Gráficos de violín y BoxPlot para cada categorización en función de la ley de cobre total (CuT%) y las razones elementales, de celeste se presenta el diagrama de densidades y de naranja los boxplots.

Modelamiento

La construcción de los cuerpos mineralógicos para cada categorización es una de las etapas principales de este estudio. Para esto se necesitó de dos etapas principales: construcción de perfiles de dominios por sección y generación de cuerpos mineralógicos a partir de los perfiles.

Construcción de perfiles

Se generaron 20 secciones en la dirección E-W desde las coordenadas mina 800E a 1400E correspondientes a 600 metros. Los criterios utilizados para cada dominio son generales, si existe un dominio evidente de alguna categorización, se generará un contorno de los dominios, además de que cada perfil debe tener un sentido geológico. En cambio, para generar los perfiles de enriquecimiento se toma un criterio diferente, debido a que la alteración supérgena afecta más en superficie que en profundidad es por esto que estos perfiles toman una forma de “muela”.

Cabe destacar que se decide generar los contornos de PyCpy como un *background* o fondo, debido a que son las muestras con mayor presencia.

Generación de cuerpos mineralógicos

Una vez obtenido los perfiles por cada sección, se elaboran los cuerpos mineralógicos de cada categorización. Con el uso de software de modelamiento y estimación se generaron los cuerpos mineralógicos en función de los perfiles obtenidos. Finalmente se construyeron 4 cuerpos mineralógicos (Figura 4.2) de los cuales se basaron en las caracterizaciones mencionadas anteriormente.

Los cuerpos mineralógicos obtenidos en esta etapa son los siguientes:

1. Dominio PyCpy: Background o fondo de roca, se presenta de color café oscuro y en comparación con los otros cuerpos mineralógicos, es que tiene una mayor presencia.
2. Dominio Py: Cuerpo mineralógico que contienen en su gran mayoría muestras con una dominancia de la pirita por sobre los otros minerales, esta se presenta con un color amarillo oscuro.
3. Dominio CpyPy: Cuerpo mineralógico que contienen muestras con una predominancia de calcopirita por sobre la pirita, en comparación con las otras caracterizaciones, esta tiene una menor presencia. Se presenta con un color rojo.
4. Enriquecimiento: Cuerpo mineralógico que contienen muestras con un porcentaje relativo de calcosina-covelina igual o mayor a 10%, en la figura 4.3 entre las cotas [-700,-800] y [-1000,-1100] se observan cuerpos mineralógicos de enriquecimiento con forma de “muela”, se presentan de un color azul.

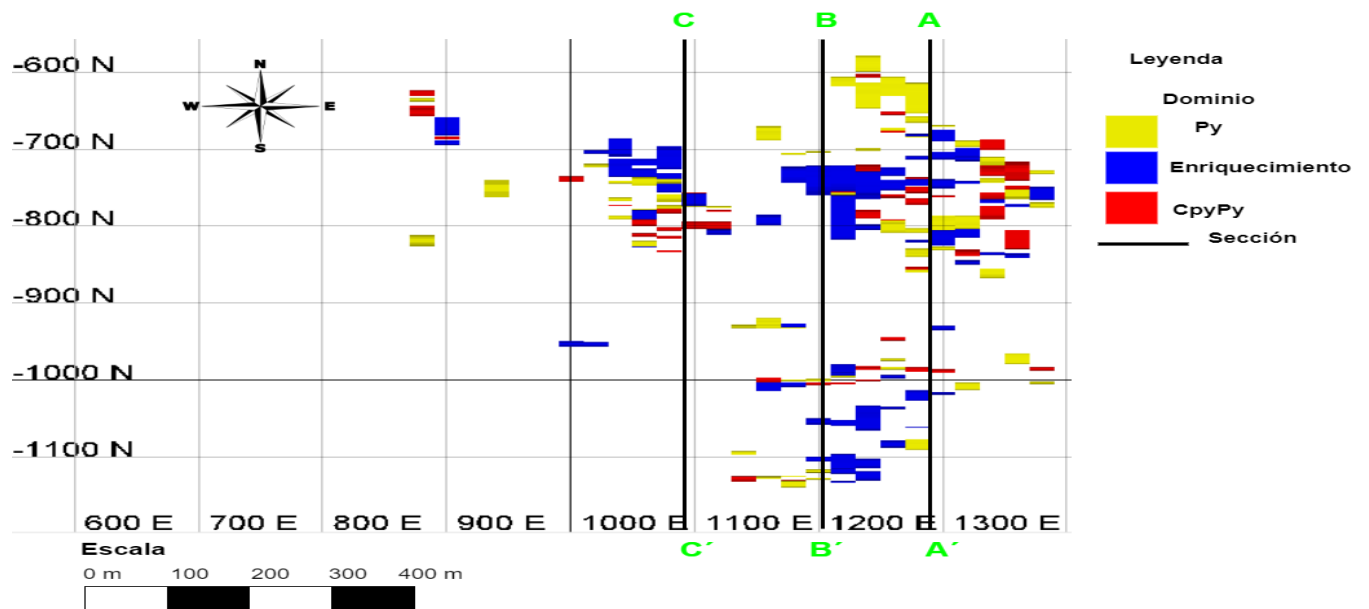


Figura 4.2: Vista en planta (altura 2820 m.s.n.m) de los cuerpos mineralógicos Py, CpyPy y Enriquecimiento sin fondo de PyCpy. De color negro, las secciones A-A', B-B' y C-C'.

El producto final de la generación de los cuerpos mineralógicos se presenta en la figura 4.3, este nos da la certeza que los cuerpos mineralógicos son consistentes con la estadística presentada en el capítulo de criterios y dominios.

