



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



GENERACIÓN DE MODELO GEOTÉCNICO DE INTENSIDAD DE ESTRUCTURAS POR UNIDAD DE VOLUMEN PARA BLOQUE 1 Y BLOQUE 2, MINA ESMERALDA, DIVISIÓN EL TENIENTE, REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O'HIGGINS, CHILE

Memoria para optar al Título de Geóloga

Violeta Pilar Ríos Vásquez

Profesor Patrocinante: Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra
Profesional Guía: Sra. Paulina Victoria Schachter Valdés
Profesores Comisión: Msc. Abraham Elías González Martínez
Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

Concepción, 2019

ÍNDICE

Página

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	1
1.1.1. Objetivos Generales	1
1.1.2. Objetivos Específicos	1
1.2. Ubicación y accesos	2
1.3. Metodología de trabajo	3
1.3.1. Etapa de revisión y recopilación de antecedentes	3
1.3.2. Etapa de mapeo de sondeos	3
1.3.3. Etapa de análisis y modelamiento	5
1.4. Fisiografía y clima	6
1.4.1. Fisiografía	6
1.4.2. Clima	8
1.5. Trabajos anteriores	9
1.6. Agradecimientos	11
2. MARCO GEOLÓGICO	12
2.1. Generalidades	12
2.2. Geología Regional	12
2.2.1. Rocas Estratificadas	13
2.2.1. Rocas intrusivas	15
2.2.3. Estructuras	16
2.3. Marco Geotectónico	18
2.4. Geología de la Mina Esmeralda	19
2.4.1. Litología	20
2.4.2. Mineralización y Alteración	22
2.4.3. Geología estructural del yacimiento	24
3. MARCO TEÓRICO	26
3.1. Vetillas Blandas	26
3.1.1. Caracterización de las vetillas selladas	26
3.1.2. Sistema de clasificación	28
3.1.3. Resistencia de las vetillas	33
3.2. Método de Explotación	35
3.2.1. Block-Caving y fragmentación	35
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	37
4.1. Unidades Litológicas	37
4.2. Zona Minera	42
4.3. Zona Geotécnica	45
4.3.1. Tipo de mena	46
4.3.2. Litología y frecuencia de vetillas	47

4.3.3. Definición de zonas geotécnicas	53
4.4. Definición de Unidades de Estimación y Modelo de Bloques ...	55
5. CONCLUSIONES	58
6. REFERENCIAS	60
7. ANEXOS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapeo de ubicación de El Teniente	2
1. 2. Mapa de ubicación de labores Esmeralda	3
1. 3. Mapa de unidades morfológicas de la VI región	7
1. 4. Mapa de zonas climáticas	8
2. 1. Mapa geológico regional de la franja cordillerana de Chile Central	12
2. 2. Zonas de falla relacionadas a El Teniente	17
2. 3. Ubicación del “flat slab” que separa la ZVC de la ZVS	18
2. 4. Mapa litológico de Bloque 1 y Bloque 2 que conforman la Mina Esmeralda	22
2. 5. Zona de Falla El Teniente (ZFT)	25
3. 1. Stockwork en roca primaria en mina El Teniente	26
3. 2. Características de una vetilla	27
3. 3. Vetillas Tardimagmáticas parte I	30
3. 4. Vetillas Tardimagmáticas parte II	31
3. 5. Vetillas Hidrotermales Principales	32
3. 6. Vetillas Hidrotermales Tardías	33
3. 7. Resistencia de cizalle de las vetillas según su espesor	34
3. 8. Resistencia de cizalle en función del mineral de relleno de la vetilla	34
3. 9. Método de hundimiento o <i>Caving</i>	35
3.10. Etapas de fragmentación	36
4. 1. Estadística descriptiva y diagrama de cajas de frecuencia de vetillas por litología	39
4. 2. Estadística descriptiva y diagrama de cajas de frecuencia de vetillas por litologías agrupadas	40
4. 3. Gráficos cuantil-cuantil de frecuencia de vetillas por grupo litológico	40
4. 4. Planta sector Esmeralda corta 2192	41
4. 5. Estadística descriptiva y diagrama de cajas de frecuencia de vetillas por litologías agrupadas del Bloque 1 y 2	42
4. 6. Gráfico cuantil-cuantil de frecuencia de vetillas de Brecha de Anhidrita y litologías agrupadas Bloque 1 y Bloque 2	43
4. 7. Vista en planta de los valores de frecuencia de vetillas de los sectores productivos de Esmeralda	44
4. 8. Modelo de zonación mineral	45
4. 9. Estadística descriptiva y diagrama de cajas de frecuencia de vetillas de los sectores productivos de Esmeralda	46
4.10. Vista en planta del tipo de stockwork del CMET	48
4.11. Estadística descriptiva y diagrama de cajas de frecuencia de vetillas por tipo de stockwork	49

4.12.	Gráfico cuantil-cuantil de frecuencia de vetillas de CMET	50
4.13.	Cuerpo de CMET $P_{10}>2$	51
4.14.	Gráfico cuantil-cuantil de frecuencia de vetillas de rocas intrusivas	52
4.15.	Estadística descriptiva y diagrama de cajas de frecuencia de vetillas de zonas geotécnicas	52
4.16.	Gráfico cuantil-cuantil de la frecuencia de vetillas por zona geotécnica	53
4.17.	Estadística descriptiva y diagrama de cajas de la frecuencia de vetillas por Unidad de Estimación	54
4.18.	Gráfico cuantil-cuantil de frecuencia de vetillas de las Unidades de Estimación	54
4.19.	Planta a la cota 2030 y secciones	56
4.20.	Modelo de Bloques y Planta a la cota 2192	56

ÍNDICE DE TABLAS

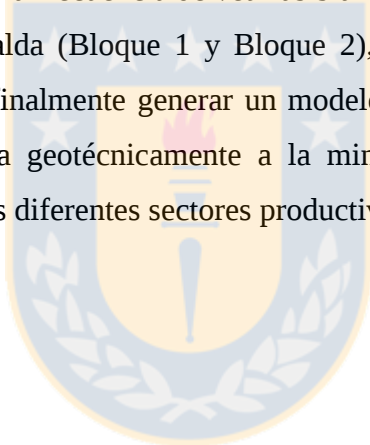
Tabla		Página
1. 1.	Asociaciones minerales	4
1. 2.	Tabla de mapeo de stockwork	4
1. 3.	Tabla de mapeo de vetillas blandas	5
2. 1.	Clasificación de estructuras según su continuidad	24
3. 1.	Tabla de clasificación de vetillas	29
4. 1.	Zonas geotécnicas	45
4. 2.	Tabla de asociación mineral	47
4. 3.	Tabla de Asociación mineral y número de zona	49
5. 1	Tabla resumen de las diferencias entre los sectores productivos de Mina Esmeralda	51

RESUMEN

El diseño y operación del proceso de explotación *caving* o hundimiento, utilizado en la mina subterránea El Teniente, depende de la fragmentación y hundimiento, de esta forma resulta fundamental tener un modelo que permita predecir y estimar el comportamiento de la roca para optimizar el proceso de explotación.

La mina El Teniente se encuentra en un macizo rocoso competente, pero con una densa red de discontinuidades llamado *stockwork*. Los numerosos estudios y ensayos geotécnicos, determinaron que el fracturamiento de estas estructuras se da con mayor frecuencia en vetillas blandas, definidas como aquellas mayores a 1 mm y con un porcentaje menor o igual al 35% de minerales duros (dureza mayor a 4 según escala de Mohs).

En la mina Esmeralda se realizó una campaña de mapeo de vetillas blandas en sondajes. A partir de esta base de datos se calcula la frecuencia de vetillas blandas por metro por litología, por sector productivo de la mina Esmeralda (Bloque 1 y Bloque 2), se definen las zonas geotécnicas y unidades de estimación, para finalmente generar un modelo geotécnico de bloques en 3D. Este modelo de bloques caracteriza geotécnicamente a la mina Esmeralda y permite predecir su comportamiento y comparar los diferentes sectores productivos.



1. INTRODUCCIÓN

La mina el Teniente, propiedad de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO-CHILE), es considerada la mina subterránea de cobre más grande del mundo. Comenzó a ser explotada en 1905 y actualmente cuenta con un área aproximada de 6 km² y con más de 3.000 km de galerías subterráneas. Entre sus unidades productivas, sobresalen los yacimientos de Diablo Regimiento, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Pipa Norte, Sur Andes Pipa, Pilar Norte y Teniente 4 Sur. También posee una operación en superficie, Rajo Sur.

La explotación se realiza mediante los métodos de hundimiento de bloques y paneles o *block caving* y *panel caving*, respectivamente (Rojas y otros, 2001). No obstante, el macizo rocoso se ha descrito como competente y de comportamiento frágil, principalmente en la zona de mena primaria, la cual aloja en un denso stockwork. En los últimos estudios geotécnicos realizados en El Teniente, se ha determinado que las estructuras geológicas más propensas a fallar durante los procesos de hundimiento y fragmentación, son las vetillas blandas y gruesas (Brzovic y Villaescusa, 2007) que componen dicho stockwork, siendo de esta manera, las principales responsables del comportamiento frágil del macizo rocoso de El Teniente.

Con el objetivo de mitigar inconvenientes y mejorar el proceso de explotación, se necesita efectuar una estimación de la estabilidad y hundibilidad de los distintos sectores del yacimiento. El presente estudio propone un modelo geotécnico basado en la frecuencia de vetillas blandas por unidad de volumen en la mina Esmeralda, con el fin de caracterizar geotécnicamente el macizo rocoso.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos generales

Elaborar un modelo geotécnico para estimar la estabilidad y hundibilidad del sector Esmeralda a partir de un modelo de bloques de valores de frecuencia de vetillas blandas.

1.1.2. Objetivos específicos

Comparar la calidad geotécnica de los sectores productivos de la mina Esmeralda, Bloque 1 y Bloque 2.

1.2. Ubicación y vías de acceso

El yacimiento El Teniente se encuentra ubicado en la cordillera andina de la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, en la comuna de Machalí, aproximadamente a 40 km al noreste de la ciudad de Rancagua y a 73 km al sureste de la ciudad de Santiago (Figura 1.1). Se encuentra emplazado entre las cotas 2.000 y 3.200 m s.n.m y en coordenadas geográficas 70°21' longitud oeste y 34°14' latitud sur.

El acceso principal a las instalaciones de El Teniente es a través de la ruta H-25, un camino asfaltado (Figura 1.1). En el kilómetro 46, se encuentra la localidad de Colón Alto, desde dónde se puede acceder al interior de la mina a través de un túnel de 8 km de extensión, por medio de un ferrocarril eléctrico. Una vía alternativa para acceder a la mina es por un desvío desde la ruta H-25 hacia la fundición Caletones por la ruta H-27, un camino asfaltado que llega hasta Sewell, un campamento minero a 3 km al oeste del yacimiento.

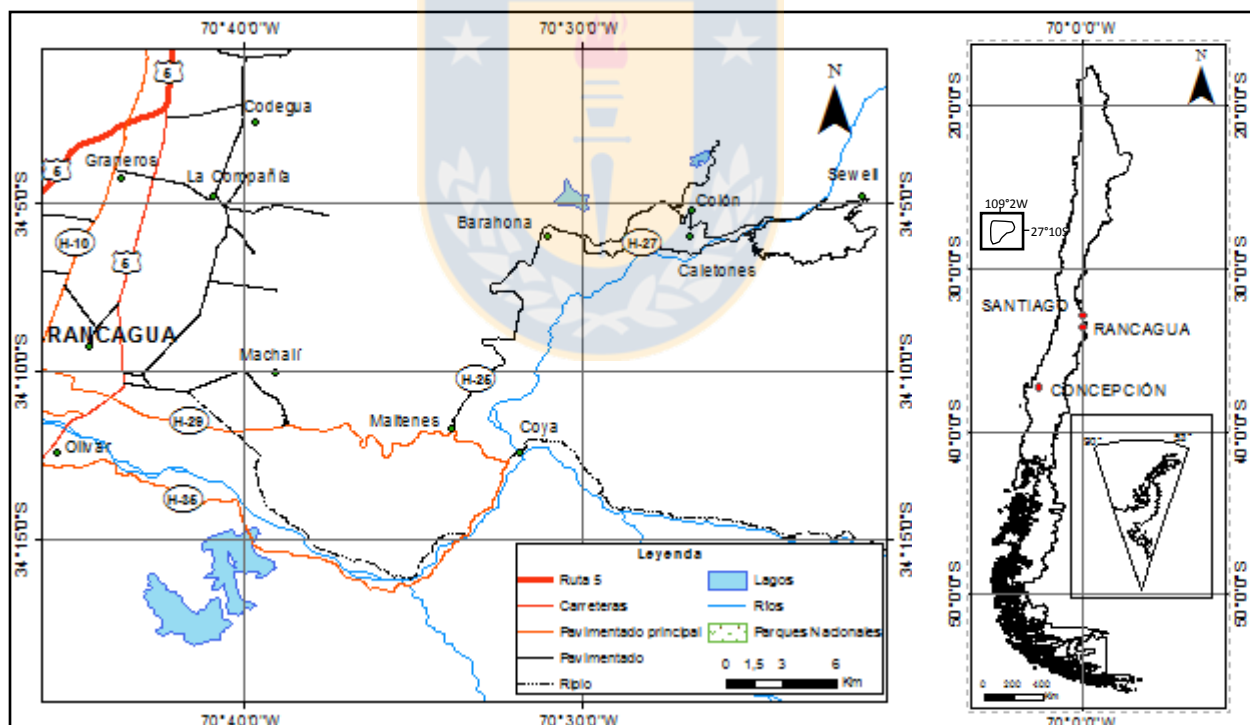


Figura 1.1: Mapa de ubicación de El Teniente.

La Mina Esmeralda se emplaza en el sector suroeste del yacimiento con una superficie de 629.000 m², y se encuentra una cota aproximada de 2.210 m s.n.m. Se divide en dos zonas mineras, Bloque 1 al oeste y Bloque 2 al este (Figura 1.2).

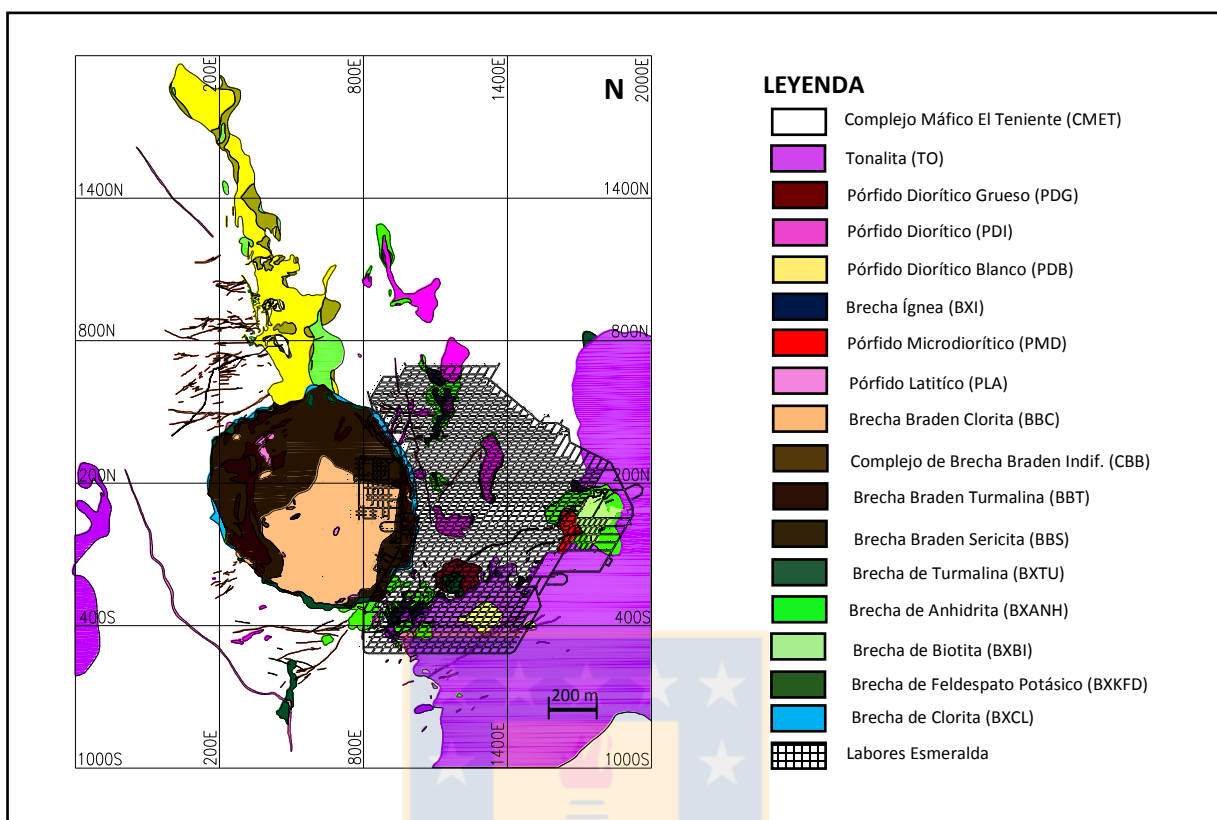


Figura 1.2 Mapa de ubicación de labores Esmeralda, cota 2.210 (De Los Santos & Ramírez, 2016).

1.3. Metodología de trabajo

Los datos utilizados para el presente estudio fueron tomados durante los meses de octubre de 2016 a septiembre de 2017 en las dependencias de Codelco División El Teniente y consiste en tres etapas:

1.3.1. Etapa de revisión y recopilación de antecedentes

Durante esta etapa se recopiló y revisó la información sobre la geología y métodos de explotación, con la finalidad de contextualizar el yacimiento, para luego analizar los trabajos anteriores relacionados con la geotecnia de El Teniente y la implicancia de las vetillas blandas.

1.3.2. Etapa de mapeo de sondajes

Selección de muestras

Se preseleccionaron tramos de 100 m de una misma litología, mena y tipo de stockwork (arreglo de vetillas, caracterizado por una asociación mineralógica predominante (Tabla 1.1), para luego seleccionar una muestra representativa de 6 m que será mapeada.

Mapeo de Stockwork

Se definieron 7 tipos de *stockwork* (Tabla 1.1). Para poder identificarlos se debe desplegar la totalidad del tramo de 100 m. Posteriormente, se revisa el relleno de las vetillas de forma general, y se definen los límites de los diferentes tipos de *stockwork* según la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Asociaciones minerales y sus números.

Asociación Mineral	N° Asoc. Min
Qz-Anh	1
Qz-Anh-Sulfuro (Moli, Cpy, Bor)	2
Qz-Anh-Ys y/o Cb	3
Cpy + (Qz, Anh, otros)	4
Cpy>Py + (Qz, Anh, otros)	5
Py>Cpy + (Qz, Anh, otros)	6
Py + (Qz, Anh, otros)	7

En la Tabla 1.2 se ingresa el tipo de mena (primario, primario con yeso o secundario), litología, el metraje del tramo de 6 m seleccionado para el mapeo geotécnico, observaciones, fecha y el tipo de stockwork (Tabla 1.1).

Tabla 1.2: Tabla de mapeo stockwork.

Sondaje	Desde	Hasta	Asc.Min	N° Asc. Min	Mena	Litología	Desde tramo	Hasta tramo	Obs	Fecha

Mapeo de detalles

El mapeo en las muestras de 6 metros se consideran las vetillas que cumplan las siguientes condiciones:

- Un relleno con un porcentaje menor o igual al 70% de cuarzo
- Espesor típico mayor o igual a 1 mm (en toda su traza)
- La vetilla debe ser trazable y cortar todo el testigo (continuidad).
- Si la vetilla se encuentra cortada por otra, pero aún así la traza es continua en toda la circunferencia del testigo, es considerada.
- Si la vetilla tiene sutura, entonces se mapea sólo la sutura. Si la vetilla es de cuarzo con una sutura mayor o igual a 1 mm, se mapea.
- Si la vetilla se adelgaza, desaparece o se encuentra desplazada por muchas vetillas, no se considera mapeable.

El levantamiento de esta información se registra en tablas de mapeo (Tabla 1.3), donde se debe indicar el ID o nombre del sondaje, su litología y el metraje de la muestra. Además, de debe indicar la alteración dominante de la muestra (tardímagmática, hidrotermal principal e hidrotermal tardía), esto se explica más en detalle en el capítulo 2.4. Finalmente, el ítem “zona” se refiere al número de asociación mineral característica, en relación al tipo de *stockwork* (Tabla 1.1).

Tabla 1.3: Tabla de mapeo de vetillas blandas.