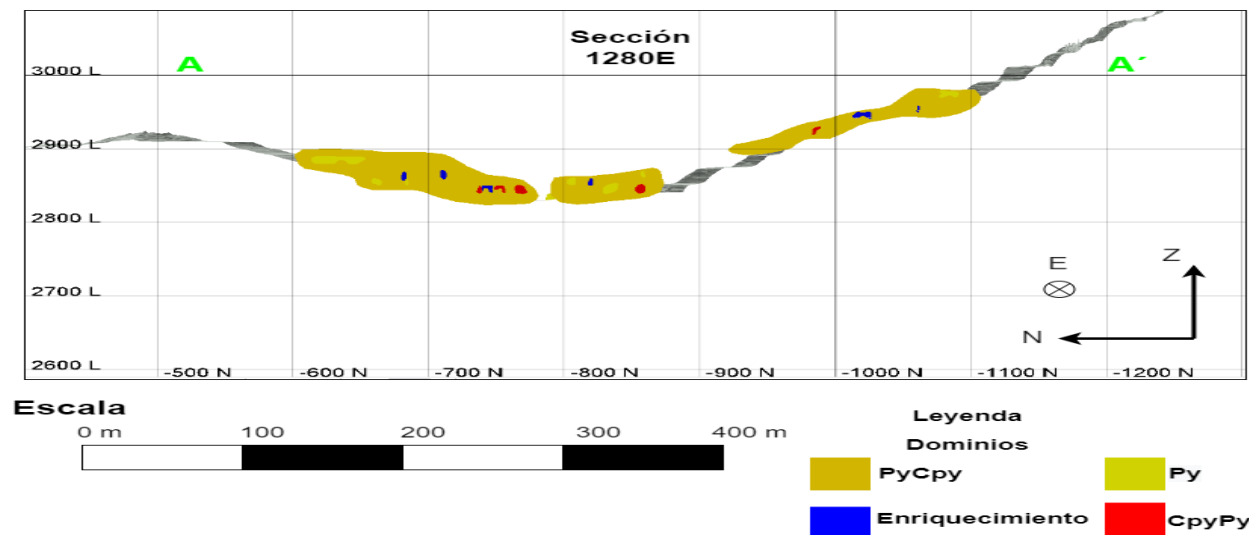


Figura 4.3: Sección A-A' 1280E, muestra el resultado final del modelamiento mineralógico de sulfuros de cobre-hierro

Estimación y Modelo de bloques

Utilizando los parámetros para la generación del modelo de bloques y la estimación de los minerales se obtuvieron los siguientes resultados:

Modelo de bloques.

De acuerdo con la metodología, se realizó un modelo de bloques en función de los parámetros expuestos en la tabla 3, estos parámetros son los que se utilizan actualmente en la mina Rajo Sur. Este modelo de bloques se limitó con los cuerpos mineralógicos obtenidos en la etapa anterior (Figura 4.3). En la figura 4.4 se muestra la sección 1280E del modelo de bloques categorizada, se evidencia que el modelo de bloques es adecuado para la estimación de recursos. Estos se asemejan con los cuerpos mineralógicos que se muestran en la figura 4.2.

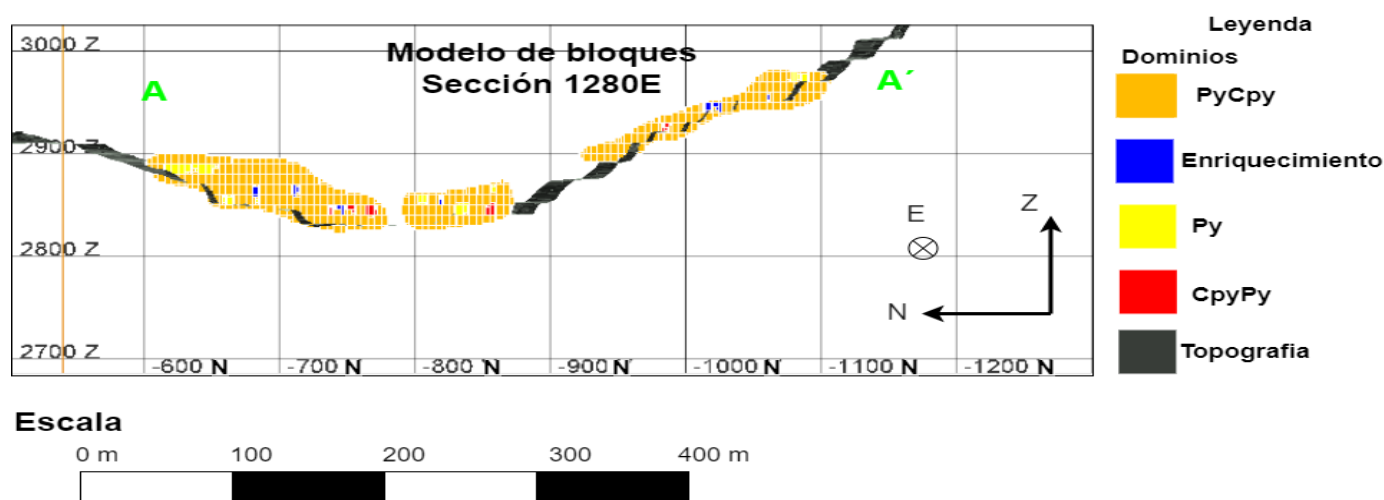


Figura 4.4: Sección 1280E del modelo de bloques categorizados.

Estimación de variables.

La estimación de los minerales se realizó de acuerdo con los parámetros mencionados en el capítulo de metodología. Se realizaron un total de 24 estimaciones de los minerales sulfurados de cobre-hierro (Calcopirita, Pirita y Covelina-Calcosina). Estas estimaciones se generaron de acuerdo con la zona mineral y a la mineralogía. En el anexo 6 se presenta un resumen de los parámetros utilizados para cada estimación y el porcentaje relativo de bloques estimados.

Validación del modelo de bloques.

La validación del modelo es una de las etapas más importantes de este estudio, es por esto que se procedió a seguir la metodología antes mencionada. Para la validación visual se mapearon un total 54 muestras al azar que se distribuyen en diferentes bancos de la mina Rajo Sur (Anexo 7).

En el anexo 8 se muestra la estadística de cada mineral estimado y mapeado. Se observa que los datos de calcopirita se correlacionan de manera positiva, estos no presentan una diferencia significativa. En cuanto a la Pirita estas presentan una mayor diferencia, esto se puede deber a una posible subestimación en la primera etapa de mapeo. La Covelina–Calcosina se encuentran en niveles que son similares, esto debido a la poca presencia que este tiene en el mapeo y en la estimación.

Para la validación del modelo de bloques con registros mineralógicos mensuales, se utilizaron un total de 21 registros mensuales, 14 corresponden a registros de diciembre del 2021 y 7 corresponden a septiembre del 2022. En anexo 9 se muestra la estadística entre los registros mineralógicos y el modelo de bloques estimado. Se observa que la correlación entre los minerales es variada. En cuanto la Pirita se observa que la correlación entre las unidades estimadas y los registros mensuales presentan un error del 66% para septiembre y 62% para diciembre, para el mineral Pirita, la estimación no resultó favorable. En el caso de los minerales Calcopirita y Calcosina–Covelina presentan errores similares al momento de comparar entre los registros mineralógicos y los bloques estimados, además que no presentan una buena correlación entre los datos.

Re-modelamiento y estimación de los cuerpos mineralógicos de sulfuros de cobre–hierro

De acuerdo con el plan de trabajo mostrado en la figura 3.1, si la estimación no se correlaciona con los registros históricos mensuales y la validación visual, se procederá a realizar un re-modelamiento de los cuerpos mineralógicos de sulfuros de cobre–hierro.

En la figura 4.5 se observa el re-modelamiento de los cuerpos mineralógicos. Este en comparación con lo expuesto en la figura 4.3, se observa que hay un cambio en estos cuerpos,

además, se evidencia una disminución en el dominio PyCpy y un aumento en el volumen en los dominios Py, Cppy y Enriquecimiento. Las secciones B-B' y C-C' se muestran en el anexo 10

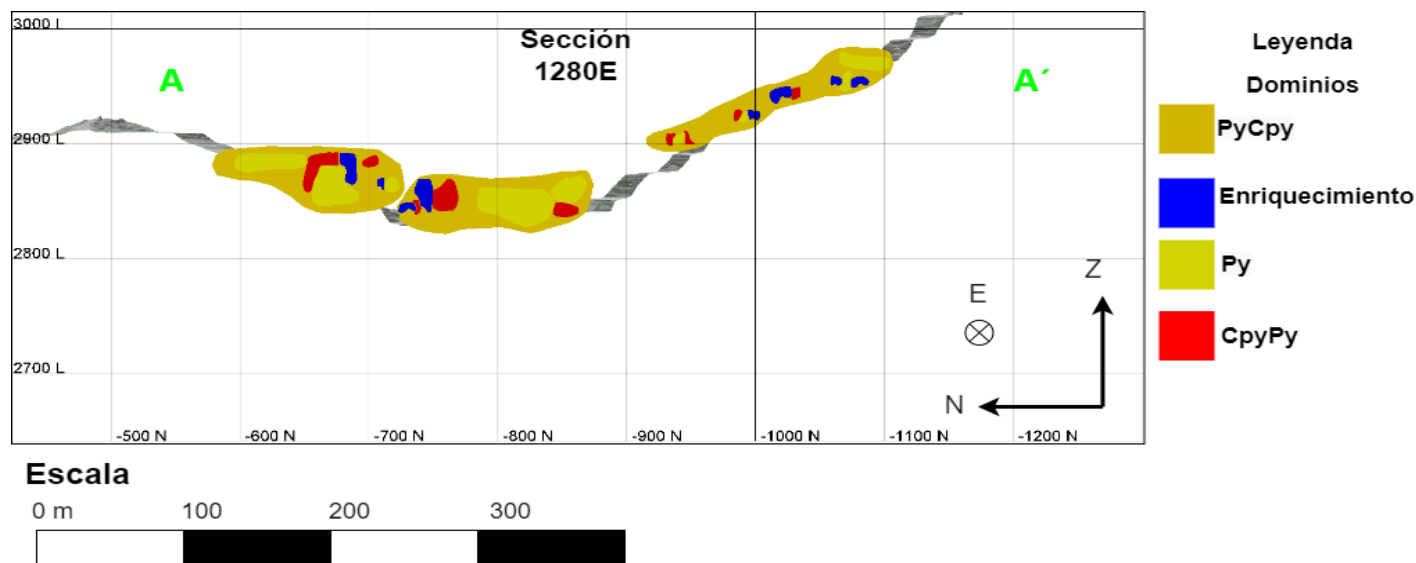


Figura 4.5: Re-modelamiento de la sección A-A' 1280E.

En el anexo 11 se muestra la estadística entre los registros históricos mensuales y el modelo de bloques estimado. Se observa que la correlación entre los minerales es poco variada, si bien presenta una leve mejora en las correlaciones, estos no resultan ser buenas estimaciones en comparación con los registros mineralógicos mensuales. En el anexo 12 se muestra la estadística de los minerales estimados y mapeados. Se observa que la calcopirita presenta una correlación positiva y no presenta una gran diferencia. La Pirita presenta una mejora en comparación con la validación anterior (anexo 8) mostrando valores más similares a lo mapeado. Sin embargo, en Covelina-calcosina, este no presenta una mayor diferencia con la estimación anterior.

Discusiones

Representatividad de la muestra.

Como se mencionó anteriormente, las muestras presentan una serie de errores acumulativos que inician en la etapa de perforación en el Rajo Sur, más específicamente en la etapa de muestreo, por lo que la representatividad de la muestra depende de la calidad del muestreo. Si un muestreo no cumple con los instructivos de muestreo de pozos de tronadura (ICE-131-210-011), se puede generar un error en la representatividad de esta. Además, La muestra especial se compone de 50 a 100 gramos de detritos, pero cuando se produce el pozo de tronadura de 10 metros de profundidad de este se extrae un cono de detritos que aproximadamente contiene 300 a 500 kilos de este material, es por esto que la muestra es poco representativa en comparación con el volumen total extraído del pozo.

Reconocimiento de variables medidas en lupa binocular

Autores tales como Sironvalle (2002) indican que el muestreo de pozos de tronadura tiene un factor de error alto, porque en los procesos de gabinetes se necesita de un análisis visual de la muestra, debido a que el ojo humano no está preparado para calcular la proporción exacta de un elemento en una muestra. Siguiendo esta metodología se puede generar una subestimación o sobreestimación de las variables medidas.

Generación de dominios

En la etapa de generación de dominios, específicamente en la obtención de criterios de categorización, se puede generar un error debido a una subestimación o sobreestimación de los rangos de dominio de los minerales. Estos se basaron en los quiebres de pendiente de frecuencia acumulada de los gráficos mostrados en el anexo 5, estos quiebres se analizaron de forma visual y esto puede implicar un error en el análisis de los rangos obtenidos en la tabla 5.

Otras metodologías por implementarse

En paralelo a este proyecto, se está generando otra metodología de estimación de unidades geometalúrgicas en base a sulfuros de cobre-hierro, que utiliza modelos predictivos a partir de las leyes de cobre, hierro, azufre y cobre no soluble. Este presenta una correlación de los datos de un 0.94 y un error absoluto de 0.024 (SGL-INF-0045-2022).

Conclusiones y Recomendaciones

El propósito general de este trabajo de título es la generación de un modelo mineralógico de sulfuros de cobre-hierro con base en la captura de información geológica, para esto se trabajó con la metodología de mapeo de pozos de tronadura, obtención de dominios, modelamiento y posterior estimación y generación del modelo de bloques. Una de las etapas más importante de este estudio es la validación del modelo de bloques, este se efectuó con base en registros mineralógicos mensuales y registros mapeados al azar. Las correlaciones entre las muestras mapeadas al azar y el modelo son positivas para los minerales Calcopirita y Covelina-Calcosina, en cambio para la Pirita, los valores son más bajos en comparación con las muestras mapeadas. La validación del modelo con base en mineralogía mensual resultó de forma negativa para el modelo. Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La caracterización de zonas minerales con base en el mapeo y captura de datos geológicos de pozos de tronadura es esencial para la metodología, debido a que constituye un gran soporte de datos. Sin embargo, los datos obtenidos se ven afectados por desviaciones puntuales tanto en el error en la detección del mineral y errores en la proporción asignada.
- El producto final con base en datos geológicos obtenidos a través del mapeo de pozos de tronadura presenta bajas correlaciones entre los registros mensuales y

las estimaciones del modelo. Esto debido a los errores heredados desde la fase de caracterización, se puede asociar a una subestimación de los minerales y/o total de minerales sulfurados de cobre-hierro.