Sondaje						Desde						Alteración						
Litología						Hasta						Zona						
Distancia (m)	Alfa (°)	Esp tipo (mm)	Qz	Anh	Tur	Bt	Chl	Cpy	Py	Bo	Moli	Mt	Ys	Cb	Otro			

1.3.3. Etapa de análisis y modelamiento

Análisis estadísticos de frecuencia de vetillas blandas

Una vez elaborada la base de datos, se filtran sólo las vetillas blandas, aquellas con un porcentaje menor o igual al 35% de minerales duros (cuarzo, turmalina, magnetita y pirita). Con estos datos se calcula la frecuencia de vetillas blandas por metro llamado P_{10} (m^{-1}) con el que se efectúan los siguientes análisis mediante el *software Excel y Statistica*:

- Por litología

- Por zona minera: diferencia entre los sectores productivos de Mina Esmeralda, Bloque 1 y Bloque 2 en base a la frecuencia de vetillas blandas y litología.
- Por zona geotécnica: las zonas geotécnicas corresponden a volúmenes de roca con características geotécnicas similares, es decir que comparten propiedades físicas de la roca. Se definen en base al tipo de litología, mena y frecuencia de vetillas blandas.
- Definición de unidades de estimación: se denomina unidad de estimación (UE) a aquella porción del espacio contenida dentro de la región en estudio y se caracteriza por la estacionariedad de la variable a estimar, es decir, la esperanza y la varianza son independientes de la posición espacial dentro de la unidad de estimación. La definición de las unidades de estimación está determinada por las zonas geotécnicas del área de estudio. Por lo tanto, las unidades de estimación sólo se pueden definir como un subconjunto de las zonas geotécnicas.

Modelo de bloques

Un modelo de bloques consiste en discretizar el yacimiento minero en “n” volúmenes idénticos (cubos) distribuidos en el espacio. El conjunto complejo de volúmenes representa la geometría global del yacimiento. Los datos son procesados con técnicas geoestadísticas de interpolación (*kriging*) para interpretar el volumen y la distribución de datos como la frecuencia de vetillas blandas en el espacio. Cada uno de los “cubos” que conforman el modelo, contiene información característica de dicho volumen, y de la porción del yacimiento que representan las coordenadas del centroide del volumen. Este modelo se construye con el *software Vulcan*.

1.4. Fisiografía y Clima

1.4.1. Fisiografía

Entre los 34° y 34°45' de latitud sur y entre la carretera 5 sur y el límite internacional, se reconocen de oeste a este, las siguientes unidades morfoestructurales (Figura 1.3):

Valle Longitudinal: depresión tectónica rellena por depósitos cuaternarios provenientes, principalmente de la Precordillera y la cordillera Principal. La altura promedio en el área de Rancagua es de 500 m s.n.m (Charrier, 1973).

Precordillera: corresponde a los faldeos occidentales de la cordillera Principal. Éstos comprenden las serranías (con alturas inferiores a los 1.500 m s.n.m) y a las planicies (que se extienden entre las serranías y la cordillera Principal) (Charrier, 1973). Estas planicies están constituidas por rellenos laháricos plio-cuaternarios, ubicados en una pequeña cuenca tectónica entre Sewell y Coya. La quebrada más importante del sector corresponde a la del río Coya.

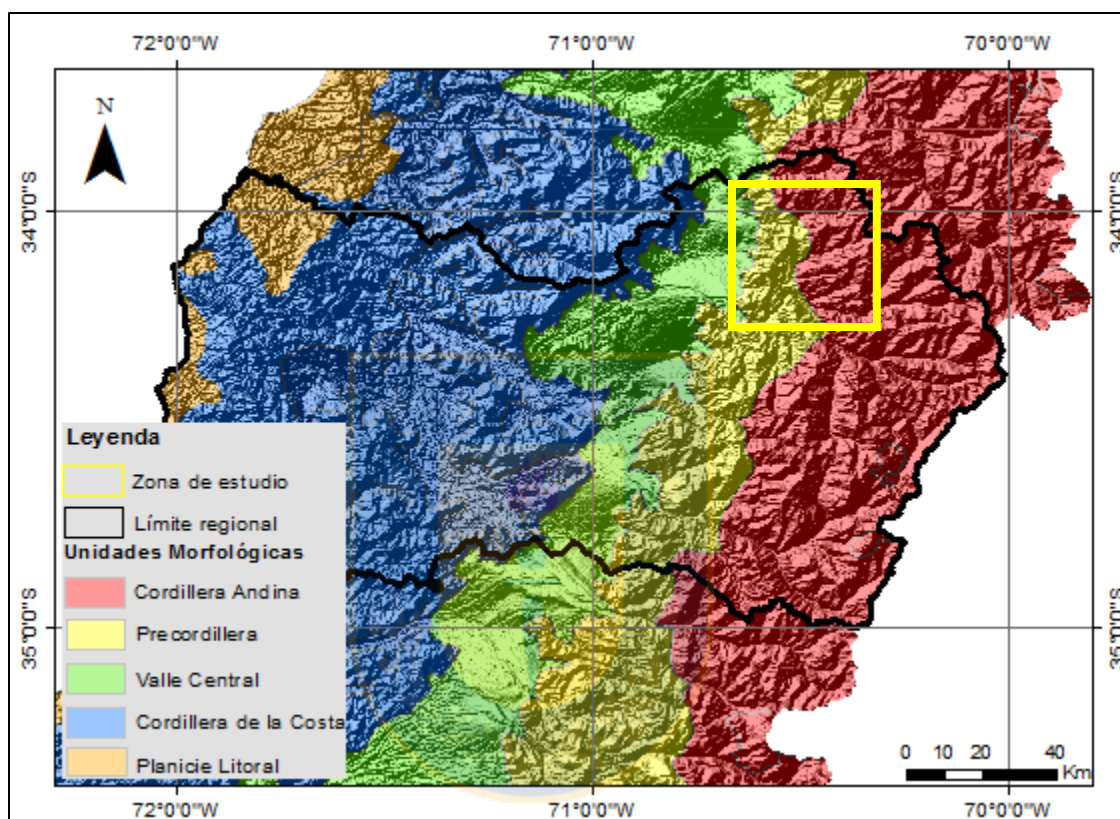


Figura 1.3: Mapa de unidades morfológicas de la VI región.

Cordillera Principal: es la unidad más oriental, con alturas que sobrepasan los 5.000 m s.n.m., generada por escalonamiento de un fallamiento normal (Charrier, 1973).

El yacimiento El Teniente se localiza en el faldeo occidental de la cordillera Principal y en los deslindes de la Precordillera. El relieve, en general, se caracteriza por ser joven, y su morfología actual ha sido producto del continuo desgaste que han ejercido los agentes glaciares. Los cursos de agua existente nacen de lagos glaciales y del derretimiento de las nieves. A cotas más bajas, éstos ríos erosionan profundamente creando valles en forma de “V”.

1.4.2. Clima, flora y fauna

El clima de la zona de interés es de tipo templado a cálido (Fuenzalida, 1967), con inviernos de seis meses mucho más lluviosos que los calurosos y secos veranos. Se caracteriza por fuertes contrastes térmicos debido a la sequedad con temperaturas mínimas en invierno de 5° a 6°C, mientras que en verano las máximas alcanzan los 32° a 36°C (Figura 1.4). Las nieves eternas se encuentran sólo sobre los 3.000 m s.n.m, dando paso a el clima frío por altura.

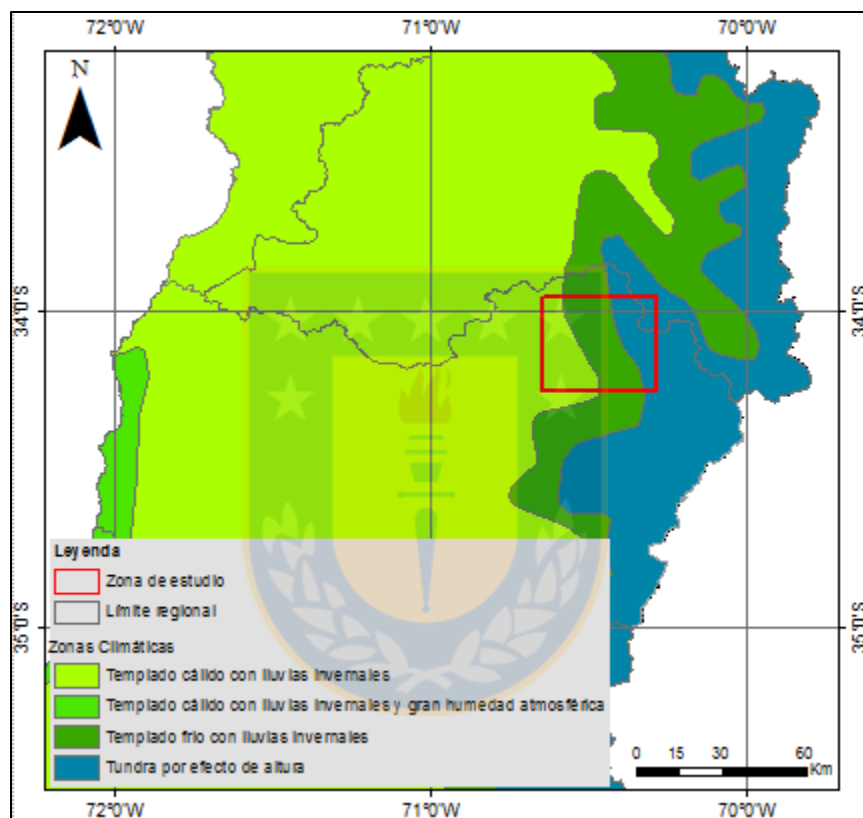


Figura 1.4: Mapa de zonas climáticas.

La vegetación está compuesta por una cubierta de pequeños arbustos, pastos en champas y plantas en cojines, conocidas como coirones y llaretas, respectivamente. Sobre los 2.000 m s.n.m, la vegetación se va espaciando hasta terminar por desaparecer, dando paso al dominio de las nieves (Fuenzalida, 1967).

La fauna, cada vez más escasa, se compone de animales como las vizcachas, pumas, algunos zorrillos y en el pasado abundaron los guanacos y huemules. Entre las aves, destacan algunas especies de patos, la perdiz cordillerana y el cóndor.

1.5. Trabajos Anteriores

A continuación, se mencionan trabajos anteriores relacionados con el comportamiento del macizo rocoso en relación a la presencia y tipo de vetillas blandas.

Zúñiga (1979), buscando predecir el tamaño de las colpas obtenidas en la fragmentación de la mena primaria, observó que el 78 % de las caras de las colpas analizadas eran originadas por estructuras previas, como fallas, vetillas o diaclasas. A partir de este estudio, se realizaron los primeros ensayos geotécnicos en el yacimiento (carga puntual).

Hevia (1984) realizó ensayos de carga puntual, demostrando que cerca del 90% de las rupturas con carga puntual corresponden a vetillas del tipo *stockwork*.

Pereira (1995) en su estudio sobre fragmentación de la roca primaria en la mina Teniente 4 Sur en su fase inicial, observa que las vetillas dominan en las caras que definen a las colpas (aprox. 80%). Indica que los rellenos más frecuentes en las estructuras analizadas son yeso y sulfuros y que el cuarzo tiene menor incidencia en el proceso de fragmentación. También, se refiere a la rugosidad de estas discontinuidades, señalando que son principalmente lisas y levemente rugosas.

Marambio y otros (1999) introducen un sistema de clasificación de las rupturas desarrolladas a través de las probetas ensayadas. Como resultado el 80% de las muestras presentan tipos de rupturas en las que hay participación de vetillas en el *stockwork*.

Rodrigo (1999) describe probetas del sector Teniente 4 Regimiento sometidas a ensayos de compresión uniaxial y triaxial e indica que las vetillas compuestas principalmente por anhidrita, cuarzo, calcopirita y turmalina, tienen gran influencia en la ruptura de las probetas.

Brzovic y Quezada (2000), considerando la frecuencia de cada tipo de vetilla en cada unidad litológica definida en el yacimiento, estiman la resistencia relativa de cada tipo de vetilla.

Marambio y otros (2000) redefine el concepto de roca intacta, el cual considera a las vetillas selladas del *stockwork* como parte de la roca intacta.

Willoner (2000) busca establecer la calidad del macizo rocoso de la mina El Teniente, mediante ensayos geotécnicos de carga diametral y corte directo, con éstos establece los primeros valores de resistencia indirecta en vetillas selladas y resistencia al corte directo, pero en vetillas abiertas.

Brzovic (2001) analiza el sistema de clasificación geotécnica del macizo rocoso primario de la mina El Teniente. En el estudio aborda las propiedades de la resistencia de las estructuras y propone una escala de resistencia relativa de las vetillas selladas basada en el índice de dureza en la escala de Mohs de los minerales que componen el relleno de la vetilla. Introduce el concepto de vetillas blandas, que corresponde a vetillas gruesas (espesor mayor a 2 mm) con menos de un tercio de minerales duros, entendiéndose como mineral duro, todos aquellos con dureza mayor a 4 en la escala de Mohs.

Figuerola (2003) advierte la importancia del relleno mineralógico de la vetilla, propone un sistema de clasificación geotectónica de vetillas en función a la dureza relativa del relleno.

Padilla (2004) evalúa la resistencia a la tracción de las vetillas que componen el *stockwork* mediante ensayos geotécnicos de carga diametral, además determina las características geológicas que determina la resistencia a la tracción de las vetillas.

Gavia (2005) indica los valores de resistencia a la tracción indirecta de vetillas según su categoría Tardimagmática, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía y reconoce la influencia de los minerales de relleno y espesor de las vetillas.

Brzovic y Villaescusa (2007) caracterizan las vetillas que participan en el desarme del macizo rocoso producto de la explotación minera obteniendo la proporción de minerales duros y el espesor mínimo que deben tener estas vetillas.

Brzovic (2009) caracterizó las discontinuidades que definen las caras de las colpas que se encuentran en los puntos de extracción. Observó que el 93% de las caras de las colpas corresponden a estructuras geológicas pre-existentes. De éstas, más del 88% son vetillas que fueron abiertas en el proceso de hundimiento y concluye que la resistencia de las vetillas depende de la combinación de minerales y de su espesor.

Brzovic y Figuerola (2009) desarrollan una caracterización de las vetillas que definen las caras de los bloques de roca que se encuentran en los puntos de extracción de la mina El Teniente.

Brzovic y otros (2009) introducen el concepto de estructuras blandas, que representan las vetillas por donde deberían fallar el macizo rocoso.

De Los Santos (2011) determinó a partir de ensayos geotécnicos en la mina el Teniente, que las vetillas constituyen un plano de debilidad por donde se fracturará el macizo durante el proceso de hundimiento. Además, indica que la resistencia al corte depende de la dureza de los minerales que componen las vetillas, así como del espesor de éstas. Establece que las vetillas con menos del 40% de minerales duros (<4 en la escala de Mohs), en vetillas mayores a 2 mm, permiten el desarrollo de la ruptura a través del relleno de ésta.

Millán (2014) generó un modelo de bloques y definió de calidad relativa del macizo rocoso.

Schachter (2017) construye un modelo de bloques sin considerar a la pirita como mineral blando y establece una zonación geotécnica preliminar.

1.6. Agradecimientos

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos a mis padres por darme la mejor educación posible, a mi tía Marcia por ser mi segunda madre y a mi compañero de vida, Ignacio Fredes, por su apoyo incondicional.

A el Sr. Felipe Celhay, Superintendente de Geología, por darme la oportunidad de efectuar mi Memoria de Título en la División El Teniente de Codelco.

A la geóloga Sra. Paulina Schachter, Profesional Guía de este estudio, por apoyarme durante todo el proceso.

A los profesionales pertenecientes a la Superintendencia de Geología: Roberto González, Andrés Brzovic, Iván Rojas, Sebastián González, María Paz Sepúlveda y Jorge Donoso, por su colaboración en este estudio.

A todos los profesores y colaboradores de la Carrera de Geología, quienes me formaron como profesional y persona.

A mi profesor patrocinante Ramiro Bonilla, al profesor y Jefe de Carrera Luis Arturo Quinzio, al profesor Abraham González y la Sra. Carolina Rojas, secretaria de la Carrera de Geología, quienes me apoyaron en todo el proceso de titulación.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Generalidades

La Geología Regional descrita a continuación corresponde a la mina Esmeralda, ubicado en flanco occidental de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 33°45' y 35°15' de latitud sur, y entre los 71°00' de longitud oeste y la frontera con la República de Argentina.

Se reconocen potentes secuencias de rocas volcánicas intercaladas con secuencias estratificadas marinas y continentales que van desde el Jurásico Superior hasta el Mioceno Superior. Estas secuencias se encuentran intruidas por cuerpos plutónicos e hipabisales del Cenozoico, principalmente batolitos, *stocks* y en menor medida diques y apófisis.

2.2. Geología regional

Las formaciones que han sido definidas en la franja cordillerana se exponen (Figura 2.1) en base a Charrier (1973), en orden cronológico a continuación:

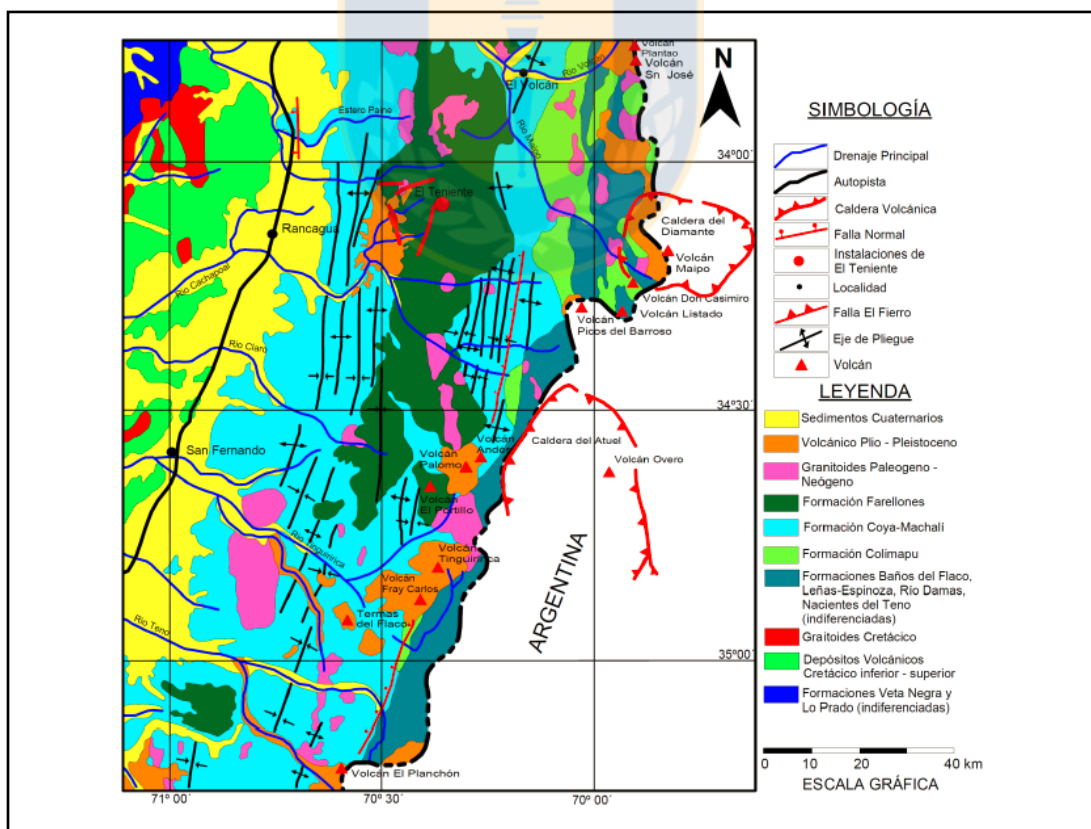


Figura 2.1: Mapa Geológico Regional de la franja cordillerana de Chile Central (modificado de Charrier y otros 1994, tomado de Harrison, 2010).

2.2.1. Rocas estratificadas

Formación Nacientes del Teno (Klöhn, 1960): consiste en una sucesión de rocas sedimentarias clásticas depositadas durante el ciclo marino Bajociano-Kimmeridgiano Inferior, ubicadas en la parte oriental de la región en una franja norte-sur (Figura 2.1). La localidad tipo se define en la hoya Hidrográfica del Río Teno. Según Davidson y Vicente (1973), esta formación se constituye por dos miembros; el Miembro Superior Evaporítico, compuesto por yeso y anhidrita de una potencia de 500 a 600 m, y el Miembro Inferior, detrítico y calcáreo con graucavas, conglomerados, margas fosilíferas, calcarenitas y areniscas de unos 100 a 300 m de potencia. Subyace de forma concordante a la Formación Río Damas de Klöhn (1960). En base a su contenido fosilífero se le asigna la edad de Bajociano Inferior al Kimmeridgiano Inferior. Se le correlaciona con el miembro inferior y medio de la Formación Lagunillas de Aguirre (1960), con la Formación Río Colina de González (1963) y con la Formación Valle Grande de González y Vergara (1952).

Formación Río Damas (Klöhn, 1960): serie continental constituida por sedimentos clásticos como conglomerados y areniscas, y depósitos de origen volcánico como lavas y piroclastos. Representa la culminación de un ciclo regresivo y la depositación en un ambiente continental semi-desértico. Su localidad tipo se encuentra en el valle del Río Damas en la cordillera Principal de la Provincia de Colchagua y su espesor medio indicado por Klöhn (1960) es de 3.000 m. Aflora continuamente al oriente de la zona de estudio con una suave pendiente hacia el oeste en una franja norte-sur (Figura 2.1). Sobreyace a la Formación Nacientes del Teno y subyace a la Formación Baños del Flaco, ambos de forma concordante, y en contacto por falla limita con la Formación Leñas-Espinoza. En base a sus relaciones de contacto se le ha asignado al Kimmeridgiano Superior-Titoniano Inferior (Charrier, 1983). No se le ha correlacionado con otras formaciones.

Formación Leñas-Espinoza (Klöhn, 1960; Charrier, 1981): secuencia de rocas sedimentarias detríticas y calcáreas de carácter transgresivo. Esta serie de 1.200 m de espesor según Charrier (1981), se compone de areniscas, limolitas, lutitas, brechas y areniscas calcáreas. Su localidad tipo se encuentra en la confluencia de los ríos Leñas y Espinoza, mientras que sus afloramientos, restringidos, se ubican al oriente del área de interés, con orientación norte-sur (Figura 2.1). Sus relacionales de contacto están dadas por; un límite inferior desconocido y hacia el techo una transición gradual a la Formación Baños del Flaco, y discordantemente con la Formación Coya-Machalí, además presenta localmente un contacto por falla con la Formación Río Damas. En base

a las relaciones de contacto se le asigna edad Kimmeridgiano. Se correlaciona con la Formación Río Damas de Klöhn (1960).

Formación Baños del Flaco (Klöhn, 1960): corresponde a 1.000 m de estratos marinos fosilíferos con intercalaciones detríticas y volcánicas. Presenta calizas, calcilutitas, calcarenitas, margas, areniscas calcáreas con intercalaciones de conglomerados, areniscas y lutitas, y escasas rocas efusivas. Se sugiere que corresponde a un segundo ciclo de transgresión-regresión que cubrió la zona de la cordillera Principal. Su localidad tipo se encuentra en el área de Baños del Flaco, en el valle del río Tinguiririca. En la región su distribución está restringida a pequeños afloramientos de dirección norte-sur (Figura 2.1). Es concordante en su base con la Formación Río Damas y Leñas Espinoza, y en su techo, con la Formación Colimapu. Su edad abarca desde el Titoniano al Neocomiano según investigaciones paleontológicas (Corvalán, 1956; Biró, 1963; Tavera, 1972, en Charrier 1981). Se correlaciona con la Formación Lo Valdés (Thiele, 1980) y la Formación San José (Aguirre, 1960).

Formación Colimapu (Klöhn, 1960): conjunto de rocas estratificadas continentales cuya localidad tipo se localiza en la quebrada homónima, afluente del río Maipo. La formación está compuesta por dos miembros: Miembro Inferior Sedimentario de 1.500 m constituido por areniscas epiclásticas y calizas; y el Miembro Superior Volcánico, compuesto de tobas, lapilli e ignimbritas con una potencia de 1.600 m (Charrier, 1981). Aflora al oriente de la zona de estudio en una franja norte-sur (Figura 2.1). Esta secuencia se dispone concordante sobre la Formación Baños del Flaco y en discordancia de erosión bajo la Formación Coya-Machalí. Charrier (1973) describe que su génesis se asocia al segundo ciclo sedimentario continental, asociado a una fase de alzamiento durante el Barremiano-Albiano. En base al contenido fósil y sus relaciones de contacto se asocia al Barremiano-Albiano (Thiele, 1980). Se correlaciona con la Formación Cristo Redentor de Aguirre (1960).

Formación Coya-Machalí (Klöhn, 1960): se compone de rocas volcánicas continentales de 3.200 m de espesor, efusivas y piroclásticas de carácter ácido, con algunas intercalaciones de sedimentos lacustres. Su localidad tipo corresponde a la vertiente norte de la cordillera Principal, entre Machalí y Coya. Charrier y otros (1994) indican que aflora en dos franjas norte-sur (Figura 2.1). La franja occidental corresponde a lavas andesíticas y la franja oriental a rocas piroclásticas con intercalaciones importantes de sedimentitas finas, describe Charrier y Munizaga (1979). Se

superpone discordantemente sobre las formaciones Baños del Flaco, Leña-Espinoza, Río Damas y Nacientes del Teno, e infrayace en discordancia angular a la Formación Farellones. Las dataciones radiométricas $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y la información proporcionada por fauna fósil encontrada, señala un rango de edad entre el Eoceno Superior hasta Mioceno Inferior (Charrier y otros, 1994). Charrier y otros (1994) detallan que se correlaciona con la Formación Abanico de Aguirre (1960).

Formación Farellones (Klöhn, 1960): predominantemente volcánica de 2.400 m de potencia, su localidad tipo se ubica en Farellones. Se compone de lavas intermedias a ácidas y rocas piroclásticas, con intercalaciones de areniscas, lutitas, tufitas y delgadas capas de caliza. Sus afloramientos muestran una distribución norte-sur, y se encuentra limitada hacia el este y oeste por la Formación Coya-Machalí (Figura 2.1). Sobreyace en discordancia angular, sobre la Formación Coya-Machalí y está localmente cubierta por la Formación Colorado-La Parva, describe Thiele (1980). Charrier (1983) revela que dataciones de K-Ar, indican que se trataría de una intensa actividad volcánica durante el Mioceno Medio y Superior. Es equivalente cronológicamente a la Formación Corona del Fraile y a la Formación Malla-Malla de González y Vergara (1962).

Formación Colón-Coya (Gómez, 2001): corresponde a un conjunto de lahares insertos en una matriz arcillo-cinerítica, con intercalaciones locales de niveles de ceniza, coladas andesíticas de poca potencia y gravas fluviales. Su localidad tipo corresponde al sector Colón Alto, en la comuna de Machalí. Se distribuye en dos franjas norte-sur en pequeños afloramientos (Figura 2.1). Su espesor varía entre algunos centímetros hasta 150 m. Charrier y Munizaga (1979), indican que sobreyace en disconformidad a las formaciones Coya-Machalí y Farellones, mientras que su techo corresponde a la actual superficie de erosión. Se asigna su edad por datación radiométrica K/Ar en lavas, que la sitúa en el rango Plioceno-Pleistoceno (Charrier y Munizaga, 1979; Cuadra, 1986).

Depósitos no consolidados: Charrier (1983) indica que corresponden a depósitos aluviales (fluviales, lacustres y glaciofluviales), glaciales, de escombros y derrumbes que rellenan los valles, relacionados a los cursos de agua actuales como los ríos Cachapoal, Maipo, Teno y Blanco. Tendrían una edad cuaternaria (Charrier, 1981).

2.2.2. Rocas intrusivas

Son cuerpos plutónicos e hipabisales de variada composición y dimensión, que afloran con una orientación norte-sur e intruyen a las formaciones del Mioceno (Figura 2.1). Lo tipos litológicos

más comunes son granodioritas, pórfidos dioríticos y andesíticos, monzonitas, tonalitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos que se presentan como *stocks*, batolitos, grandes filones y cuerpos menores como diques, filones y apófisis (Charrier, 1981), los que cortan a las rocas de las formaciones Coya-Machalí y Farellones (Skewes, 2002).

Rivera y Falcón (1998), proponen que la actividad magmática en este sector se habría extendido desde el Oligoceno Superior al Mioceno Superior, coincidente con los rangos establecidos para las Formaciones Abanico y Farellones. De acuerdo a las dataciones de Kurtz y otros (1997), los cuerpos intrusivos existentes se diferencian en:

Complejo Plutónico Antiguo: datado en $21,6 \pm 4,9$ y $16,2 \pm 1,2$ Ma, corresponde al Plutón La Obra de composición granodiorítica del Mioceno Inferior, el que intruye a la Formación Coya-Machalí en el margen oeste.

Complejo Plutónico Teniente: subdividido en dos unidades de composición granodiorítica, el primero de 12 Ma ($12,4 \pm 2,5$ y $11,3 \pm 0,3$ Ma; Mioceno Medio) y el segundo una edad estimada de 8 Ma ($8,8 \pm 0,1$ y $7,7 \pm 0,1$ Ma; Mioceno Superior). Intruyen a la Formación Abanico y a la Formación Farellones.

Complejo Plutónico Joven: datado en $6,6 \pm 0,1$ Ma y $5,5 \pm 0,2$ Ma, se ubica al este del Complejo Plutónico Teniente y corresponde a intrusivos de composición granodiorita del Mioceno Superior.

2.2.3. Estructuras

A escala regional, entre las coordenadas los 33° y 39° latitud sur, destacan las estructuras NW-SE y NNW-SSE producidas por los eventos tecto-magmáticos del Paleozoico-Mesozoico (Godoy y Lara, 1994). Estas estructuras delimitarían los segmentos tectónicos que se disponen oblicuamente a la cadena Andina actual, experimentando reiteradas reactivaciones durante el Mesozoico-Cenozoico (Rivera y Cembrano, 2000), cuyos movimientos laterales serían responsables de la distribución de franjas de centros volcánicos e intrusivos del Mioceno en la región (Falcón y Rivera, 1998). Los eventos tectónicos habrían sido controlados por una zona de transcurrencia sinistral $N50^\circ W$ que coincide con la Zona de Falla Río Blanco-Codegua, generando de acuerdo a un sistema de Riedel, fracturas sintéticas-sinestrales (tipo R) de orientación $N60^\circ W$ y antitéticas-dextrales (tipo R') de orientación $N50^\circ E$ (Falcón y Rivera, 1998).

Se pueden mencionar las siguientes estructuras regionales:

Pliegues: Klöhn (1960) y Charrier y otros (1994) describen anticlinales y sinclinales con flancos de menos de 30° de pendiente y con ejes de rumbo orientados norte-sur. Estas estructuras presentan continuidad longitudinal solamente entre los segmentos acotados por un sistema de fallas $N30^\circ W$ (Rivera y Falcón, 2000). Estas estructuras afectan principalmente a la Formación Farellones.

Fallas: se identifican siete zonas de falla $N30^\circ W$ (Rivera y Falcón, 2000), que se reconocen tanto en la Cordillera de la Costa, como en la de los Andes. En relación al yacimiento El Teniente, El Azufre al norte y Juanita al sur (Rivera y Cembrano, 2000), que truncan a los ejes de plegamiento de la Formación Farellones (Figura 2.2).

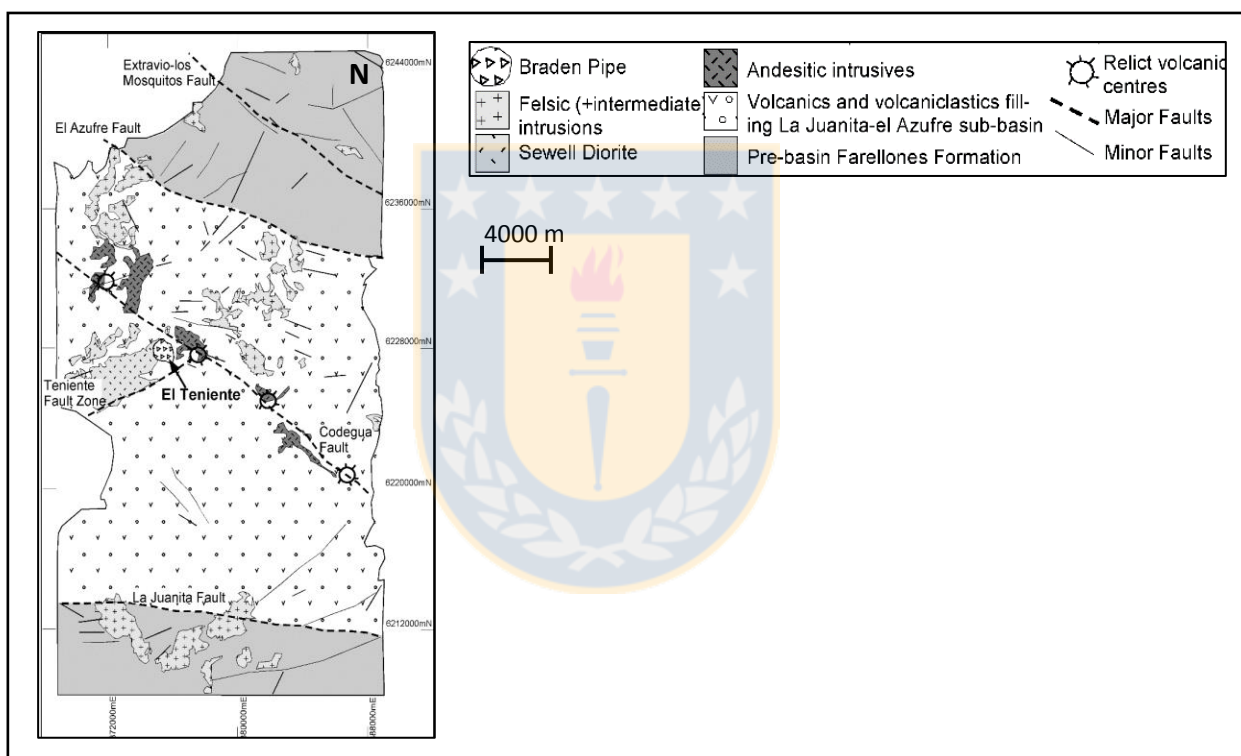


Figura 2.2: Zonas de fallas relacionadas a El Teniente (modificado de Rivera y Falcón 1998)).

Discordancia: tres fases compresivas son reconocidas en la región, que se manifiestan a través de tres discordancias orogénicas de plegamiento (Klöhn, 1960). En el Cretácico Superior, la primera fase produce la discordancia entre la Formación Colimapu y las rocas volcánicas terciarias y cuaternarias. La segunda fase será la responsable de la depositación de la Formación Coya-Machalí en discordancia sobre la Formación Colimapu. Algunos autores la asignan al Oligoceno Inferior, y otros al Mioceno Inferior (Charrier y otros, 1996). Finalmente, en el Mioceno-Plioceno una fase

compresiva genera plegamiento de la Formación Farellones, depositándose en discordancia la Formación Colón-Coya

2.3. Marco Geotectónico

Chile Central aloja a los tres pórfidos cupríferos más grandes del país, El Teniente, Río Blanco-Los Bronces y Los Pelambres, todos ubicados en el límite del segmento “flat-slab” y la Zona Volcánica Sur (Figura 2.3). Su génesis se relaciona a la evolución tectónica del margen continental sudamericano, es decir al engrosamiento cortical y a la progresiva disminución del ángulo de

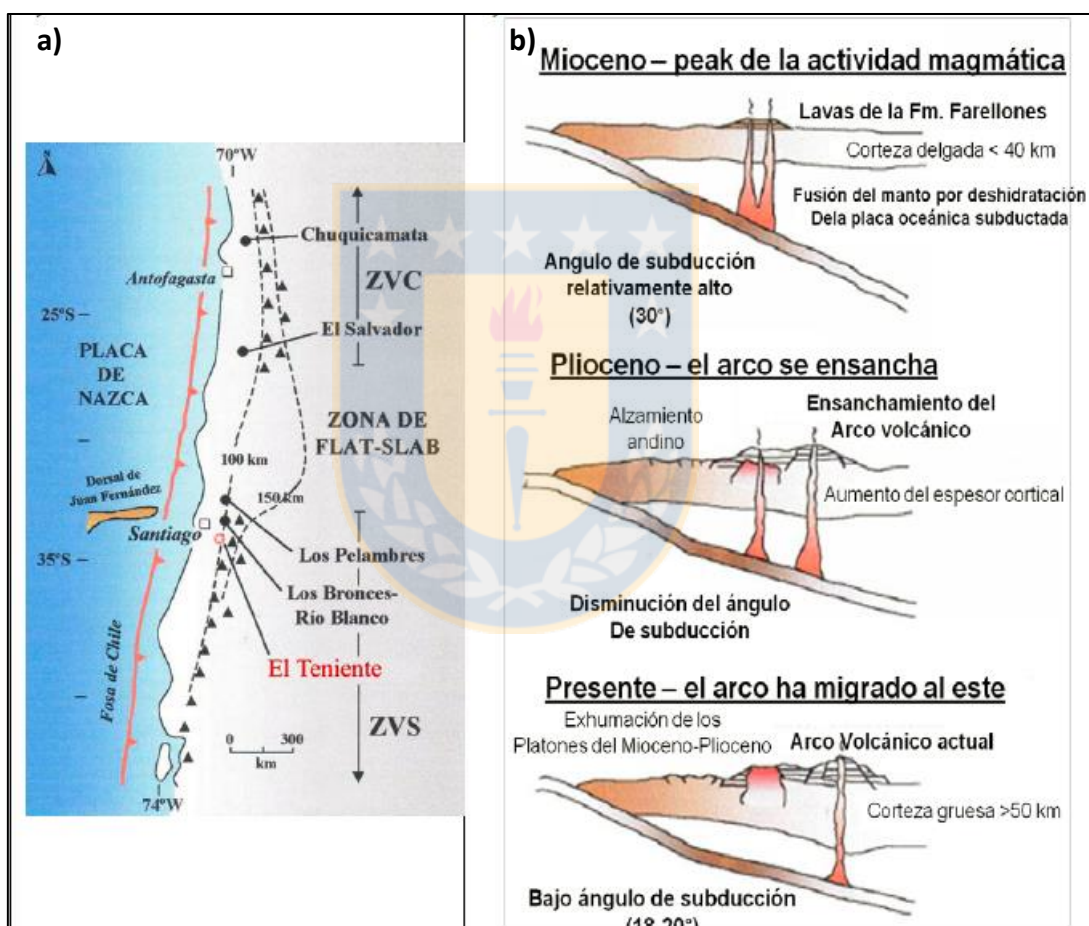
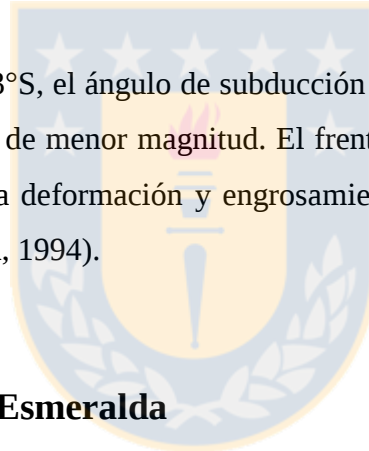


Figura 2.3: a) Ubicación del segmento “flat slab” que separa la Zona Volcánica Central (ZVC) de la Zona Volcánica Sur (ZVS). Los triángulos indican el frente volcánico activo en la actualidad y los círculos, la ubicación de los grandes yacimientos de pórfidos cupríferos del Mioceno Tardío (Los Pelambres, Río-Blanco-Los Bronces y El Teniente), y otros más antiguos (Terciario Medio), ubicados en el norte de Chile. Las líneas segmentadas indican la profundidad de la Zona de Benioff (tomados de Hirschfeld, 2006), b) Perfiles transversales que muestran la evolución tecto-magmática de los Andes de Chile Central entre el Mioceno y el Presente, a la latitud de la porción septentrional de la Zona Volcánica Sur (34°S). Tomado de Skewes y Stern, 1994.

subducción de la Placa de Nazca, producida desde el Mioceno, lo que originó un sollevamiento. El rápido ascenso de los sistemas plutónicos emplazados en profundidad, genera la exsolución de fluidos magmáticos ricos en cobre, lo que origina la mineralización (Skewes y Stern, 1995). La disminución de la edad de los depósitos hacia el sur, indica un vínculo genético con la migración al sur del foco de subducción de la Dorsal de Juan Fernández (Stern y Skewes, 1997).

Durante el Mioceno, disminuye el ángulo de subducción al norte de los 33°S, debido a la subducción de la Dorsal de Juan Fernández (Pilger, 1981), la cual genera una segmentación del arco andino en Chile Central. Durante el Mioceno Tardío, este evento provocó un ensanchamiento del arco magmático y la migración del frente volcánico hacia el este, terminando con la actividad magmática durante el Plioceno (Kay y Kurtz, 1995). Además, este proceso estaría asociado al alzamiento, deformación y aumento del espesor de la corteza bajo la cadena volcánica al norte de los 33°S (Kay y otros, 1991).

Mientras tanto, al sur de los 33°S, el ángulo de subducción también decrece, al mismo tiempo de que se forma el flat-slab, pero de menor magnitud. El frente volcánico migra hacia el este de su ubicación actual, además de la deformación y engrosamiento de la corteza, y alzamiento de la cadena andina (Skewes y Stern, 1994).



2.4. Geología de la mina Esmeralda

En el área del yacimiento, predominan las rocas volcánicas del Mioceno (Formación Farellones), intruidas por rocas del Complejo Máfico el Teniente (CMET), y posteriormente por cuerpos félsicos relativamente pequeños de composición intermedia (Ossandon 1974, Camus 1975; Skewes, 2000; Figura 2.4). En los contactos entre las rocas máficas y félsicas se encuentran cuerpos de brecha ígnea y de brecha magmática-hidrotermal. Luego, las rocas del Complejo de Brechas Braden que forman la pipa, alteran completamente los rasgos primarios y secundarios de las unidades anteriores. Finalmente, varios diques de lamprófidos cortan a todas las rocas anteriormente descritas, marcando con ello, el comienzo de los eventos de mineralización de sulfuros de cobre y molibdeno (Cuadra 1986, Skewes y otros 2002).

Tradicionalmente, El Teniente se asocia a un pórfido cuprífero producido por la sucesiva intrusión de cuerpos félsicos asociados a alteraciones hidrotermales (Maksaev y otros, 2004). Por otro lado,

postula otra hipótesis, planteando que se trataría de un depósito de megabrecha, generado por la exsolución de fluidos magmáticos de plutones en enfriamiento (Skewes y otros, 2002). La formación de vetas tardías, en asociación con el emplazamiento de brechas más jóvenes e intrusiones de pórfidos félsicos (Skewes y otros, 2002).