- Este modelo resulta ser un producto no valido por medio de la validación de los registros mineralógicos mensuales.
- Se realizó una segunda etapa de modelamiento, mostrando resultados similares a la primera etapa, esto convalida la idea de que los errores causados en la fase de caracterización afectan a la estimación.
- Finalmente, el uso de esta metodología presenta un potencial para la implementación a corto plazo, entregando mineralogía en un tiempo relativamente corto, pero este debe presentar mejoras para que, en futuras proyecciones de trabajos realizados a través de esta metodología, no se presenten los errores obtenidos en este estudio.

En base a los resultados y conclusiones de este trabajo, las recomendaciones para futuros trabajos realizados en función de esta metodología son:

- Establecer mayor rigurosidad o incrementar la cantidad de lecturas al momento de mapear las muestras de pozos de tronadura, esto debido a la posible subestimación o sobreestimación de los datos geológicos obtenidos durante este proceso.
- En la etapa de estimación del modelo, usar estimadores que tengan una mayor cantidad de información. Para este caso, usar el estimador de Krigging, este ocupa la herramienta de variografía que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida.
- Por último, en la validación del modelo, se recomienda que se adicione otra forma de validación. Esta puede ser la obtención de muestras de sectores estimados y obtener un factor de error entre lo estimado y mapeado.

Referencias

- Álvarez, L.** (1990). Perfil de alteración y mineralización supérgena en el yacimiento El Teniente, Rancagua, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, 99p. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas. Antofagasta, Chile.
- Arévalo, A., Skewes, A., Stern, C., Floody, R., Goldfarb, R., Nielsen, R. y Zúñiga, P.** (2002). The giant El Teniente, breccia deposit: hypogene copper distribution and emplacement. *Integrated methods for discovery: Global exploration in the Twenty-first Century*, 9, 299–332.
- Arredondo, C.** (1994). *Distribución, caracterización y génesis de los cuerpos de brechas del sector central este del yacimiento El Teniente* Santiago, Universidad de Chile, Depto de Geología y Geofísica Memoria de Título, 99.
- Barnes, M.P.** (1980). Computer-Assisted Mineral Appraisal and Feasibility. New York, Soc. Min. Eng. 167p.
- Camus, F.** (1975). Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wall-rock alteration. *Economic geology*, 70(8), 1341–1372.
- Cannell, J., Cooke, D. R., Walshe, J. L., & Stein, H.** (2005). Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu–Mo deposit. *Economic Geology*, 100(5), 979–1003.
- Cuadra C., P.** 1986, GEOCRONOLOGIA K–Ar DEL YACIMIENTO EL TENIENTE Y AREAS ADYACENTES. *Revista Geológica de Chile*, 0(27).
- Garrido, I.** (1995). *Geología estructural del distrito y la mina El Teniente y situación geodinámica regional. Proyecto Geodinámico Mina El Teniente*. Proyecto API–1–1689. Reporte interno, CODELCO–Chile, División El teniente. Superintendencia de Geología, (1), 61 p. Rancagua.

- Harrison, D. (2009).** Caracterización estructural bajo el nivel Teniente 8 mediante el análisis de sondajes ortogonales orientados para el proyecto nuevo nivel mina, yacimiento El Teniente, Chile. *Geological Department*.
- Hitschfeld, M. (2006).** Petrografía y geoquímica de los intrusivos leucocráticos del sector sur este del yacimiento El Teniente, VI región, Chile. Unpublished Honours thesis, 120
- ICE 131–210–001 (2016)** Instructivo de Muestreo Pozos de Tronadura.
- Ossandón, G., (1974).** Petrografía y alteración del pórfido dacítico, yacimiento El Teniente. Memoria para optar al título de Geólogo. 189 p. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología. Santiago, Chile.
- Rabbia, O. M., Hernández, L. B., French, D. H., King, R. W., & Ayers, J. C. (2009).** The El Teniente porphyry Cu–Mo deposit from a hydrothermal rutile perspective. *Mineralium Deposita*, 44(8), 849–866.
- Sironvalle, M. A. A. (2002).** Introducción al muestreo minero. Santiago de Chile.
- SGL–INF–0045–2022 (2022),** Informe de modelamiento de unidades geo metalúrgicas de mineralogía base sulfuro 2022 Yacimiento El Teniente, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo. Codelco División El Teniente.
- SGL–I–123/2012 (2012).** Informe interno. Gerencia de recursos mineros y desarrollo. Codelco División El Teniente.
- Skewes, M. A., & Stern, C. R. (1994).** Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu–rich breccia pipes in the Andes of central Chile. *Geology*, 22(6), 551–554.
- Skewes, M. A., & 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*, 37(10), 893–909.
- Skewes, M. A., & Stern, C. R. (2007).** Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente Porphyry Cu–Mo deposit—a discussion. *Economic Geology*, 102(6), 1165–1170.
- Stern, C. R., Skewes, M. A., & Arévalo, A. (2011).** Magmatic evolution of the giant El Teniente Cu–Mo deposit, central Chile. *Journal of Petrology*, 52(7–8), 1591–1617.

Memoria Codelco 2021. (2021b). Codelco, 28.

Vry, V. H., Wilkinson, J. J., Seguel, J., & Millán, J. (2010). Multistage intrusion, brecciation, and veining at El Teniente, Chile: Evolution of a nested porphyry system. *Economic Geology*, 105(1), 119–153.

Anexos

Anexo 1: Muestra especial llamada cutting vista bajo lupa binocular.



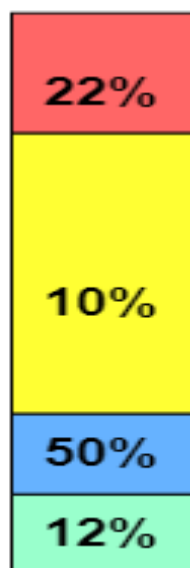
Anexo 2: Cartilla de mapeo de pozos de tronadura