La mineralización de cobre y molibdeno ocurre principalmente en vetillas (70%) resultantes del relleno y sellado de grietas producidas por los eventos de deformación presentes sobretudo en rocas subvolcánicas máficas, y el 30% restante se concentra en el cemento de diversas brechas magmático-hidrotermales de biotita, anhidrita, cuarzo y turmalina, y en menor medida, diseminada en la matriz de los cuerpos intrusivos félsicos (Cuadra, 1986).

Dentro de los límites de la mina, se distinguen tres sistemas de estructurales de orientación NS, NE-SW y NNW-SSE. Las de tendencia NNW-SSE se ven evidenciadas por la traza de los contactos entre distintas litologías, por fallas y zonas de cizalle, y por la distribución y geometría de las vetas y vetillas. La configuración o arreglo de estas estructuras condicionan el fracturamiento del macizo rocoso, reflejada en su fragmentación primaria y en la estabilidad de las labores.

2.4.1. Litología

Complejo Máfico El Teniente (CMET)

Conjunto de rocas subvolcánicas máficas oscuras, de afinidad toleítica (Skewes, 1997) del Mioceno Superior (Munizaga y otros, 2002; Charrier y otro, 2002). Consiste en gabros, diabasas y pórfidos basálticos (Burgos, 2002; Skewes y otros, 2002). Es la unidad litológica de mayor extensión en el área de estudio y se caracteriza un denso enrejado de vetillas (*stockwork*), el cual aloja la mayor parte de la mineralización de cobre y molibdeno. Se encuentra intruido por unidades félsicas y brechas hidrotermales (Figura 2.4).

Complejo Félsico

Tonalita (TO): cuerpo de gran dimensión que intruye al CMET al sureste de la Pipa Braden con un contacto nítido. Color gris claro con textura fanerítica en su núcleo que grada a porfídico hacia los márgenes (Faunes, 1981) (Figura 2.4).

Pórfido Diorítico (PDI): *stock* tabular vertical con dirección NS. En los contactos con el CMET se generan brechas ígneas y/o hidrotermales. Macroscópicamente corresponde a una roca de color gris claro con textura porfídica (Figura 2.4).

Pórfido Microdiorítico (PMD): diorita de grano fino, con abundantes xenolitos de CMET, brechas de biotita y tonalita (Arredondo, 1994). Se encuentra en contacto con la Tonalita y el CMET (Figura 2.4).

Pórfido Diorítico Blanco (PDB): cuerpos de forma subesférica que intruyen al Pórfido Diorítico con contactos difusos. Es una roca blanca porfídica (Figura 2.4).

Pórfido Diorítico Grueso (PDG): cuerpo pseudoesférico ubicado en sector centro sur del área de interés. Se encuentra en contacto neto con el CMET y en contacto gradacional con la Tonalita. Es una roca gris clara con textura porfídica (Figura 2.4).

Brechas Hidrotermales

Brecha de anhidrita: se compone de fragmentos polimícticos de rocas máficas y félsicas alteradas. El cemento es principalmente de anhidrita con menores cantidades de cuarzo, calcopirita, piritita y molibdenita (Figura 2.4).

Brecha de Biotita: consiste en fragmentos de tonalita, fuertemente biotitizados. El cemento es de biotita y, en menor medida, por anhidrita $\pm$ feldespato potásico (Figura 2.4).

Brecha de Feldespato Potásico: brecha monomíctica con fragmentos de tonalita y una matriz compuesta por feldespato potásico en asociación con anhidrita y biotita (Figura 2.4).

Brechas Hidrotermales marginales

Forman un anillo alrededor de la Brecha Braden con un contacto gradacional y un espesor promedio de 50 a 60 m (Cuadra, 1986). Está constituida por fragmentos angulosos a subangulosos de variadas litologías, con grados variables de alteración cuarzo-sericita-clorita y con cantidades menores de anhidrita y yeso, sulfuros y sulfosales. En este sector existen de varios tipos según el cemento: turmalina, clorita y sericita (Figura 2.4).

Brechas Ígneas

Brechas monomícticas matriz soportado. Su matriz es de color blanco a gris claro y su composición

suele ser tonalítica, diorítica y microdiorítica. Se localizan en el contacto entre el CMET y los cuerpos félsicos que lo intruyen (Figura 2.4).

Complejo de Brechas Braden

Chimenea volcánica producida por la salida explosiva de gases que fragmentan y quiebran la roca caja, relleno el conducto con fragmentos angulosos. Se emplaza al centro del yacimiento. Tiene la forma de un cono invertido subcircular con una extensión vertical de más de 2.150 m desde la superficie. Es una brecha polimíctica, con fragmentos redondeados a subangulosos de mala selección, compuestos de CMET, diorita, dacita y latita. Su matriz es de polvo de roca y el cemento de sericita con menores cantidades de turmalina, calcita y sulfuros. En la zona de estudio se encuentran las variedades de Sericita, Clorita y Turmalina (Figura 2.4).

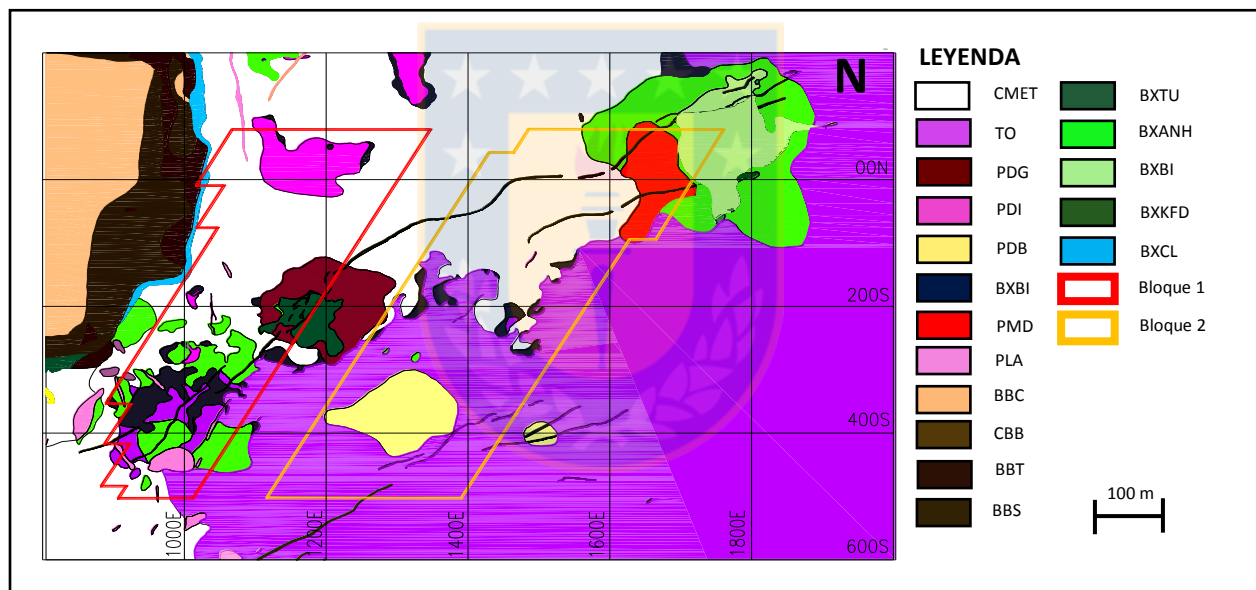


Figura 2.4: Mapa litológico de Bloque 1 (rojo) y Bloque 2 (naranja) que conforman la Mina Esmeralda (modificado de De Los Santos y Ramírez, 2016).

2.4.2. Mineralización y alteración

Como se mencionó anteriormente, el yacimiento, se habría formado por sucesivos eventos de alteración y mineralización. Se distinguen las siguientes etapas de alteración, llamadas Tardimagmáticas, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía y una etapa Supérgena. Estas etapas han dado origen a las vetillas que caracterizan al macizo.

El génesis mineralógico se concentra en las etapas Tardimagmática, Hidrotermal Principal y Tardía, donde se desarrolló una zonación mineralógica con un núcleo de bornita, pasando gradualmente a una envolvente de calcopirita y finalmente de pirita. El evento terminal en la evolución de la mineralización (etapa póstuma), es el emplazamiento de la Pipa Braden, la que removió gran parte del núcleo de bornita, reemplazándolo por pirita.

La alteración supérgena ocurre luego de la infiltración de aguas superficiales, con su consecuente lixiviación y enriquecimiento secundario en la parte alta de la columna mineralizada.

Etapla tardimagmática (TM)

Consiste en una alteración base presente en todo el yacimiento, caracterizándose por la coexistencia en equilibrio de una alteración biotítica pervasiva y un intenso enrejado de vetillas con cuarzo-anhidrita y sulfuros. La mineralización consiste en bornita, calcopirita, pirita y molibdenita, las que se encuentran principalmente en vetillas sin halo de alteración (Zuñiga, 1982).

Etapla Hidrotermal Principal (HP)

Esta etapa se sobreimpone a la anterior y está relacionada con la reacción de los fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas. Se desarrolla a partir de vetillas que generan halos de alteración, los cuales transforman la mineralogía y textura tardimagmática. En la roca caja la mineralogía es reemplazada por una asociación cuarzo-sericita, con menor proporción de anhidrita y clorita. Según Zuñiga (1982), la mineralización se compone de calcopirita, pirita y molibdenita y los minerales de ganga que los acompañan como el cuarzo, anhidrita y sericita con clorita.

Etapla Hidrotermal tardía (HT)

Según Villalobos (1975), se relaciona con los fluidos hidrotermales asociados al emplazamiento de la brecha de turmalina. La mineralogía de alteración consiste en una asociación cuarzo-anhidrita-turmalina-sericita-clorita-yeso-carbonatos y la metálica por calcopirita-bornita-pirita-molibdenita-tenantita/tetraedrita. Se desarrolla a través de los halos de vetas y vetillas que se distribuyen en una franja concéntrica al anillo de brechas.

Etapla Póstuma

Se relaciona con la consolidación de la Brecha Braden y se caracteriza por una asociación mineralógica constituida fundamentalmente por sericita, calcita y pirita en el cemento, y por la

alteración sericítica de la fracción clástica. También existe un relleno de estructuras planares y de cavidades, con minerales de baja temperatura tales como yeso, carbonatos, baritina, blenda, galena, cuarzo, anhidrita y turmalina (Ojeda y otros, 1980).

Etapas Supérgena

Se reconoce en las cotas más altas del yacimiento. Se caracteriza por una lixiviación total de la anhidrita y por la presencia de caolinita. La mineralización corresponde a calcosina gris, calcosina celeste y covelina.

2.4.3. Geología estructural del yacimiento

Las estructuras más importantes del yacimiento se encuentran en la Zona de Falla El Teniente (ZFT) definida por Garrido y otros (1994), la que pertenece a una zona de cizalle de dirección aproximada N65°E (Garrido, 1995) (Figura 2.5). Se extiende por 14 km con un ancho de 3 km, limitando al norte con la quebrada Teniente y al sur por la falla Agua Amarga. Dentro de la zona de falla, el arreglo estructural es completamente distinto al reconocido en el entorno, independiente del tipo litológico, definiendo un eje de acortamiento de dirección $N48^{\circ} \pm 11^{\circ} W$ (Garrido, 1995), el que estaría relacionado al emplazamiento de Tonalita y la principal zona de alteración hidrotermal del yacimiento. Otra zona de importancia es la zona de chimenea o pipa de Brechas Braden emplazada en rocas de la Formación Farellones (Camus, 1975).

En la mina el Teniente, las estructuras se clasifican de acuerdo a su continuidad como Distritales, Maestras, Mayores Intermedias y Menores (Tabla 2.1). En la zona de mena primaria, abundan estructuras menores selladas o vetillas que forman en su conjunto un denso enrejado o stockwork. Éstas últimas juegan un rol fundamental durante el proceso de fragmentación y conminución y, por lo tanto, durante el desarrollo del *caving*

Tabla 2.1: Clasificación de estructuras según su continuidad (Brzovic y Benado, 2003).

TIPO DE ESTRUCTURA	CONTINUIDAD	ESPESOR TÍPICO
Estructuras Distritales	Traza >1 km	>1 m
Estructuras Maestras	Traza >500 m	<5 cm >120 cm
Estructuras Mayores	100 m < Traza < 500 m	>7 mm
Estructuras Intermedias	4 m < Traza < 100 m	< 5 mm
Estructuras Menores	Traza <4 m	≤ 2 mm

Las estructuras intermedias y mayores corresponden a fallas, vetillas y diques de lamprófido con una orientación preferencial $N60^{\circ}-70^{\circ}$, las que por sus características geométricas y/o geológicas pueden afectar el proceso de explotación en términos del comportamiento geomecánico. A mayor escala, las estructuras maestras abarcan un conjunto de fracturas de orientación NS y manteos subverticales, mientras que, entre las estructuras distritales, destacan la Falla Agua Amarga y la Zona de Falla Teniente.

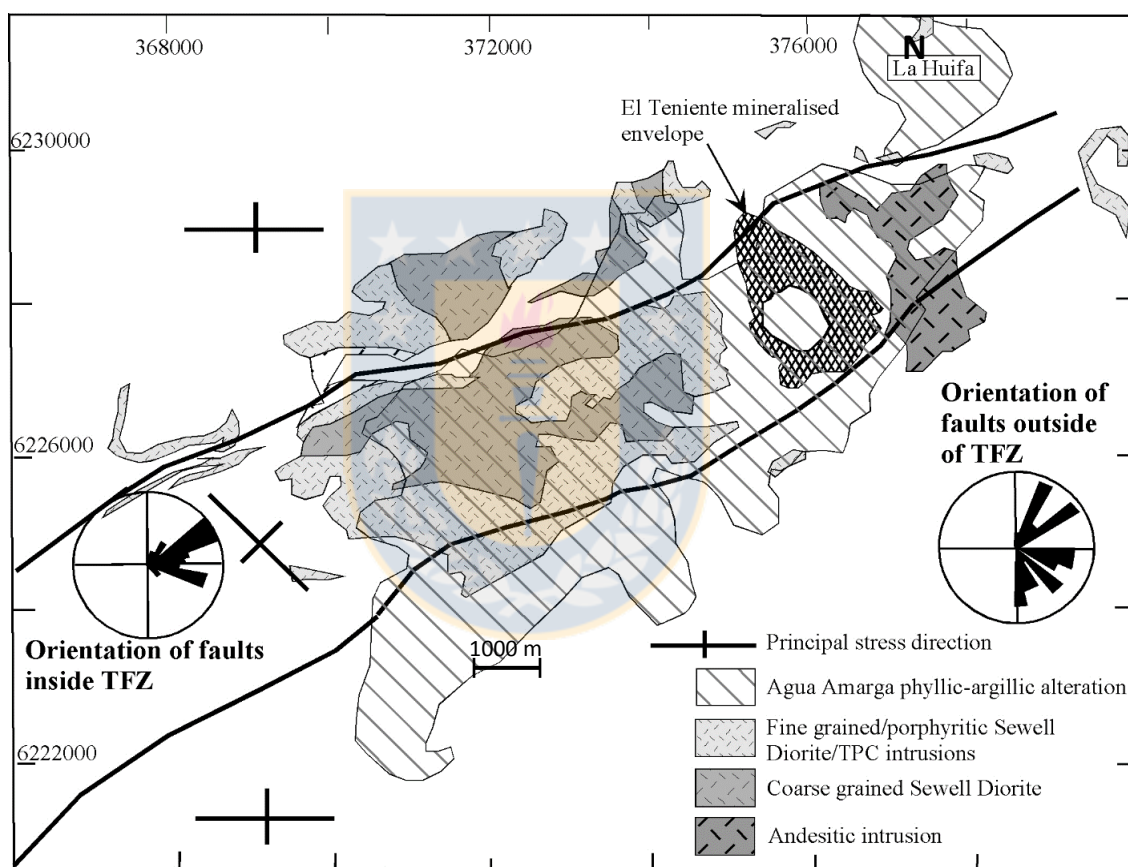


Figura 2.5: Zona de Falla El Teniente (ZFT). Es una extensa zona de tendencia NE-SW limitada por la Quebrada El Teniente hacia el norte y la Falla Agua Amarga hacia el sur. Controla el emplazamiento de la Tonalita (8,9 – 7,0 Ma; Morel y Sprohnlé, 1992; Kay y Kurtz, 1995), y las zonas de alteración en el yacimiento. Garrido (1995) nota que el esfuerzo principal regional es de tendencia este-oeste, siendo este rotado a la dirección NW-SE dentro de la ZFT, (modificado de Garrido, 1995).

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Vetillas Blandas

En la mina El Teniente se define como vetilla a toda estructura lineal con un espesor entre 1 y 3 mm y con una longitud igual o mayor a 2,5 cm. El relleno de estas discontinuidades proviene de soluciones hidrotermales, que además pueden generar un halo de alteración en la roca caja. Se han clasificado en base a su origen genético, para recolectar información geológica y geotécnica con el fin caracterizar el macizo rocoso.

3.1.1. Caracterización de las vetillas selladas

Esta descripción corresponde a vetillas identificadas en el yacimiento El Teniente en base a la clasificación propuesta por Brzovic y Benado (2003), y su relación con los principales ambientes de alteración y mineralización.

El macizo rocoso primario de El Teniente se caracteriza por un denso enrejado polidireccional constituido por vetillas selladas que forman un arreglo tipo *stockwork* (Figura 3.1), el cual alberga más del 70% de la mineralización de cobre del yacimiento (Brzovic y Benado, 2003). El relleno que presentan, suele ser mucho más competente que los que se encuentran en minería a rajo abierto. Dependiendo del relleno mineralógico, las vetillas ofrecen distinta resistencia frente a la acción de esfuerzos, esto le confiere un comportamiento heterogéneo al macizo.

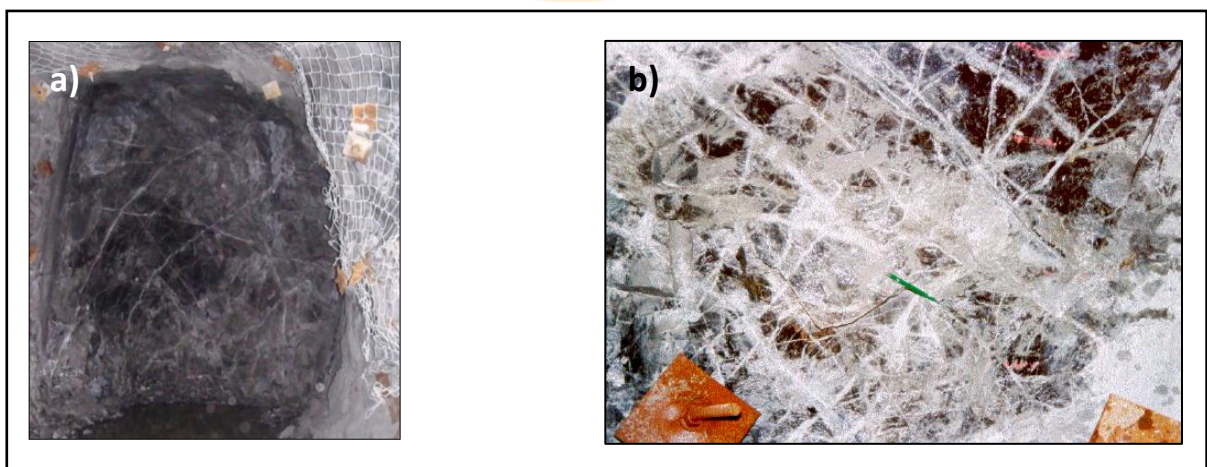


Figura 3.1: *Stockwork* en roca primaria en mina El Teniente. Se observan principalmente vetillas TM de cuarzo. a) Frente (tomado de De Los Santos, 2011); b) La distancia entre los pernos es de 1 m (tomado de Karzulovic, 2001).

Las partes que conforman una vetilla desde el centro hacia sus márgenes se describen a continuación (Figura 3.2):

Traza de la vetilla: superficie imaginaria que pasa por el centro de la vetilla, ésta puede ser recta o sinuosa.

Relleno: mineralogía que rellena la vetilla y sella la estructura, además define el espesor y la resistencia relativa de la vetilla.

Sutura: forma parte del relleno y puede estar o no presente en la vetilla, compuesta generalmente por minerales más blandos que el resto de la vetilla. Constituye una heterogeneidad orientada dentro de la vetilla por donde éstas podrían fracturarse.

Interfase: definida como el contacto entre el relleno y la roca caja, esté alterado o no. Generalmente, corresponde al eslabón más débil del sistema, y es por donde se produce la ruptura de la vetilla.

Halo de alteración: es común que las vetillas desarrollen un halo de alteración en la roca caja. Este halo es producto del cambio químico que afecta a la roca a causa de la acción de los fluidos hidrotermales que generaron la vetilla. Su potencia es variable a lo largo de la vetilla, y el efecto en la roca caja es la reducción de su resistencia. En función del número de halos desarrollados desde el centro de la vetilla se distinguen los halos simples y dobles o complejos.