Geologo	FECHA	BANCO	POZO	E	N	Z	Profundidad	Litología	Total Sulfuro	Calcopirita	Pirita	Bornita	Calcosina	Covelina	Sulfosales de Cu	Oxidu	Caracterización	Cag_code
MCL	01-09-2022	2870	1036	1374	-755	2881	10,7	TON	6,0	10	80	0	5	5	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	01-09-2022	2870	3020	1363	-767	2881	10,7	TON	4,0	25	75	0	0	0	0	0	PyCpy	2
MCL	01-09-2022	2740	3427	944	-752	2750	10,2	CMET	9,0	2	90	0	8	0	0	0	Py	1
MCL	01-09-2022	2870	3021	1363	-772	2881	10,7	TON	12,0	15	75	0	10	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	02-09-2022	2870	1039	1375	-773	2882	12,5	TON	7,0	13	85	0	2	0	0	0	Py	1
MCL	02-09-2022	2870	2017	1348	-714	2879	9,41	TON	9,0	13	80	2	3	2	0	0	Py	1
MCL	02-09-2022	2870	2020	1369	-760	2881	10,7	TON	12,0	15	84	1	0	0	0	0	Py	1
MCL	02-09-2022	2870	2021	1370	-770	2881	10,9	TON	4,0	30	60	0	5	0	0	5	PyCpy	2
MCL	05-09-2022	2870	2018	1369	-743	2881	10,7	TON	3,0	40	50	0	10	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	05-09-2022	2870	1033	1372	-744	2882	12,5	TON	2,0	40	55	0	5	0	0	0	PyCpy	2
MCL	05-09-2022	2870	96	1369	-754	2881	11,1	TON	5,0	12	85	0	3	0	0	0	Py	1
MCL	05-09-2022	2870	4018	1355	-759	2880	10,2	TON	8,0	23	75	0	2	0	0	0	Py	1
MCL	05-09-2022	2870	1038	1375	-765	2881	11,2	TON	3,0	55	35	0	5	5	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	05-09-2022	2870	4016	1353	-740	2879	9,47	TON	3,0	55	40	0	5	0	0	0	CpyPy	3
MCL	05-09-2022	2870	4020	1356	-774	2881	10,7	TON	3,5	45	55	0	5	0	0	0	CpyPy	3
MCL	05-09-2022	2870	3017	1359	-740	2880	10,1	TON	2,5	25	70	0	5	0	0	0	PyCpy	2
MCL	06-09-2022	2870	3019	1362	-758	2880	10,4	TON	3,0	35	60	0	5	0	0	0	PyCpy	2
MCL	06-09-2022	2870	3018	1361	-746	2880	10,3	TON	7,0	25	75	0	0	0	0	0	PyCpy	2
MCL	06-09-2022	2870	1031	1372	-731	2882	11,9	TON	5,0	10	90	0	0	0	0	0	Py	1
MCL	06-09-2022	2870	105	1351	-742	2880	9,73	TON	5,0	15	85	0	0	0	0	0	Py	1
MCL	06-09-2022	2870	107	1351	-750	2880	10,1	TON	3,0	50	45	0	0	5	0	0	CpyPy	3
MCL	06-09-2022	2870	108	1351	-758	2880	10,1	TON	1,5	60	35	0	0	5	0	0	Py	1
MCL	06-09-2022	2870	111	1352	-769	2881	10,7	TON	10,0	15	75	5	5	0	0	0	Py	1
MCL	08-09-2022	2860	1	1290	-682	2869	8,75	TON	3,0	20	40	0	30	0	0	10	Enriquecimiento	5
MCL	08-09-2022	2860	2	1284	-673	2869	9,01	TON	15	20	75	0	0	5	0	0	Py	1
MCL	08-09-2022	2860	3	1278	-669	2869	9,14	TON	2	30	65	0	5	0	0	0	PyCpy	2
MCL	12-09-2022	2870	4017	1353	-751	2880	9,97	TON	2,5	45	50	0	0	5	0	0	CpyPy	3
MCL	13-09-2022	2830	8037	1216	-755	2840	10,3	TON	3	50	35	0	15	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	13-09-2022	2830	8035	1201	-743	2840	10,4	TON	2	45	35	0	20	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	13-09-2022	2830	7041	1242	-757	2840	10,4	TON	2,5	30	50	0	20	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	13-09-2022	2830	8036	1211	-749	2840	10,2	TON	2,5	50	30	0	20	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	13-09-2022	2830	8038	1223	-761	2840	10,4	TON	3	50	30	0	20	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	13-09-2022	2830	7039	1229	-746	2840	10,2	TON	2	65	5	0	30	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	13-09-2022	2830	7038	1223	-742	2840	10,1	TON	2	50	20	0	30	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	13-09-2022	2830	7036	1208	-731	2840	9,88	TON	1,5	30	20	0	50	0	0	0	Enriquecimiento	5
MCL	13-09-2022	2830	7101	1199	-733	2840	9,58	TON	4	65	15	0	20	0	0	0	Enriquecimiento	5

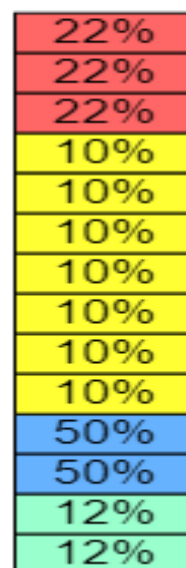
Anexo 3: Ejemplo de composición de muestras

**Comparacion entre
pozos sin compositar y
compositado**

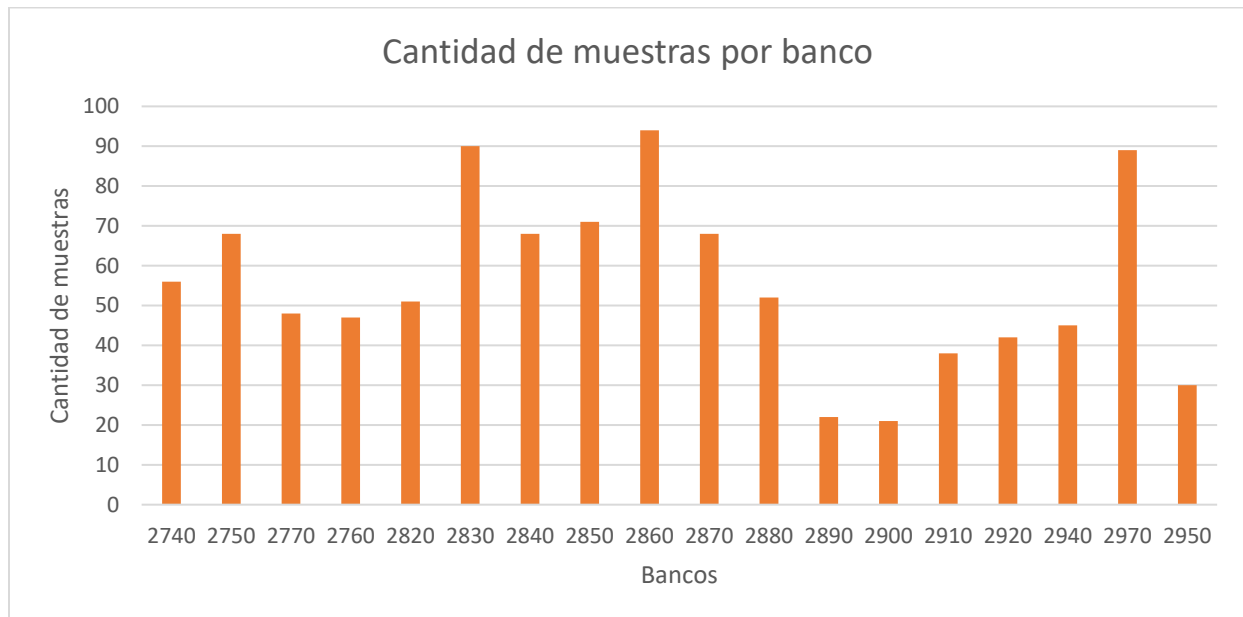
**Pozo sin
compositar**



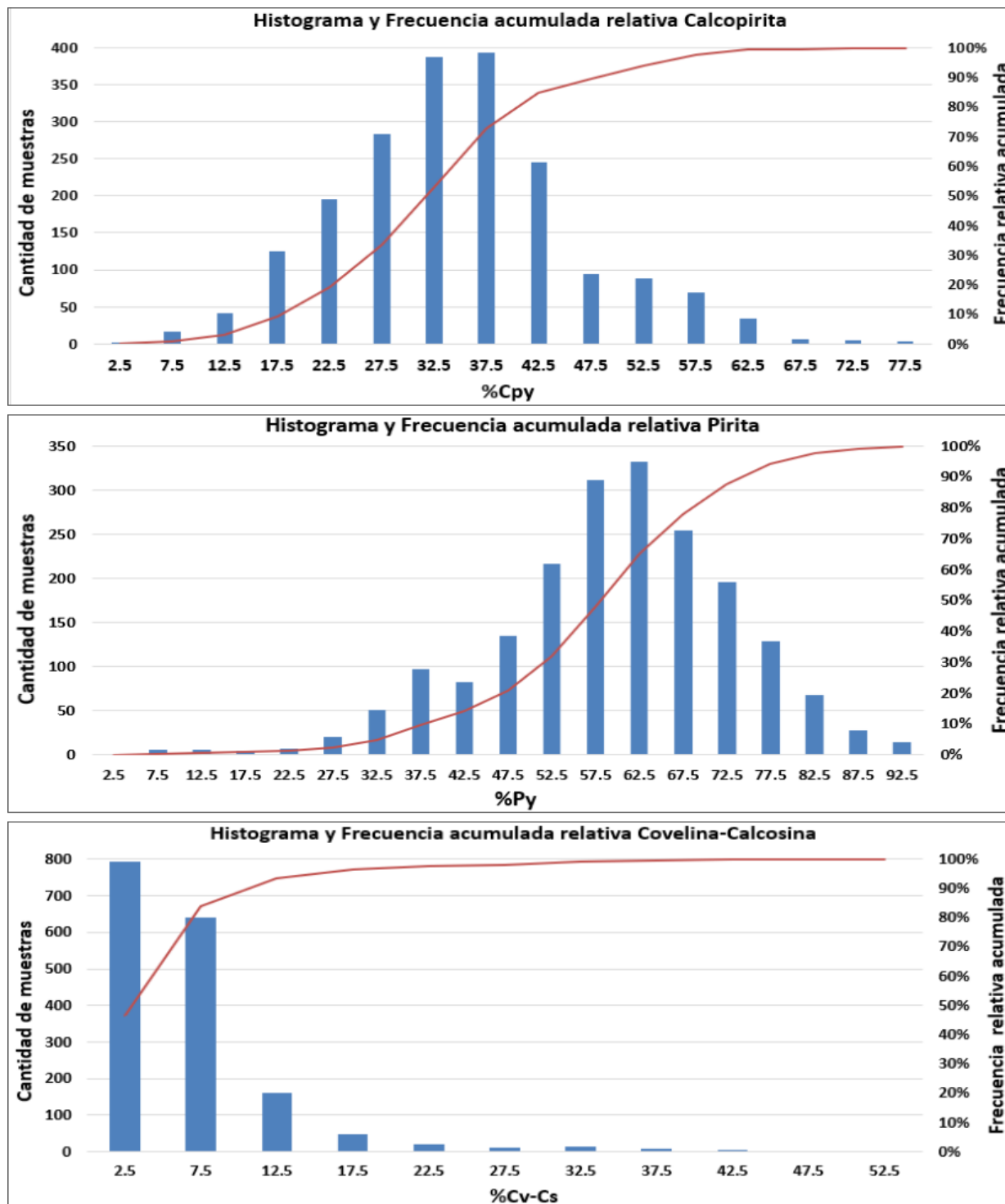
**Pozo
compositado**



Anexo 4: Cantidad de muestras por banco



Anexo 5: Histogramas de color azul que representa la cantidad de muestras y de color rojo se representa las frecuencias relativas acumuladas de los porcentajes relativos de Pirita, Calcopirita y Covelina-Calcosina.



Anexo 6: parámetros y porcentaje de los bloques estimados.

Estimación Inverso a la distancia al cuadrado						
Mineral	Estimación	Zona mineral	Distancia de búsqueda (m)	Muestras para la estimación		Porcentaje estimado
				Mínimo	Máximo	
Calcopirita	1	1	10	2	6	23.5%
		2				7.7%
		3				12.9%
		4				1.0%
	2	1	20	1	8	98.1%
		2				57.7%
		3				87.8%
		4				2.0%
Pirita	1	1	10	2	6	26.4%
		2				8.60%
		3				14.70%
		4				1%
	2	1	20	1	8	98%
		2				61.10%
		3				88.70%
		4				2%
Calcosina-Covelina	1	1	10	2	6	6.1%
		2				5%
		3				12.50%
		4				1%
	2	1	20	1	8	6%
		2				55%
		3				86.10%
		4				2%