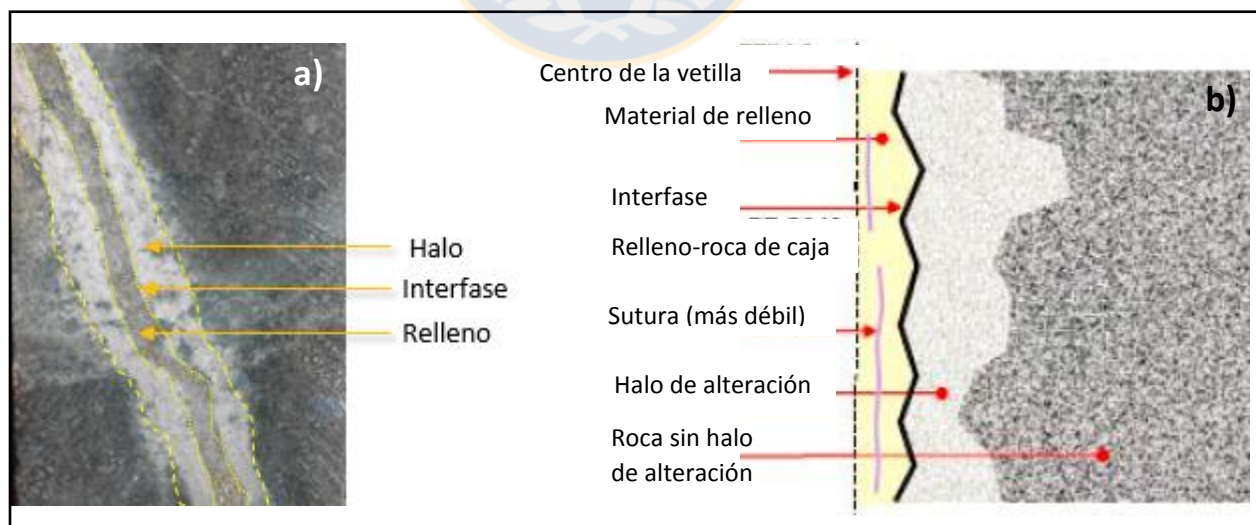


Figura 3.2: Características de una vetilla: a) Vetilla con halo de alteración, interfase relleno-roja caja y relleno; b) esquema de las partes que conforman una vetilla (tomado de Karzulovic, 2001).

3.1.2. Sistema de Clasificación

En la mina El Teniente, las vetillas fueron clasificadas atendiendo la complejidad creciente de su textura, mineralización, abundancia y alteración. Empíricamente se han diferenciado tres categorías denominadas Tardimagmática (TM), Hidrotermal Principal (HP) e Hidrotermal Tardía (HT), que a su vez se subdividen en quince clases o subtipos. Las más complejas son las HT, luego las HP, y las más simples son las TM (Tabla 3.1).

Vetillas Tardimagmáticas (TM)

Su emplazamiento se produjo en un ambiente semi-dúctil, evidenciado por la forma sinuosa de la mayoría de las vetillas, relacionado al emplazamiento del intrusivo (De Los Santos, 2011). Corresponde a zonas de alteración potásica, reflejada por la presencia de cuarzo, biotita, feldespato potásico. Los minerales de mena son calcopirita, bornita, pirita y molibdenita. En la roca caja ocurre peritización de los feldespatos, y biotitización de los minerales máficos y en la masa fundamental de los intrusivos. Agrupa ocho clases de vetillas (Figura 3.3 y 3.4), con o sin halo silíceo o biotítico generalmente simétrico.

Vetilla de magnetita con halo, V1: son nítidas de magnetita oscura. Puede presentar cuarzo, y biotita en cantidades minoritarias, trazas de anhidrita, calcopirita y clorita. El halo es muy difuso en el interfaz halo-roca (Figura 3.3.a).

Vetilla de cuarzo-biotita sin halo, V2: principalmente de cuarzo-biotita y cantidades menores de anhidrita y clorita. En ocasiones, se observa calcopirita, pirita y bornita diseminada, y de forma subordinada, molibdenita (Figura 3.3.b).

Vetilla de cuarzo-biotita con halo, V3: esencialmente de cuarzo-biotita y cantidades menores de anhidrita, calcopirita y clorita. En ocasiones muestra trazas de bornita y molibdenita. El halo es silíceo y difuso, a veces biotítico y posibles trazas de sulfuros diseminados (Figura 3.3.c).

Vetillas de anhidrita con halo, V4: compuestas de anhidrita con biotita y sulfuros diseminados. Su halo es silíceo-biotítico. El interfaz vetilla-halo es nítido, no así el interfaz halo-roca (Figura 3.3.d).

Vetillas de cuarzo mayoritario sin halo, V5: estructuras rellenas de cuarzo con calcopirita, pirita, bornita y molibdenita diseminados. Calcopirita y molibdenita en sutura (Figura 3.3.e).

Tabla 3.1: Tabla de clasificación de vetillas por tipo (modificado de Brzovic y Benado, 2003).

Clase	Mineralogía Típica	Mineralogía Distintiva	Halo	Características Diagnósticas
Categoría TM	V1 mt ±qz±bt ±(anh)±(cpy)±(cl)	mt	Silicio	Magnetita y halo deslavado
	V2 qz-bt-anh-cl ±cp±py±bt ±(mb)	qz-bt	Sin Halo	Sin halo, borde nítidos, mineralogía qz-bt
	V3 qz-bt-anh-cl ±cpy±py±bo	qz-bt-cl	Halo silicio o silicio-clorítico	Halo silicio difuso o sinuoso, mineralogía distintiva qz-bt-cl.
	V4 anh ±bt±cpy ±(mb)±(bo)±(qz)	anh mayoritaria	Halo silicio-biotítico	Anh y halo característico
	V5 qz ±anh±bt±cpy±mb±bo ±(py)±(cl)	qz mayoritario	Sin Halo	Bordes nítidos, sin halo, en stockwork denso, sulfuros diseminados o en sutura central
	V6 anh ±qz±bt±cpy±mb±bo ±(py)±(cl)	anh mayoritaria	Sin Halo	Bordes nítidos, sin halo, en stockwork denso, sulfuros diseminados
	V7 cpy y/o bo y/o py y/o mb ±anh±qz±bt	sulfuros mayoritarios	Sin Halo	Bordes nítidos, sin halo, en stockwork denso.
	V8 tur ±anh±qz ±(cpy)±(mb)±(bo) ±(py)	tur mayoritaria	Sin Halo	Bordes nítidos y sin halo.
Categoría HP	V9 mt ±cpy±py±mb±qz±anh	mt mayoritaria	Halo sericítico-clorítico, puede presentar cpy y/o py diseminada	Halo simple o asimétrico con o sin cl diseminada
	V10 cpy y/o py ±qz±anh±mb	cpy y/o py mayoritaria	Halo sericítico-clorítico, puede presentar cpy y/o py diseminada	Halo bandeado o simple con sulfuros diseminados
	V11 cpy y/o py ±qz±anh±mb	cpy y/o py mayoritaria	Halo sericítico-clorítico	Halo bandeado, semi-complejo con bordes difusos. Puede presentar sulfuros diseminados
	V12 cpy y/o py ±qz±anh±mb	cpy y/o py mayoritaria	Halo silicio-sericítico-clorítico	Doble halo o halo complejo con mineralización diseminada
Categoría HT	V13 cpy-bo-mb-tete-py ±qz±anh±cb±tur ±(ys)±(cl)	sulfuros mayoritarios	Halo silicio-sericítico-clorítico	Variedad mineralógica de sulfuros, halo desarrollado y difuso
	V14 cb y/o ys y/o anh ±cpy±cl±bo±mb ±(tete)±(qz)	carbonatos y sulfatos	Halo silicio-sericítico-clorítico	Halo desarrollado y difuso. Variedad mineralógica. Carbonatos y sulfatos
	V15 tur-anh ±cpy±cb±ys±qz±py±ep ±(bo)±(mb)±(tete)	tur mayoritaria	Halo silicio-sericítico-clorítico	Halo desarrollado y difuso. Variedad mineralógica. Turmalina abundante

Categoría: ubicación genética (TM, HP o HT); **Subtipo:** vetillas de similar asociación mineralógica; **Mineralogía típica:** mineralogía encontrada en vetillas asociadas a un subtipo; **Mineralogía distintiva:** mineralogía más común encontrada en el subtipo de vetilla; **Halo:** mineralogía más común encontrada en el halo de alteración; **Características diagnósticas:** características de las vetillas y halo, que permiten la clasificación de las estructuras. **Anh:** anhidrita; **bt:** biotita; **bo:** bornita; **cpy:** calcopirita; **cb:** carbonato; **cl:** clorita; **ep:** epidota; **mt:** magnetita; **mb:** molibdenita; **py:** pirita; **qz:** cuarzo; **tete:** tenantita-tetraedrita; **tur:** turmalina; **ys:** yeso.

Vetillas de anhidrita mayoritaria sin halo V6: predomina la anhidrita sobre el cuarzo y mineralización metálica. Posibles inclusiones de calcopirita, bornita y molibdenita (Figura 3.3.f).

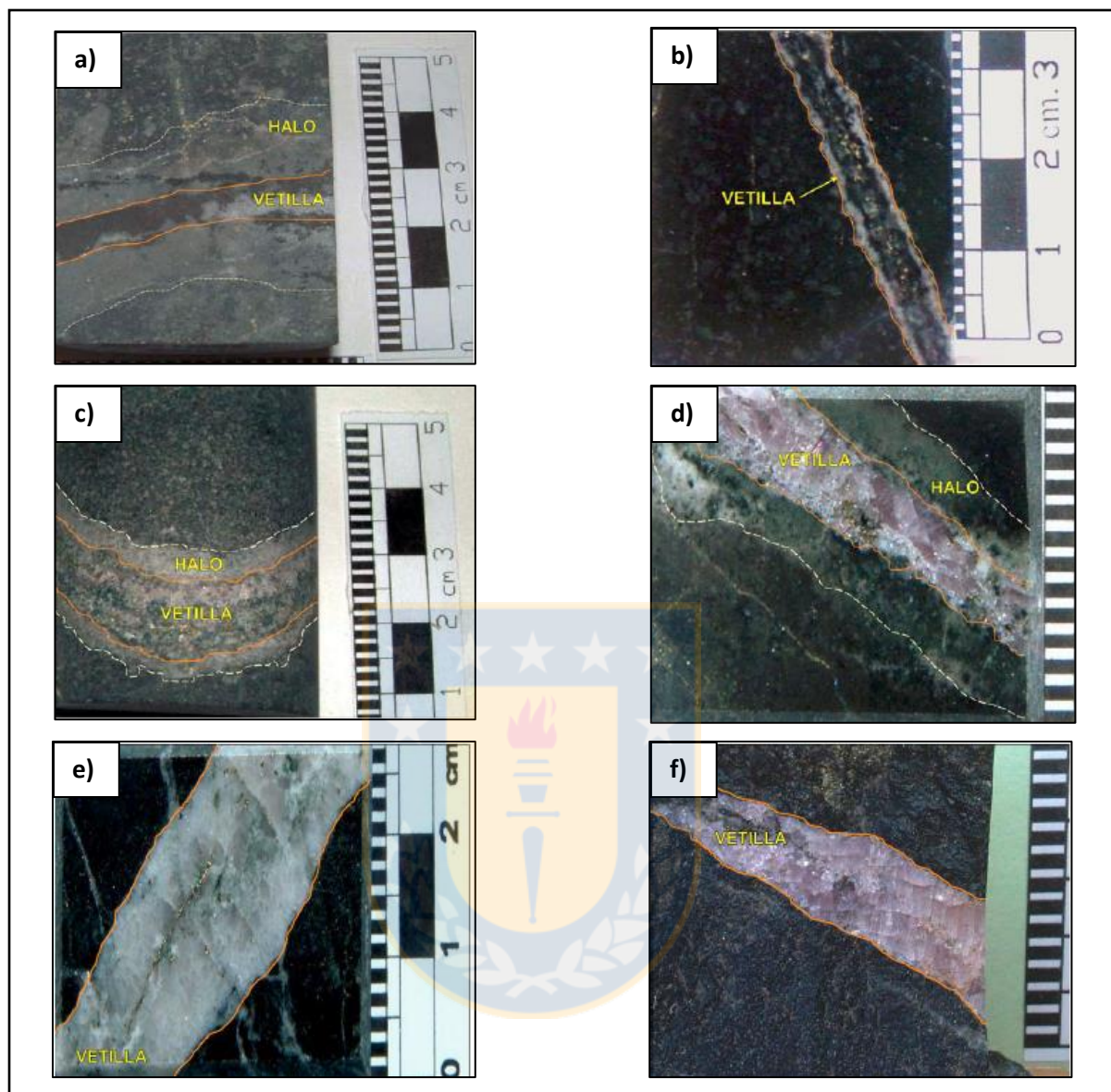


Figura 3.3: **Vetillas Tardimagnéticas parte I:** a) vetilla de magnetita con halo (V1); b) vetilla de cuarzo y biotita sin halo (V2); c) vetilla de cuarzo y biotita con halo silíceo (V3); d) vetilla de anhidrita con halo silíceo-biotítico (V4); e) vetilla de cuarzo mayoritario (V5) con disseminación de calcopirita y pirita y f) vetilla de anhidrita sin halo (V6).

Vetillas de sulfuros mayoritarios sin halo, V7: mayoritariamente de calcopirita, pirita, bonita y molibdenita. Sin halo (Figura 3.4.a).

Vetillas de turmalina, con o sin halo, V8: con turmalina, mayoritaria y menor cantidad de cuarzo y sulfuros. Su halo es difuso silíceo en el CMET (Figura 3.4.b).

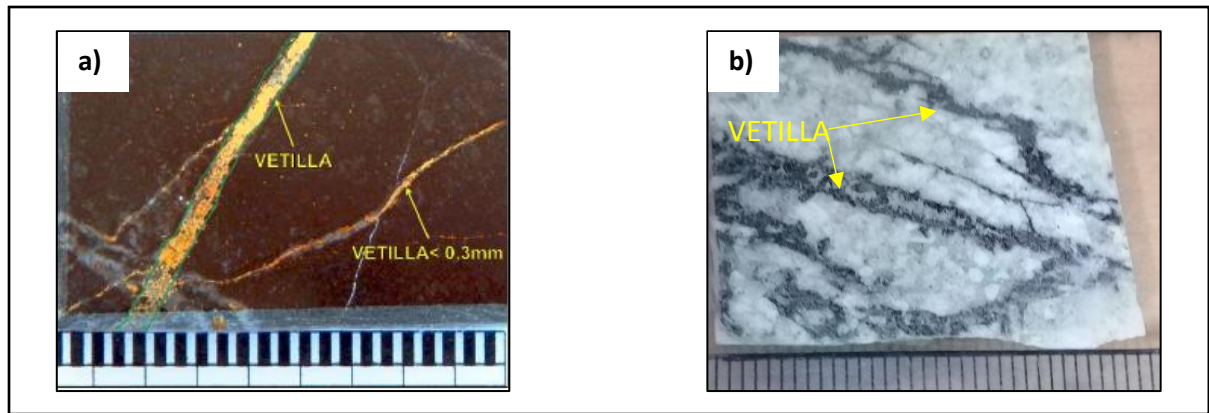


Figura 3.4: Vetillas Tardimagnéticas parte II: a) vetilla de calcopirita sin halo (V7) y b) vetilla de turmalina con halo (V8).

Vetillas Hidrotermales Principales (HP)

Las vetillas se forman en un ambiente frágil, por lo tanto, su traza es más recta. Se desarrolla una alteración fílica a partir de vetillas de sulfuros. Se diferencia de la anterior por la formación de halos simétricos o no simétricos y complejos o simples, de cuarzo, sericita y clorita, con sulfuros diseminados ocasionalmente. Además, por la mayor cantidad de minerales metálicos en el relleno como la calcopirita y molibdenita y una mayor complejidad de las vetillas y estilos de mineralización. Agrupa cuatro clases (Figura 3.5):

Vetilla de magnetita mayoritaria con halo simple, V9: espesor de más de 2 mm y rellenas de magnetita. El halo es simple y en general, asimétrico, en el que predomina la sericita. El aspecto del halo puede ser moteado producto de la asociación clorita-sericita, cúmulos de biotita y, además, calcopirita o piritita diseminada. La interfaz del halo con la roca caja es sinuosa (Figura 3.5.a).

Vetilla de sulfuros mayoritario con halo simple, V10: mineralización masiva de calcopirita y/o piritita. El halo es bandeado o simple, predominantemente con sericita y sulfuros diseminados (Figura 3.5.b).

Veta o vetilla de sulfuros mayoritarios con halo semi-complejo V11: transición entre V10 y V12, debido a la formación de un segundo halo de alteración. Al centro predomina calcopirita y/o piritita masiva. (Figura 3.5.c).

Vetilla de sulfuros mayoritarios con halo complejo, V12: mineralización masiva de calcopirita y/o piritita. El halo es doble, generalmente, el primer halo, es cuarzo-sericítico. El segundo halo es

clorítico-sericítico y la interfaz con la roca caja es nítida o difusa (Figura 3. 5.d).

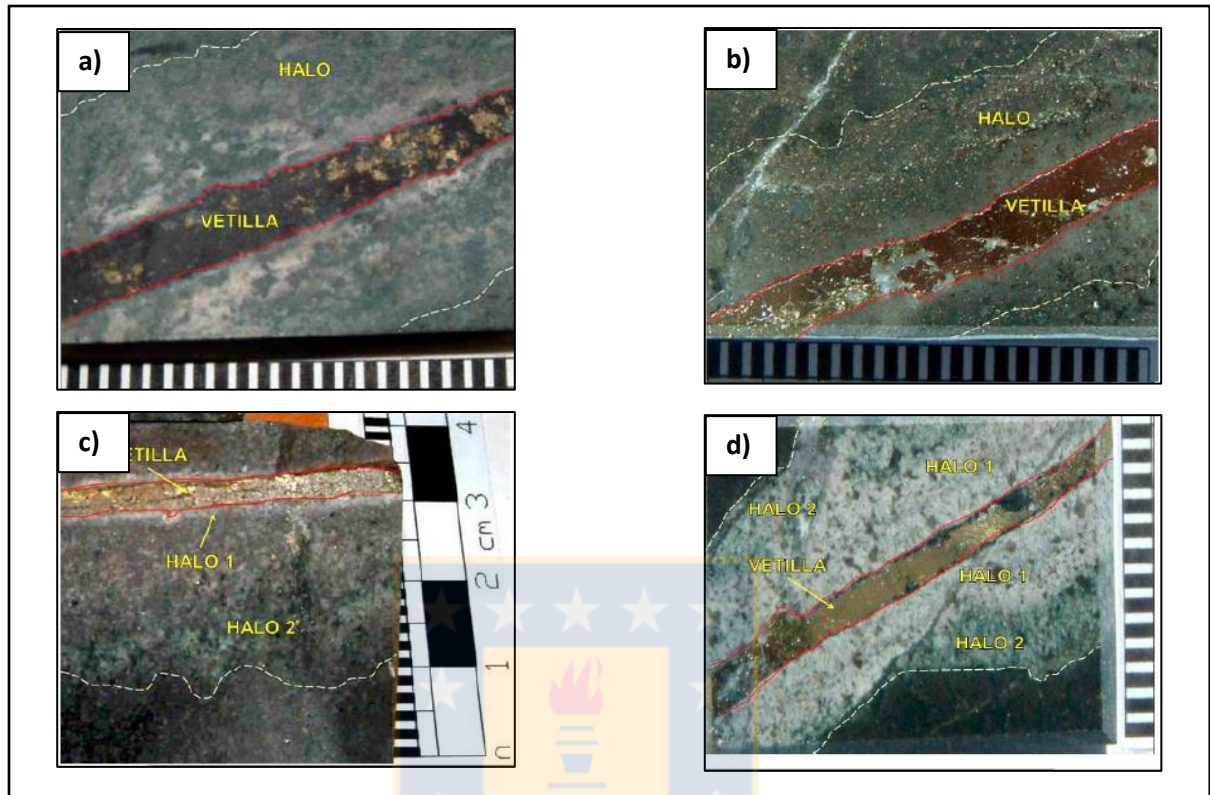


Figura 3.5: Vetillas Hidrotermales Principales (HP): a) vetilla de magnetita y calcopirita con halo de sericita-cuarzo (V9); b) vetilla masiva de calcopirita (V10) con diseminaciones de cuarzo con halo; c) vetilla de calcopirita mayoritaria con halo semi-complejo (V11); d) vetilla de calcopirita con halo doble (V12).

Vetillas Hidrotermales Tardías (HT)

Consisten en tres clases de vetillas, se diferencia de las anteriores por la aparición de nuevos minerales no metálicos (carbonatos, yeso y turmalina), y metálicos (tenantita). Su mineralización es masiva, irregular, como parche o cúmulos, con halos desarrollados y difusos sericíticos o cuarzo-sericíticos (Figura 3.6).

Vetillas de sulfuros mayoritarios, V13: principalmente de sulfuros masivos como la bornita y tenantita-tetraedrita, y en menor medida cuarzo, anhidrita y carbonatos. Halo de bordes difusos, generalmente bien desarrollados (Figura 3.6.a).

Vetillas de carbonatos y sulfatos mayoritarios, V14: mayoritariamente de carbonatos y/o sulfatos masivos como la calcita, ankerita, siderita, yeso y anhidrita. Cantidades menores de sulfuros. El

halo es desarrollado y difuso, compuesto de sericita-clorita (Figura 3.6.b)

Vetillas de turmalina mayoritaria, V15: estructuras rellanas de turmalina y en menor medida anhidrita. Trazas ocasionales de epidota. El halo es difuso, principalmente sericítico (Figura 3.6.c).

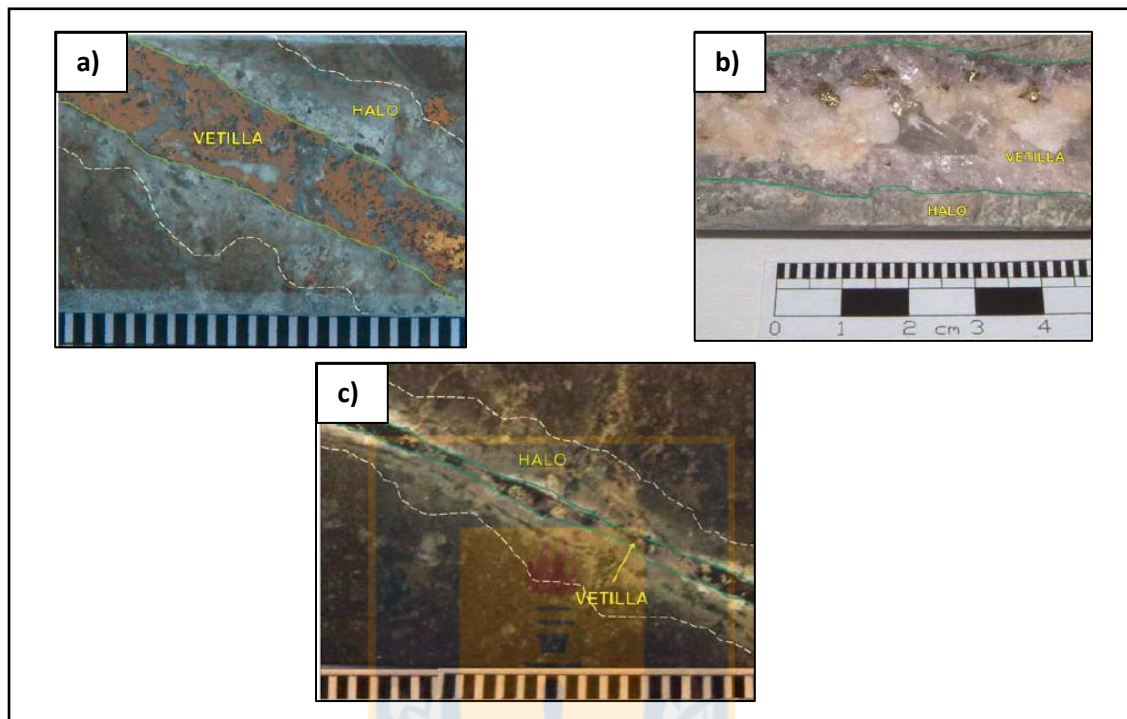


Figura 3.6: **Vetillas Hidrotermales Tardías:** a) vetilla de bornita y calcopirita con halo de cuarzo-sericita (V13); b) Vetilla de calcita y anhidrita con halo de cuarzo-sericita (V14); c) vetilla de turmalina con cuarzo y calcopirita diseminada (V15).

3.1.3. RESISTENCIA DE LAS VETILLAS

Luego de varios ensayos geotécnicos realizados en El Teniente, se ha demostrado que las rupturas desarrolladas por las vetillas ofrecen menor resistencia que aquellas producidas a través de la matriz de la roca, constituyendo así un plano de debilidad por donde el macizo rocoso se fracturará durante el proceso de *caving* (de los Santos, 2011). Se determinó que esta resistencia depende directamente de las características físicas de las estructuras, como su espesor y la dureza de los minerales del relleno mineralógico. Se demostró que a mayor espesor, menor es la resistencia, siendo esto significativo a partir de vetillas mayores a 1 mm (Figura 3.7). En cuanto al relleno, se determinó que, a menor proporción de minerales duros según la escala de Mohs, menor es la resistencia

(Figura 3.8). Así se definió como vetilla blanda toda aquella estructura sellada mayor a 1 mm con un porcentaje de minerales duros menor o igual al 35%. Se entiende como minerales duros a aquellos con una dureza de Mohs igual o mayor a 4.5 (turmalina, cuarzo, pirita y magnetita). Al contrario, los minerales con una dureza menor a 4.5 en la escala de Mohs, se consideran blandos (anhidrita, calcopirita, carbonatos, bornita, sericita, biotita, yeso, clorita y molibdenita). Un caso especial es el de la pirita, la cual, a pesar de ser un mineral duro, se ha observado en ensayos geotécnicos que su resistencia a la tracción es baja, de forma comparable a la de minerales blandos (De Los Santos y Brzovic, 2013).

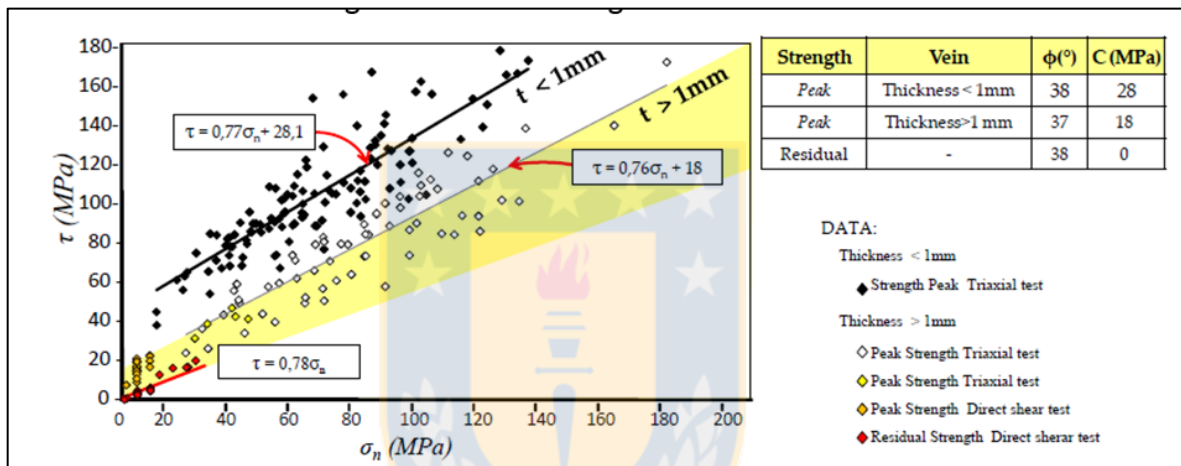


Figura 3.7: Resistencia de cizalle de las vetillas según su espesor, obtenidos a partir de una serie de ensayos (extraído de De Los Santos y Brzovic, 2013).

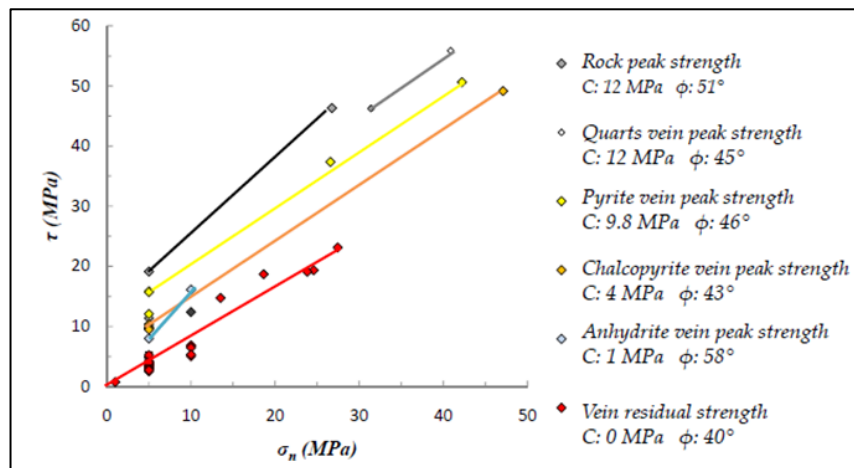


Figura 3.8: Resistencia de cizalle en función del mineral de relleno de las vetillas. Incluye el valor obtenido para una roca intacta (extraído de De Los Santos y Brzovic, 2013).

3.2. Método de explotación

3.2.1. Block-Caving y Fragmentación

Debido a que la zona de explotación actual de El Teniente corresponde a un macizo rocoso muy competente, los métodos de explotación utilizados son el *Block Caving* y el *Panel Caving* (Figura 3.9). Ambos métodos consisten en una serie de procesos destinados a cortar la base que sostiene el “bloque” o “panel” de la zona mineral. El objetivo es que la base inferior de dicho bloque o panel se comporte como una viga apoyada, la que, gracias a la gravedad, produce una primera socavación y posteriormente el desplome completo del bloque o panel. De esta forma, los fragmentos generados pueden ser operados y transportados de acuerdo al diseño minero y sistema de manejo de materiales del sector productivo (Cavieres, 1999).

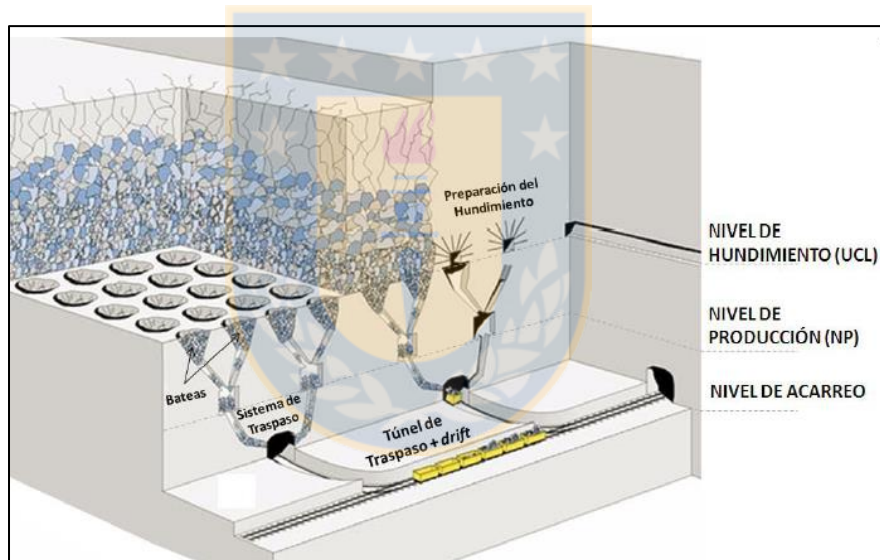


Figura 3.9: Método de hundimiento o *Caving*, esquema idealizado sin escala, modificado de Hamrin, 2001.

Durante el proceso de hundimiento, existe fragmentación, es decir una continua ruptura del macizo rocoso, donde se generan bloques debido a su socavación. Este fenómeno consiste en tres etapas: Fragmentación In Situ, Fragmentación Primaria y Fragmentación Secundaria (Figura 3.10).

Fragmentación In Situ: corresponde a los bloques intrínsecos que posee el macizo rocoso debido a las discontinuidades presentes, previas a la socavación del macizo. En general, las dimensiones de estos bloques se pueden estimar desde la información obtenida de sondeos (discontinuidades y sus

orientaciones). Además, debido al alto costo de los sondeos de exploración, es conveniente realizar estimaciones numéricas probabilísticas para predecir los supuestos bloques que deberían estar formados “in situ”.

Fragmentación Primaria: cuando el macizo comienza a ser socavado, la roca que se encuentra inmediatamente arriba de la socavación (*cave back*) comienza a fracturarse debido a la redistribución de esfuerzos en el macizo rocoso. Estas nuevas fracturas producen nuevos bloques (Figura 3.10).

Fragmentación Secundaria: después de que los bloques comienzan a desprenderse desde la socavación o *cave back*, estos quedan apilados en una columna. Durante el proceso de extracción del mineral, todos los bloques apilados comienzan a bajar desde esta columna, y por consiguiente comienzan a fracturarse entre ellos debido al movimiento (Figura 3.10).

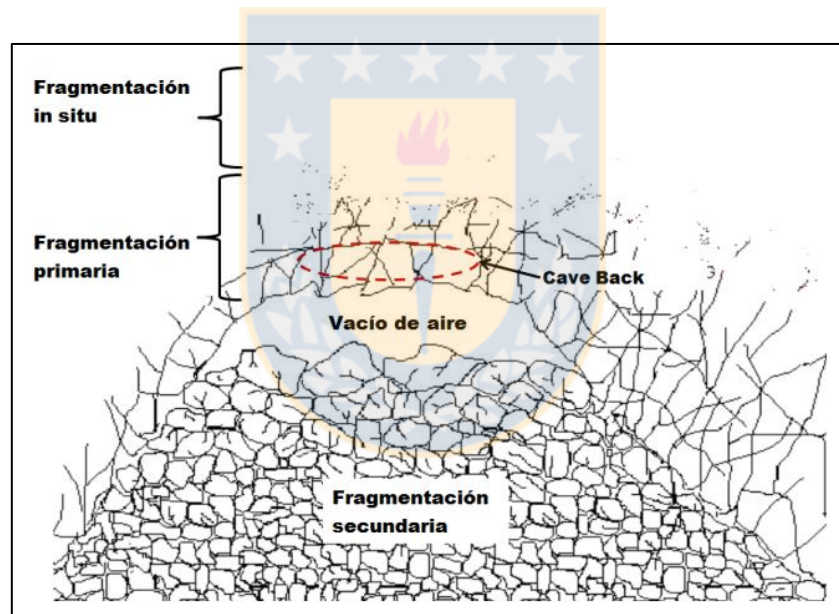


Figura 3.10: Etapas de fragmentación: Fragmentación In situ, Fragmentación Primaria y Fragmentación Secundaria.

El diseño y método de explotación minera dependen del comportamiento mecánico del macizo rocoso, el cual es controlado por la interacción de una serie de parámetros. En una minería subterránea dichos parámetros se dividen en predeterminados y controlables (Willoner. 2000). Los predeterminados corresponden a las características geológicas de la roca como: la litología, presencia de estructuras, su modo de ruptura y nivel de esfuerzo in situ a la que está sometida la roca. Los controlables son aquellos relacionados con el diseño minero.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se realizan los análisis de frecuencia de vetillas blandas por metro (P_{10}) de 433 tramos de sondajes mapeados en el sector Esmeralda, con la finalidad de generar un modelo de Bloques. Cuando se refiera a frecuencia de vetillas, siempre se trata de vetillas blandas, es decir con un máximo de 35% de minerales duros. Este estudio comprende:

- Análisis por: litología, zona minera y zona geotécnica.
- Definición de unidades de estimación para modelo de bloques.

4.1. UNIDADES LITOLÓGICAS

En primer lugar, se graficó la frecuencia de vetillas por metro para cada una de las litologías presentes en el estudio (Figura 4.1). A partir de esta información, y con el fin de simplificar los resultados, se agruparon algunas unidades de acuerdo a sus similitudes litológicas y de frecuencia de vetillas (P_{10}) (Figura 4.2 y 4.3):

- Grupo Tonalita: Tonalita (TO), Brecha Ígnea de Tonalita (BXITO) y Pórfido Diorítico Blanco (PDB).
- Grupo Diorita: Pórfido Diorítico (PDI), Brecha Ígnea de Diorita (BXIPDI) y Pórfido Diorítico Grueso (PDG).
- Grupo Microdiorita: Pórfido Microdiorítico (PMD) y la Brecha Ígnea de Pórfido Microdiorítico (BXIPMD).
- Grupo Brecha Hidrotermal interior (BXHT_INT): Brecha Hidrotermal de Biotita (BXBI) y Brecha Hidrotermal de Feldespato-Potásico (BXKFD), ambas con clastos de tonalita.
- Grupo Brecha Hidrotermal marginal (BXHT_MARG): Brecha Hidrotermal de Turmalina (BXTU), Brecha Hidrotermal de Clorita (BXCL) y Brecha Hidrotermal de Sericita (BXSER).
- Grupo CMET: Complejo Máfico El Teniente (CMET) y Brecha Ígnea del Complejo Máfico El Teniente (BXICMET).

- Complejo Brechas Braden (CBB): incluye todas las variedades de brechas Braden, como clorita, sericita y turmalina.
- Brecha de Anhidrita (BXANH): brechas con clastos de CMET cercanos a la pipa y con clastos de rocas intrusivas félsicas hacia el interior.

Las unidades litológicas intrusivas félsicas y máficas (Tonalita, Pórfido Diorítico y Pórfido Microdiorítico y Complejo Máfico El Teniente), tienen asociadas cuerpos pequeños conocidos como brechas ígneas, las cuales fueran incorporadas en una sola unidad junto con las unidades intrusivas mayores. Esta agrupación se realiza de acuerdo a la litología, a la ubicación espacial, y a los análisis estadísticos que entregan promedios y distribución de P_{10} bastante similares (Figura 4.1, 4.2 y 4.3). Si bien, algunas de estas litologías no presentan una frecuencia de vetillas afines al resto del grupo, esto se debe a la baja cantidad de muestras disponibles, como es el caso del Pórfido Diorítico Blanco (6 muestras) y Pórfido Diorítico Grueso (4 muestras) (Figura 4.1 y 4.3). La decisión de agruparlos con las tonalitas y las dioritas, respectivamente, se basa en la ubicación espacial de estos cuerpos pequeños y su similitud litológica.

Algo similar ocurre con la Brecha Ígnea de Pórfido Microdiorítico (4 muestras) y el Pórfido Microdiorítico (9 muestras), ambas litologías con muy pocas muestras (Figura 4.1).

La Brecha de Anhidrita, la Brecha de Biotita y la Brecha de Feldespato Potásico (Brechas Hidrotermales interiores) muestran valores de P_{10} bastante similares con valores entre los 0,157 y 0,166 (Figura 4.1 y 4.3), así como la Brecha de Clorita, Brecha de Turmalina y Brecha de Sericita (Brechas Hidrotermales marginales) con las rocas del Complejo de Brecha Braden con valores entre 0,066 y 0,063 (Figura 4.2 y 4.4a-b). A partir de la Figura 4.2 y 4.4c-d-e, se puede concluir en cuanto a las rocas félsicas, que los valores de frecuencia de vetillas del Grupo Tonalita y Microdiorítico presentan valores muy similares cercanos a 0,2, mientras que el Grupo Diorita se escapa ligeramente con 0,3. Las muestras de CMET presentan la mayor variabilidad de P_{10} , con valores entre 0 y 6,89 (Figura 4.2). Esta gran dispersión de valores más los quiebres observados en el gráfico cuantil-cuantil (Figura 4.4f) y la vasta extensión espacial de esta litología, sugieren la necesidad de separar el CMET en distintas subzonas.

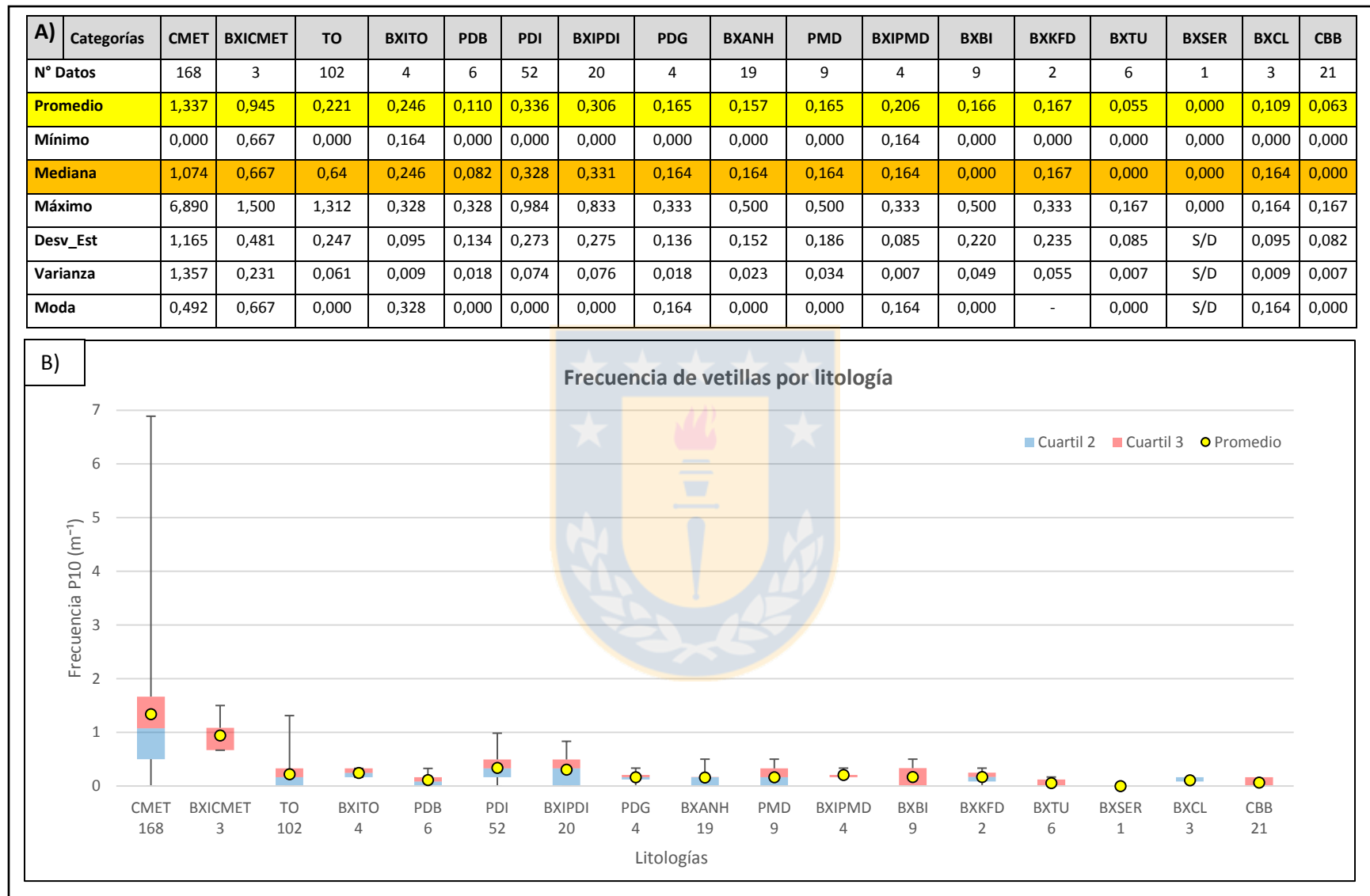


Figura 4.1: A) Tabla de la estadística descriptiva y B) diagrama de cajas de frecuencia de vetillas por litología.