Anexo 7: Muestras Validación visual

cadena	Geologo	FECHA	BANCO	POZO	E	N	Z	Profundidad	Litología	Total Sulfuro	Calco pinta	Pirita	cv-cs	Sulfosales de C	Oxidu	Total normaliza	Caracterización	Cag_code
10452860	MCL	13-12-2022	2860	1045	1342,69	-706,964	2870,1	10,1	TON	2	35	60	5	0	0	100	PyCpy	2
10462860	MCL	13-12-2022	2860	1046	1337,84	-704,165	2870,1	10,1	TON	3	30	65	5	0	0	100	PyCpy	2
10472860	MCL	13-12-2022	2860	1047	1335,66	-701,583	2869,99	9,99	TON	5	40	50	10	0	0	100	Enriquecimiento	5
10432860	MCL	13-12-2022	2860	1043	1347,83	-716,075	2870,03	10,03	TON	4	30	60	10	0	0	100	Enriquecimiento	5
10492860	MCL	13-12-2022	2860	1049	1328,43	-695,029	2870,06	10,06	TON	2,5	20	75	5	0	0	100	Py	1
20222860	MCL	13-12-2022	2860	2022	1348,76	-721,981	2869,47	9,47	TON	3	20	70	10	0	0	100	Enriquecimiento	5
20242860	MCL	13-12-2022	2860	2024	1337,46	-708,324	2869,97	9,97	TON	2,5	20	80	0	0	0	100	Py	1
10442860	MCL	13-12-2022	2860	1044	1344,62	-710,88	2869,95	9,95	TON	3	10	80	0	10	0	100	Py	1
10482860	MCL	13-12-2022	2860	1048	1331,79	-698,315	2869,91	9,91	TON	4	10	85	5	0	0	100	Py	1
20232860	MCL	13-12-2022	2860	2023	1344,02	-715,548	2869,82	9,82	TON	2	10	90	0	0	0	100	Py	1
50562830	MCL	13-12-2022	2830	5056	1235,21	-838,123	2840,82	10,82	TON	3	10	90	0	0	0	100	Py	1
50542830	MCL	13-12-2022	2830	5054	1245,69	-822,545	2840,32	10,32	TON	3,5	20	80	0	0	0	100	Py	1
60522830	MCL	13-12-2022	2830	6052	1240,15	-817,531	2840,47	10,47	TON	4	40	60	0	0	0	100	PyCpy	2
60512830	MCL	13-12-2022	2830	6051	1246,59	-811,403	2840,5	10,5	TON	3,5	35	65	0	0	0	100	PyCpy	2
61222830	MCL	13-12-2022	2830	6122	1238,43	-812,36	2840,29	10,29	TON	5	40	60	0	0	0	100	PyCpy	2
50552830	MCL	13-12-2022	2830	5055	1240,67	-829,957	2840,42	10,42	TON	4	35	65	0	0	0	100	PyCpy	2
60532830	MCL	13-12-2022	2830	6053	1236,39	-826,017	2840,34	10,34	TON	3,5	40	60	0	0	0	100	PyCpy	2
60542830	MCL	13-12-2022	2830	6054	1230,18	-832,442	2840,73	10,73	TON	3	35	60	5	0	0	100	PyCpy	2
20512970	MCL	13-12-2022	2970	2051	1345,63	-1037,43	2982,11	12,11	TON	3,5	45	55	0	0	0	100	Py	1
11042970	MCL	13-12-2022	2970	1104	1368,61	-1017,61	2983,3	13,3	TON	5	40	60	0	0	0	100	PyCpy	2
11052970	MCL	13-12-2022	2970	1105	1366,73	-1019,87	2979,74	9,74	TON	4	50	45	5	0	0	100	CpyPy	3
10862970	MCL	13-12-2022	2970	1086	1385,27	-986,946	2978,64	8,64	TON	2,5	30	65	5	0	0	100	PyCpy	2
10902970	MCL	13-12-2022	2970	1090	1378,02	-1004,28	2982,39	12,39	TON	2	30	70	0	0	0	100	PyCpy	2
20492970	MCL	13-12-2022	2970	2049	1375,17	-999,051	2982,5	12,5	TON	1,5	20	80	0	0	0	100	Py	1
50532830	MCL	14-10-2022	2830	5053	1250,85	-817,651	2840,28	10,28	TON	4	20	80	0	0	0	100	Py	1
61242830	MCL	14-10-2022	2830	6124	1229,58	-825,493	2840,36	10,36	TON	4	40	60	0	0	0	100	PyCpy	2
61232830	MCL	14-10-2022	2830	6123	1234,43	-818,231	2840,31	10,31	TON	2,5	30	65	5	0	0	100	PyCpy	2
40562830	MCL	14-10-2022	2830	4056	1254,06	-824,626	2840,27	10,27	TON	3	55	45	0	0	0	100	CpyPy	3
40552830	MCL	14-10-2022	2830	4055	1260,43	-817,991	2840,19	10,19	TON	3	35	60	5	0	0	100	PyCpy	2
30592830	MCL	14-10-2022	2830	3059	1253,3	-838,853	2840,57	10,57	TON	3,5	35	60	5	0	0	100	PyCpy	2
40572830	MCL	14-10-2022	2830	4057	1249,61	-831,156	2840,34	10,34	TON	2,5	30	60	10	0	0	100	Enriquecimiento	5
40582830	MCL	14-10-2022	2830	4058	1245,01	-838,726	2840,52	10,52	TON	2	25	70	5	0	0	100	PyCpy	2
11162970	MCL	14-10-2022	2970	1116	1331,35	-1056,47	2978,38	8,38	TON	2	60	35	5	0	0	100	Py	1
30732970	MCL	14-10-2022	2970	3073	1372,55	-996,182	2978,6	8,6	TON	2,5	40	50	10	0	0	100	Enriquecimiento	5

Anexo 8: Comparación de datos estadísticos entre resultados de muestras mapeadas y las unidades de estimación.

Calcopirita

	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	0.91	1.4	0.51	0.90	0.20	0.22	0.04	0.87
Mapeado	1.02	2	0.40	0.95	0.39	0.39	0.15	

Pirita

	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	1.50	2.4	0.8	1.40	0.38	0.25	0.14	0.77
Mapeado	1.75	3.4	0.50	1.65	0.67	0.39	0.45	

Calcosina-Covelina

	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	0.11	0.18	0	0.11	0.04	0.33	0.001	0.62
Mapeado	0.19	0.6	0.00	0.13	0.15	0.83	0.024	

Anexo 9: Comparación de datos estadísticos entre las unidades de estimación y los registros mineralógicos mensuales.

**Diciembre del
2021**

Calcopirita	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
	Estimado	0.72	1.06	0.18	0.75	0.24	34	0.06
	Real	0.35	1.07	0.02	0.05	0.41	119	0.17

Pirita	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
	Estimado	1.93	8.1	0.97	1.5	1.79	93	3.2
	Real	5.09	7.02	2.39	5.78	1.86	37	3.46

Covelina-Calcosina	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
	Estimado	0.12	0.16	0	0.12	0.04	34	0
	Real	0.49	0.75	0.17	0.59	0.2	41	0.04

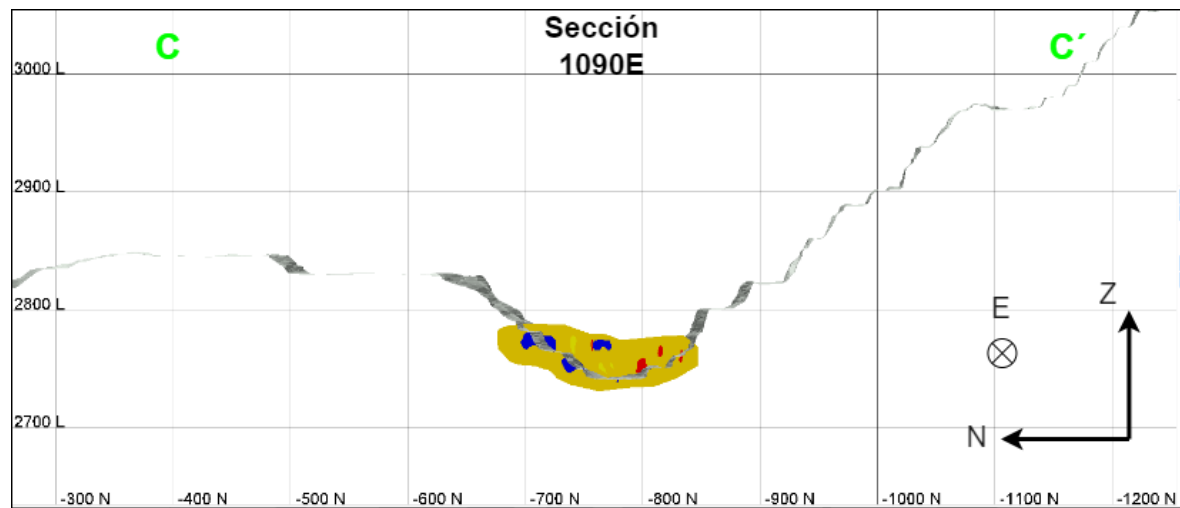
**Septiembre del
2022**

Calcopirita	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
	Estimado	0.85	0.95	0.72	0.82	0.09	11	0.01
	Real	0.55	1.2	0.02	0.48	0.53	96	0.28

Pirita	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
	Estimado	1.71	2.05	1.54	1.66	0.16	10	0.03
	Real	5.03	6.69	4.31	4.85	0.83	16	0.69

Covelina-Calcosina	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
	Estimado	0.14	0.15	0.12	0.14	0.01	7	0
	Real	0.35	1.04	0.05	0.3	0.34	98	0.12

Anexo 10: Sección B-B' y C-C'

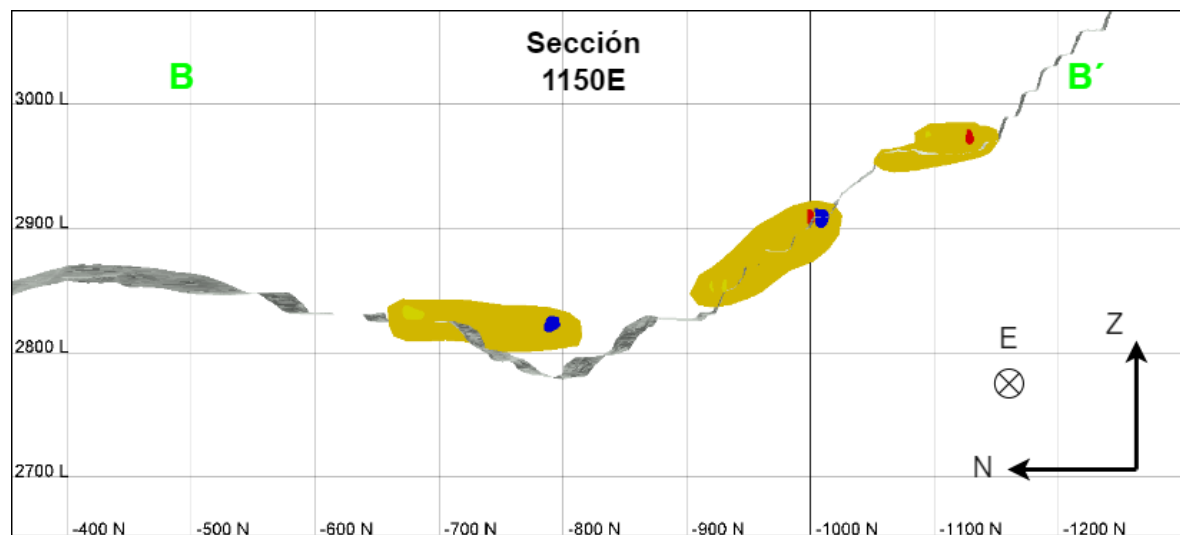
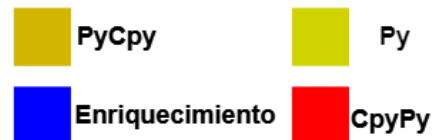


Escala



Leyenda

Dominios

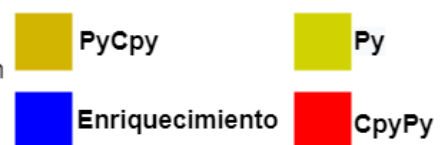


Escala



Leyenda

Dominios



Anexo 11: Comparación de datos estadísticos entre las unidades de estimación y los registros mineralógicos mensuales de la etapa de re-modelamiento.

Diciembre del 2021

Calcopirita	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	0.74	1.07	0.37	0.72	0.23	31.30	0.05	0.49
Real	0.25	0.88	0.02	0.05	0.33	133.24	0.11	

Pirita	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	1.54	2.49	1.04	1.42	0.38	24.58	0.14	0.21
Real	4.73	7.13	1.86	5.42	1.83	38.71	3.36	

Calcosina-Covelina	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	0.13	0.16	0.09	0.13	0.02	14.40	0.00	0.89
Real	0.54	1.00	0.19	0.59	0.24	44.35	0.06	

Septiembre del 2022

Calcopirita	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	0.82	1.06	0.53	0.81	0.16	19.06	0.02	0.59
Real	0.50	1.21	0.02	0.48	0.45	90.12	0.20	

Pirita	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	1.68	2.00	1.42	1.66	0.16	9.66	0.03	0.06
Real	4.93	6.68	4.03	4.79	0.85	17.18	0.72	

Calcosina-Covelina	Media (%)	Máxima (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)	Desviación estandar	Coefficiente de variación	Varianza	R ²
Estimado	0.14	0.15	0.13	0.14	0.01	7.31	0.00	0.56
Real	0.37	1.09	0.06	0.30	0.34	93.94	0.12	

Anexo 12: Datos estadísticos de la estimación del re-modelamiento de los cuerpos mineralógicos en comparación con datos mapeados aleatoriamente.

Calcopirita		Máxima	Mínimo	Mediana	Desviación	Coeficiente		
	Media (%)	(%)	(%)	(%)	estandar	de variación	Varianza	R2
Estimado	0.88	1.5	0.3	0.89	0.26	0.30	0.07	0.83
Mapeado	1.02	2	0.4	0.95	0.39	0.39	0.15	

Pirita		Máxima	Mínimo	Mediana	Desviación	Coeficiente		
	Media (%)	(%)	(%)	(%)	estandar	de variación	Varianza	R2
Estimado	1.48	2.4	0.5	1.40	0.41	0.28	0.16	0.81
Mapeado	1.75	3.4	0.5	1.65	0.67	0.39	0.45	

Covelina- Calcosina		Máxima	Mínimo	Mediana	Desviación	Coeficiente		
	Media (%)	(%)	(%)	(%)	estandar	de variación	Varianza	R2
Estimado	0.12	0.2	0	0.13	0.04	0.31	0.00	0.68
Mapeado	0.19	0.6	0	0.13	0.15	0.83	0.02	