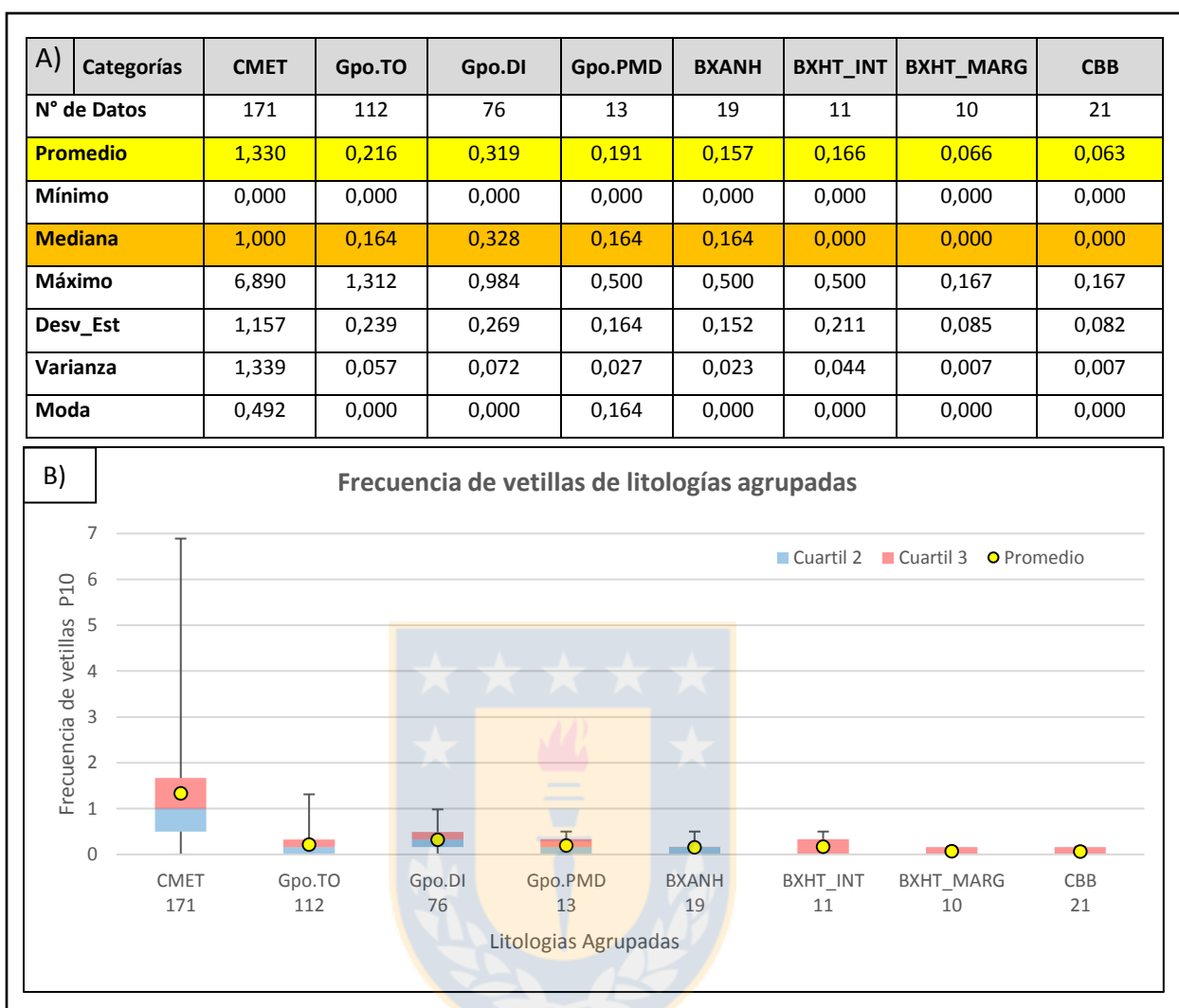


Figura 4.2: A) Tabla de estadística descriptiva y B) diagrama de cajas de P₁₀ para litologías agrupadas.

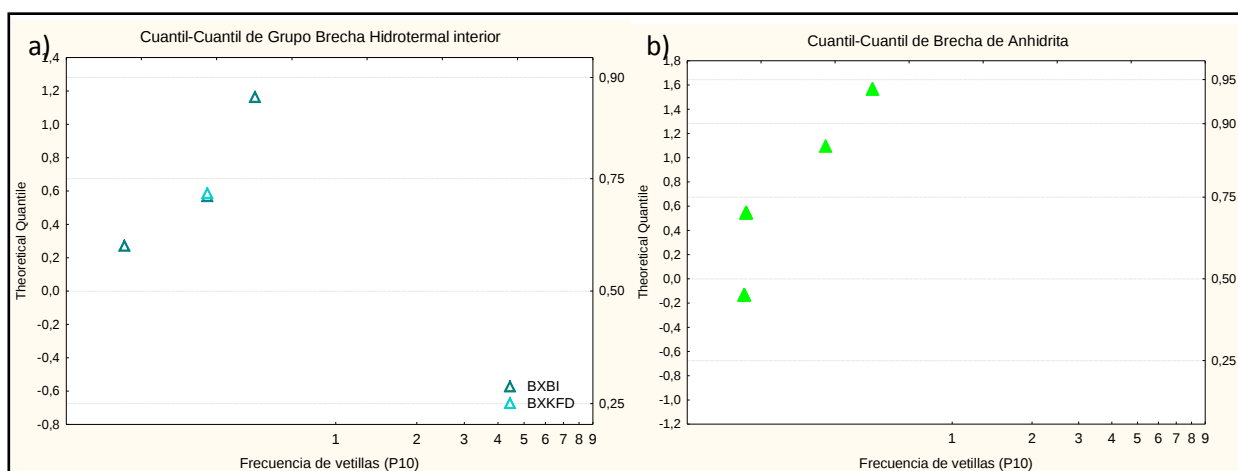


Figura 4.3: Gráfico cuantil-cuantil de P₁₀ de: a) Grupo Brecha Hidrotermal interior (Brecha de Biotita y Brecha de Feldespato potásico) y b) Brecha de Anhidrita.

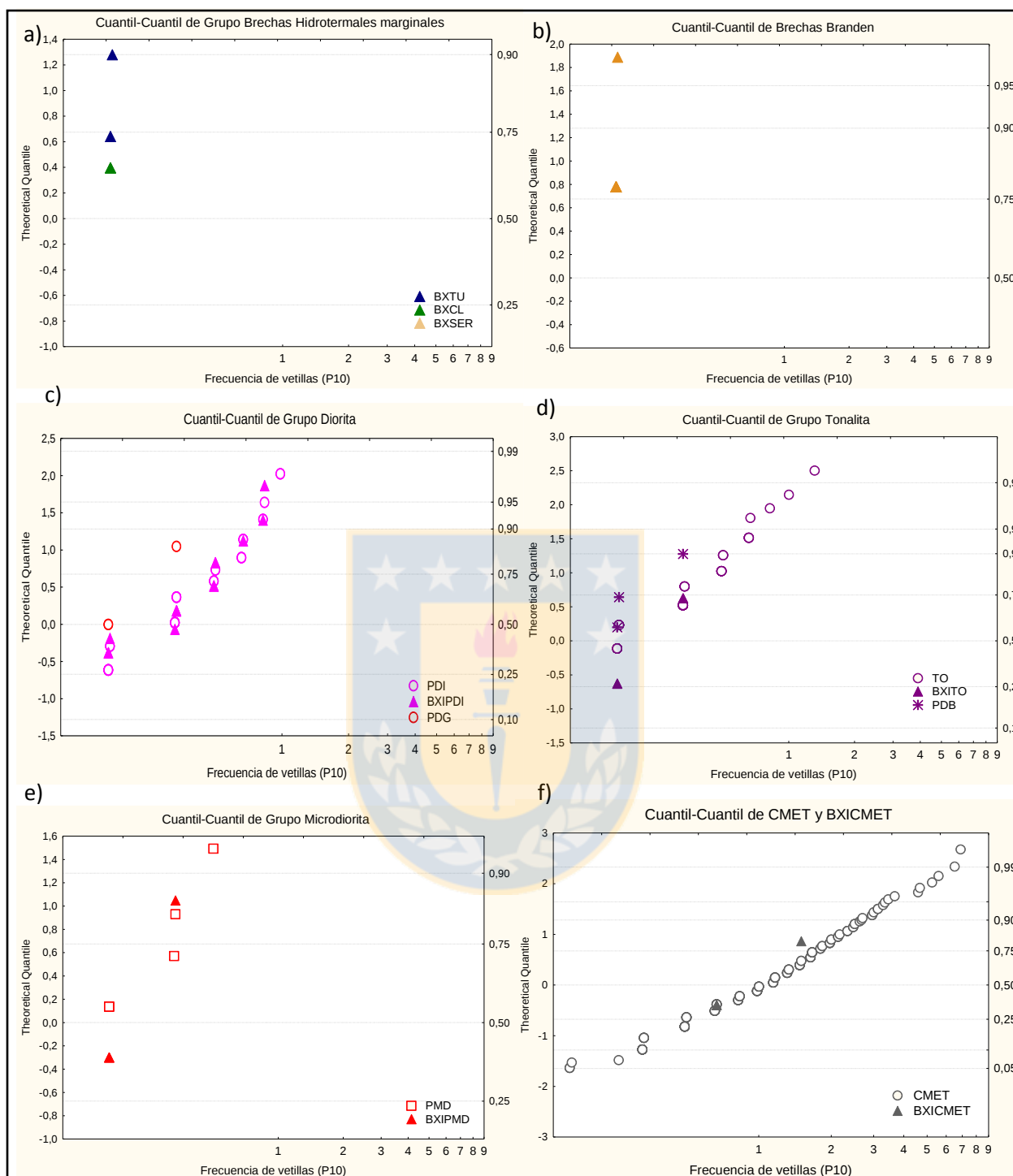


Figura 4.4: Gráficos cuantil-cuantil de P_{10} de: a) Grupo Brecha Hidrotermal marginal (Brecha de Turmalina, Brecha de Clorita y Brecha de Sericita); b) Complejo Brecha Braden. c) Grupo Diorita (Pórfido Diorítico; Brecha Ígnea de Pórfido Diorítico y Pórfido Diorítico Grueso); d) Grupo Tonalita (Tonalita, Brecha Ígnea de Tonalita y Pórfido Diorítico Blanco); e) Grupo Microdiorita (Pórfido Microdiorítico y Brecha Ígnea de Pórfido Microdiorítico) y f) Complejo Máfico El Teniente y Brecha Ígnea del Complejo Máfico El Teniente.

4.2. ZONA MINERA

Este análisis tuvo la finalidad de determinar algún tipo de diferencia en términos de la frecuencia de vetillas entre los sectores productivos de Esmeralda, Bloque 1 y el Bloque 2.

El Bloque 1 se ubica adyacente a la Pipa de Brecha Braden (Figura 4.5). Se compone de Brecha Braden y rocas del Grupo Brecha Hidrotermal marginal, ambas con P_{10} muy bajo; por otro lado, se observa, en comparación con el Bloque 2, una mayor proporción de rocas del Complejo Máfico El Teniente (CMET) y menor de rocas intrusivas félsicas, donde predomina el Grupo Diorita (Figura 4.5 y 4.6). En contraste, el Bloque 2 se ubica al este del Bloque 1 (Figura 4.5). En este bloque existe una mayor cantidad de rocas intrusivas, donde predomina el Grupo Tonalita, aparece el Grupo Microdiorítico, y el Grupo Brecha Hidrotermal interior, compuesta de clastos de tonalita (Figura 4.6).

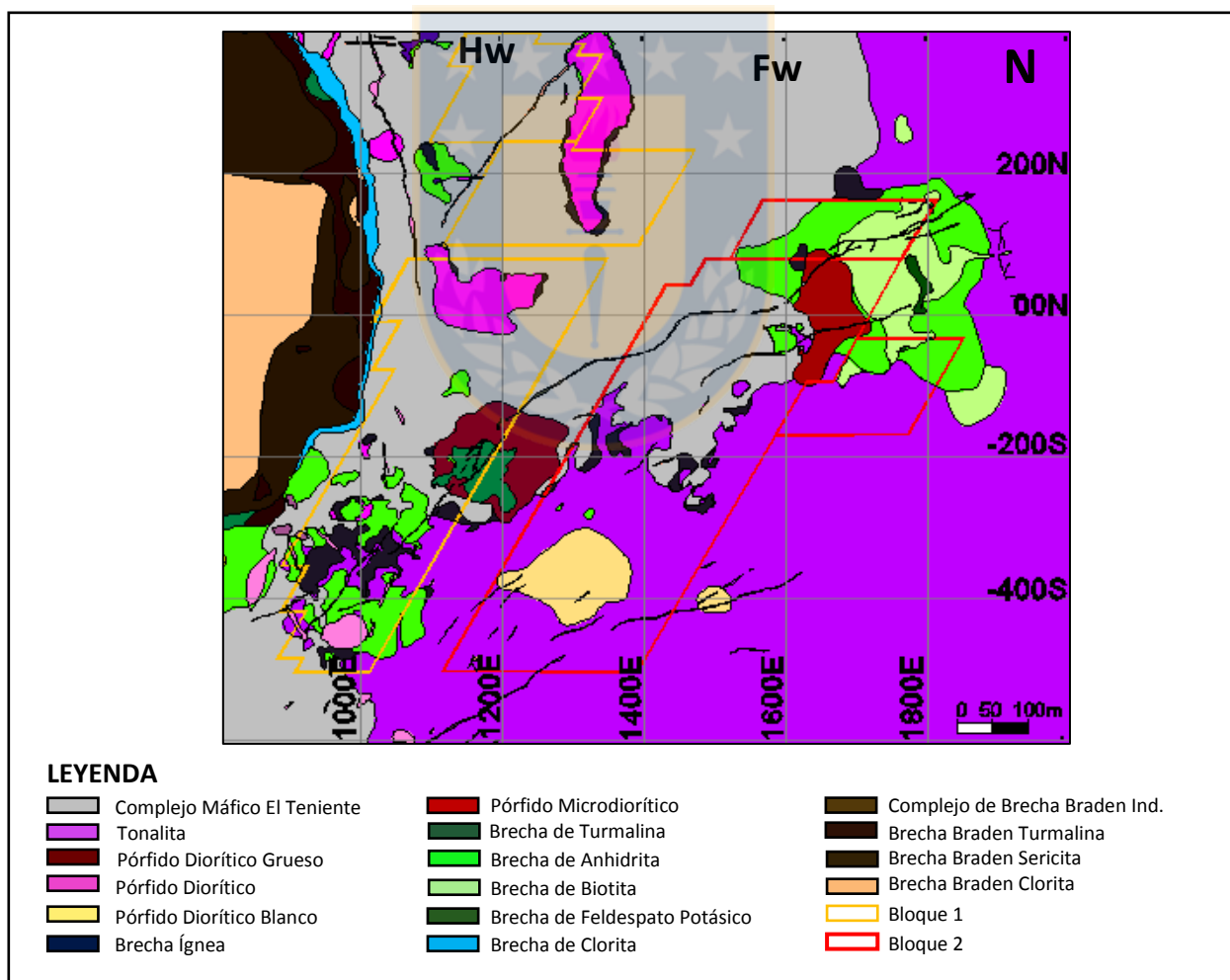


Figura 4.5: Plano litológico Mina Esmeralda Sur, cota 2192 de los sectores productivos Bloque 1 (naranja) y Bloque 2 (rojo) (modificado de De Los Santos y Ramírez, 2018).

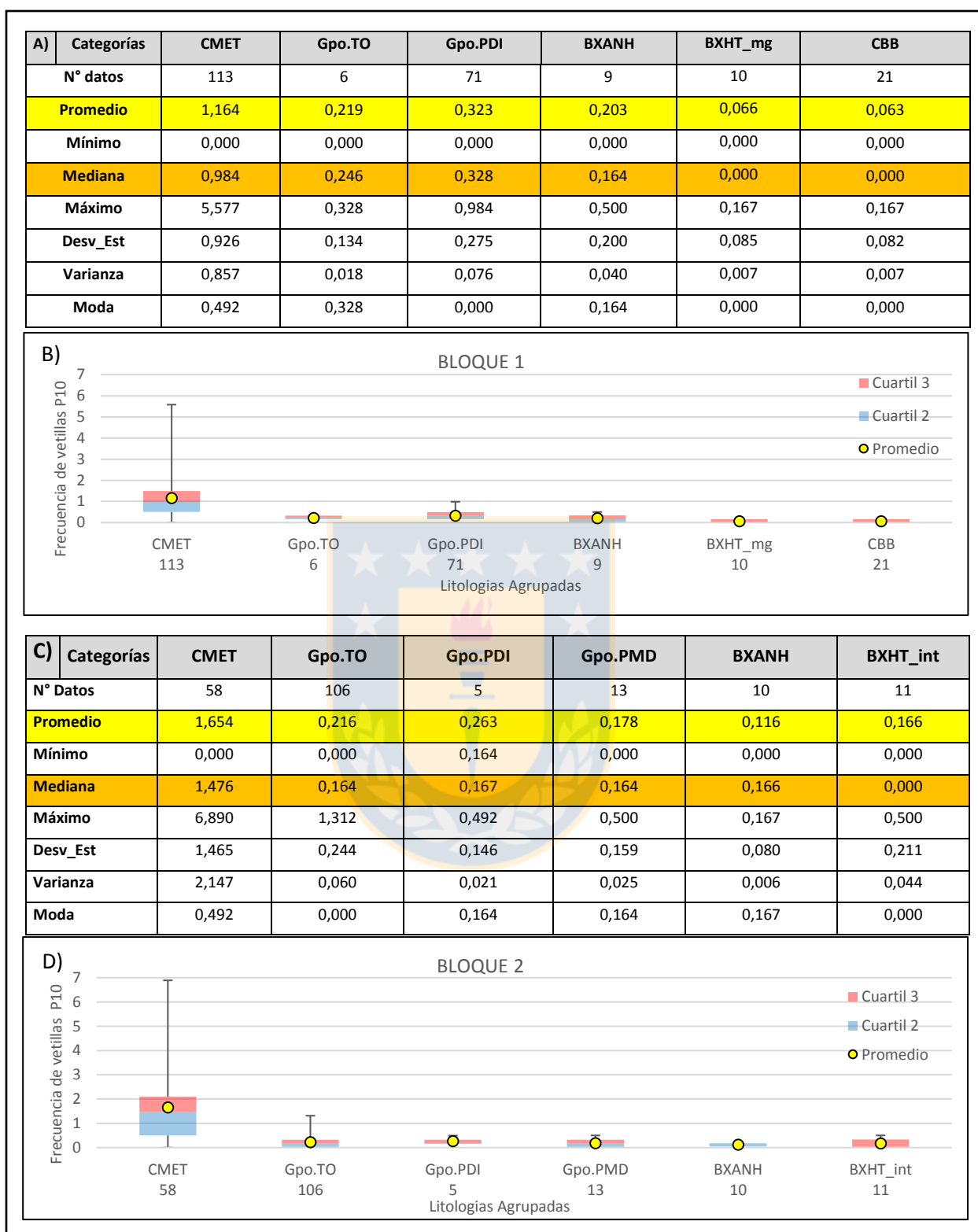


Figura 4.6: A) Estadística descriptiva y B) diagrama de cajas de frecuencia de vetillas por litologías agrupadas del Bloque 1; C) Estadística descriptiva y D) diagrama de cajas de frecuencia de vetillas blandas por litologías agrupadas del Bloque 2.

Las rocas del Complejo Máfico El Teniente (CMET) del Bloque 2 presentan mayor cantidad de vetillas blandas que el CMET del Bloque 1 (Figura 4.6) posiblemente asociadas a diferencias mineralógicas entre ambos bloques, caracterizadas principalmente por el aumento de la calcopirita hacia el este. Por otro lado, los quiebres del CMET en los gráficos cuantil-cuantil de la Figura 4.7, indican la existencia de más una población, tanto en el Bloque 1 como en el Bloque 2, por lo tanto, es necesario separar el CMET en dos poblaciones, una al oeste y la otra al este.

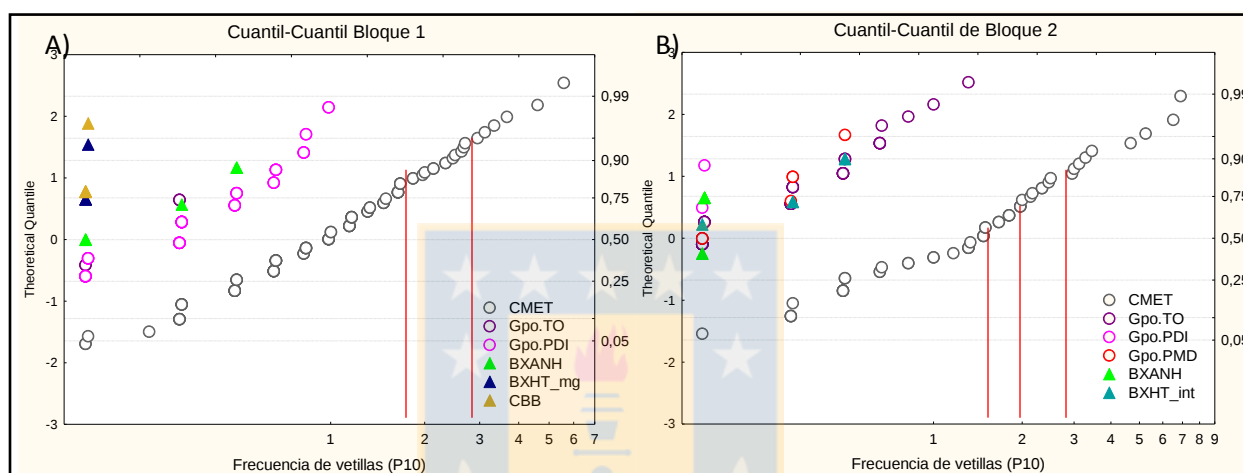


Figura 4.7: Gráfico cuantil-cuantil P₁₀ por litología agrupada del: **A) Bloque 1** y **B) Bloque 2**. Las líneas rojas indican los quiebres que podrían indicar distintas poblaciones del CMET. CMET: Complejo Máfico El Teniente; Gpo TO: Grupo Tonalita; Gpo PDI: Grupo Pórfido Diorítico; Gpo. PMD: Grupo Pórfido Microdiorítico; BXANH: Brecha de Anhidrita; BXHT_int: Brecha Hidrotermal interior; BXHT_mg: Brecha Hidrotermal marginal y CBB: Complejo Brecha Braden.

Además de lo anterior, en el caso de la Brecha de Anhidrita (BXANH), en el Bloque 1 la brechización ocurre en CMET, mientras que en el Bloque 2 ocurre en rocas intrusivas félsicas caracterizadas por su menor contenido de estructuras en comparación con la unidad litológica CMET (Figura 4.6 y 4.8), estos resultados dan el sustento para diferenciar dos tipos de Brecha de Anhidrita, la del Bloque 1 y la del Bloque 2 como se observa en el gráfico cuantil-cuantil de la Figura 4.8. La frecuencia de vetillas blandas en las rocas intrusivas no varía de forma significativa entre los bloques (Figura 4.7), por lo tanto, no se reconoce la existencia de subpoblaciones dentro de los grupos de rocas intrusivas félsicas.

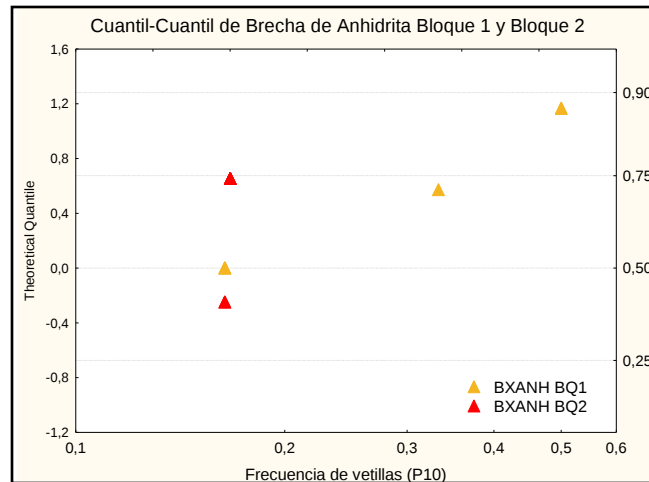


Figura 4.8: Gráfico cuantil-cuantil P_{10} de Brecha de Anhidrita Bloque 1 (naranja) y Bloque 2 (rojo), se observan dos poblaciones distintas.

4.3. ZONACIÓN GEOTÉCNICA

Con el objetivo de caracterizar geotécnicamente el macizo rocoso y los parámetros asociados (resistencia, hundibilidad, fragmentación, entre otros) de los distintos sectores del yacimiento, la Superintendencia de Geología confeccionó un modelo geotécnico en 3D (Shachter, 2017). La Tabla 4.1 muestra las 5 zonas geotécnicas definidas en roca primaria sobre la base de volúmenes de roca con características geotécnicas similares, es decir que comparten propiedades físicas de la roca, calidad geotécnica, frecuencia de vetillas blandas, hundibilidad, fragmentación, productividad y resistencia a escala del macizo rocoso (Shachter, 2017).

Tabla 4.1: Zonas geotécnicas, definidas por la Superintendencia de Geología para El Teniente (Millán, 2018).

	Hundibilidad	Fragmentación	Calidad geotécnica
ZONA GRIS	Muy mala	Muy gruesa	Muy buena
ZONA AZUL	Mala	Gruesa	Buena-Muy buena
ZONA VERDE	Regular	Regular	Buena
ZONA CELESTE	Regular-Buena	Regular	Regular-Buena
ZONA ROJA	Buena-Muy buena	Fina	Regular
SECUNDARIO	Muy Buena	Muy Fina	Muy Mala

En este caso, la división se hará en base al tipo de mena, litología, frecuencia de vetillas blandas (Figura 4.9).

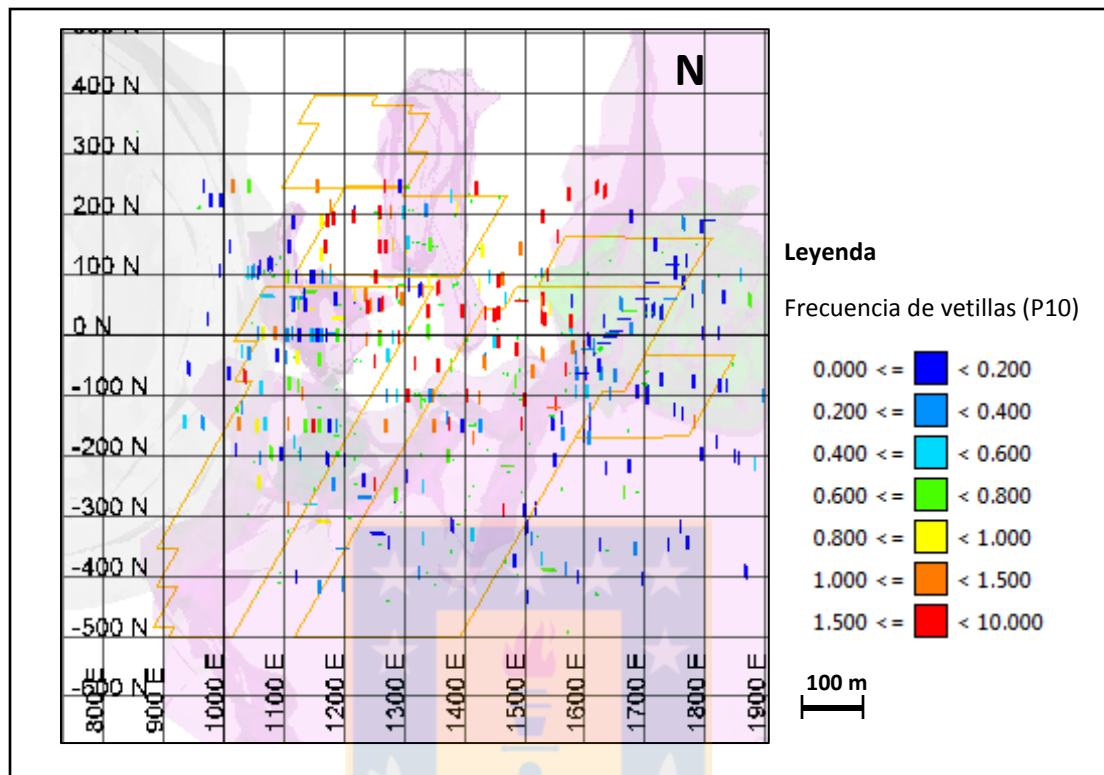


Figura 4.9: Vista en planta de los valores de frecuencia de vetillas blandas en los sectores productivos de Esmeralda (en naranja).

4.3.1. TIPO DE MENA

En primer lugar, se diferencia el tipo de mena, ya que el cambio entre roca primaria y secundaria define un límite de calidad geotécnico:

Mena Primaria: roca que se encuentra a mayor profundidad por lo que no ha sido expuesta a condiciones oxidantes y mantiene una mineralogía hipógena como calcopirita, piritita y bornita.

Mena Secundaria: roca afectada por alteración supérgena, muy fracturada y meteorizada, debido a ello los valores de sus parámetros de resistencia y deformabilidad son bajos. Se encuentra en la parte superior del basamento rocoso, sobre la roca primaria. Los estudios geotécnicos realizados indican que tiene una calidad geotécnica de muy mala a mala y una hundibilidad y fragmentación muy buena (Millán, 2018).

4.3.2. LITOLOGÍA Y FRECUENCIA DE VETILLAS

Cada una de las unidades litológicas con mena primaria fueron agrupadas de acuerdo a sus propiedades de resistencia, deformabilidad, mineralógicas y frecuencia de vetillas blandas, las que se distinguen en la Tabla 4.2 para finalmente ser transformadas en zonas geotécnicas para la construcción de un modelo de bloques. Para la confección de las unidades geotécnicas se tomaron en consideración las siguientes agrupaciones litológicas definidas en los análisis anteriores:

Tabla 4.2: Resumen de características de deformabilidad, resistencia y mineralogía; γ : densidad; UCS: resistencia a la compresión; E: módulo de Young; ν : Coef. De Poisson; v_p : propagación de onda P; v_s : propagación de onda S (Modificado de Millán, 2017).

LITOLOGÍA	γ (ton/m ³)	UCS (MPa)	E (GPa)	ν	v_p (m/s)	v_s (m/s)	Mineralogía
CMET E	$2,80 \pm 0.03$	108 ± 10	50 ± 8	$0,18 \pm 0.07$	5.747 ± 535	3.221 ± 365	Qz-Cpy-Py
CMET W	$2,80 \pm 0.04$	135 ± 12	57 ± 11	$0,18 \pm 0.05$	5.646 ± 428	3.191 ± 365	Qz-Anh-Bo-Cpy-Moli-Cb
Gpo. TO	$2,72 \pm 0.04$	162 ± 29	49 ± 4	$0,23 \pm 0.03$	5.078 ± 653	2.936 ± 262	Qz-Cpy-Py
Gpo. PDI	$2,70 \pm 0.03$	140 ± 12	48 ± 4	$0,21 \pm 0.04$	5.011 ± 245	2.961 ± 296	Qz-Cpy-Py
Gpo. PMD	$2,75 \pm 0.05$	148 ± 15	45 ± 6	$0,34 \pm 0.06$	4.936 ± 416	2.790 ± 199	Qz-Cpy-Py
BXANH B1	$2,71 \pm 0.08$	108 ± 17	42 ± 10	$0,17 \pm 0.05$	4.999 ± 158	2.916 ± 167	Qz-Anh-Cpy
BXANH B2	-	-	-	-	-	-	Qz-Cpy-Py
BXHT INT	-	-	-	-	-	-	Qz-Cpy-Py
BXTU	$2,77 \pm 0.09$	92 ± 24	43 ± 16	$0,15 \pm 0.05$	5.105 ± 705	2.628 ± 333	Anh-Ys.Cb-Cpy-Bo
CBB	$2,55 \pm 0.05$	77 ± 15	29 ± 3	$0,22 \pm 0.04$	4.170 ± 225	2.343 ± 238	Anh-Ys-Cb-Py

Complejo Máfico El Teniente CMET

Los análisis anteriores dieron como resultado la existencia de más de un tipo de CMET, uno de mayor frecuencia de vetillas al este, y otro de menor frecuencia al oeste. Para encontrar el límite y la razón de esta diferencia se realiza un análisis de zona mineral y de tipo de stockwork.

Zonación mineral CMET

La Superintendencia de Geología confeccionó un modelo de zonación mineral, el que consiste en cinco zonas minerales representadas por los sulfuros principales (Figura 4.10) presentes en el yacimiento. Este modelo se compone de las siguientes zonas:

- Bo 100
- Bo>Cpy
- Cpy 100
- Cpy>Py
- Py>Cpy
- Py

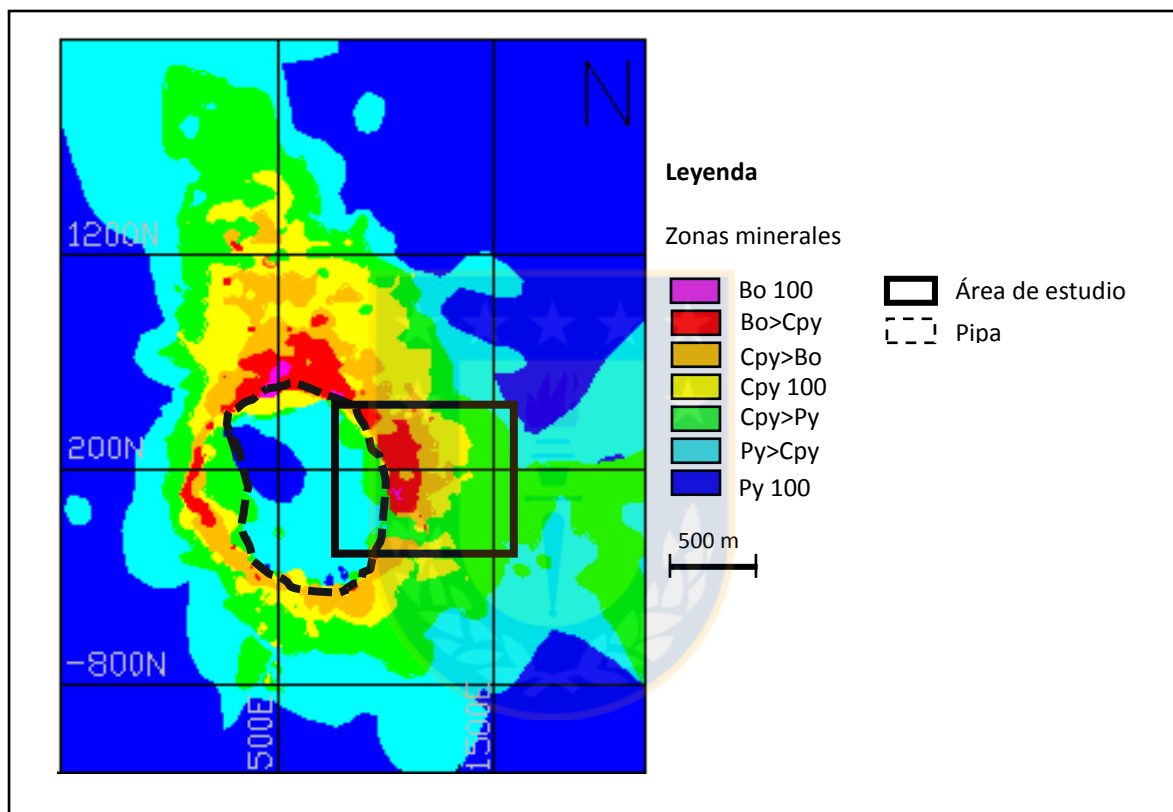


Figura 4.10: Modelo de zonación mineral de sulfuros de El Teniente cota 2210. La bornita se concentra en los bordes de la Pipa, pasando gradualmente a calcopirita y finalmente pirita. Por otro lado, la Pipa se caracteriza principalmente por pirita y, en menor medida de calcopirita, ambas en forma diseminada.

La intersección de los valores de frecuencia de vetillas con este modelo de zonación mineral (Figura 4.10), indica que la mayor concentración de vetillas blandas presentes al este del yacimiento se relaciona directamente con la presencia de calcopirita como mineral mayoritario (Figura 4.11).

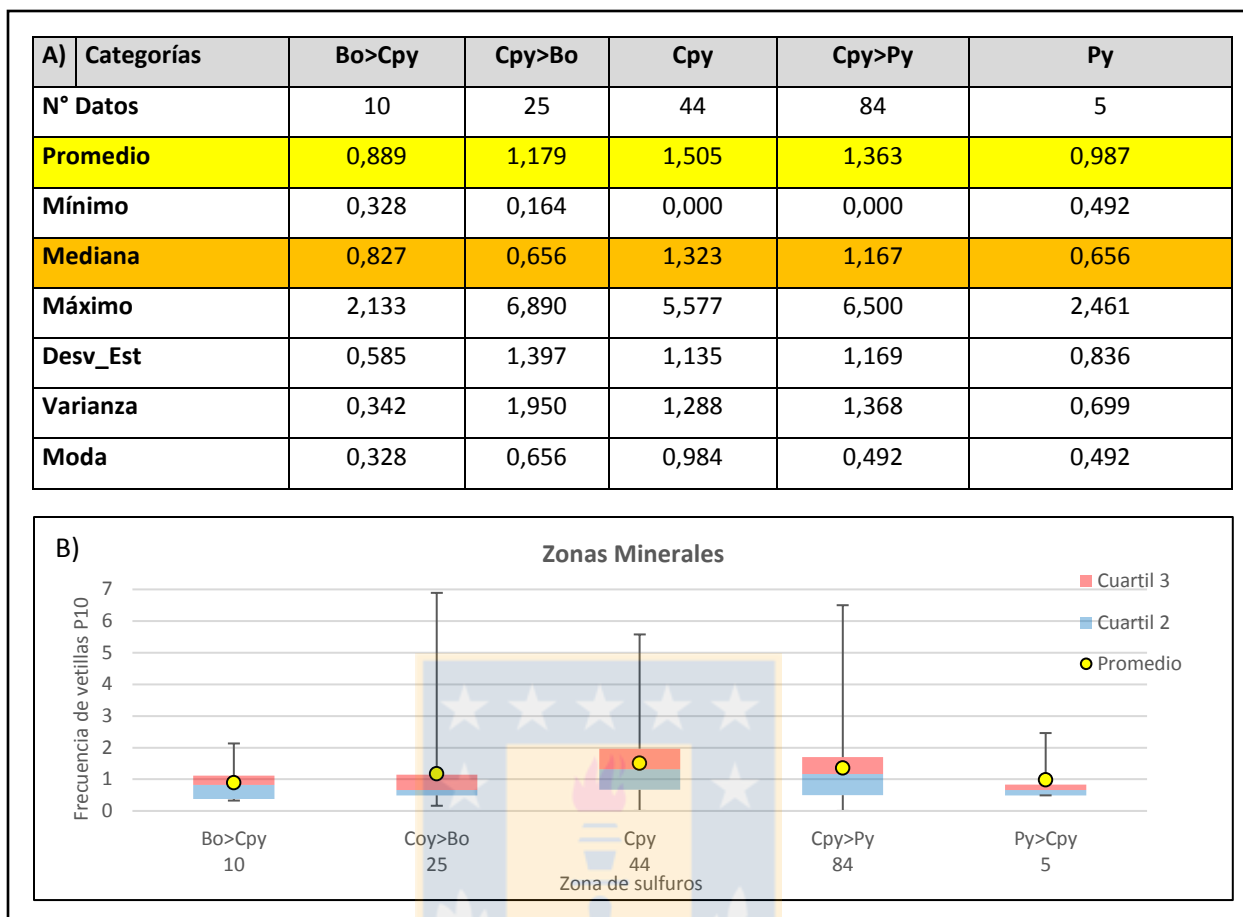


Figura 4.11: A) Estadística descriptiva y B) Diagrama de cajas de frecuencia de vetillas blandas por zona mineral.

Asociación mineral en stockwork

Se han definido siete clases de asociación mineral presente en las vetillas que conforman el stockwork (Tabla 4.3).

Tabla 4.3: Tabla de Asociación mineral y número de zona.

Asociación mineral	N° de Zona
Qz-Anh	1
Qz-Anh-Sulf (Moli-Cpy-Bo)	2
Qz-Anh-Ys y/o Cb	3
Cpy + (Qz-Anh-otros)	4
Cpy>Py + (Qz-Anh-otros)	5
Py>Cpy + (Qz-Anh-otros)	6
Py + (Qz-Anh-otros)	7

Al desplegar espacialmente los datos de las asociaciones minerales en el *software Vulcan*, se obtiene una zonación muy marcada de estas asociaciones que van cambiando progresivamente desde la zona 2 hasta la zona 6 (Figura 4.12), luego, al analizar la asociación mineral con la frecuencia de vetillas se determina que la mayoría de las muestras se encuentran entre la zona 2 y 5. La zona 2 se caracteriza por una alteración de tipo Hidrotermal Tardía con vetillas con cuarzo-anhidrita-(sulfuro), mientras que la zona 5 se caracteriza por una predominancia de alteración Hidrotermal Principal con una mineralogía de vetillas con calcopirita por sobre pirita y de forma subordinada cuarzo y anhidrita.

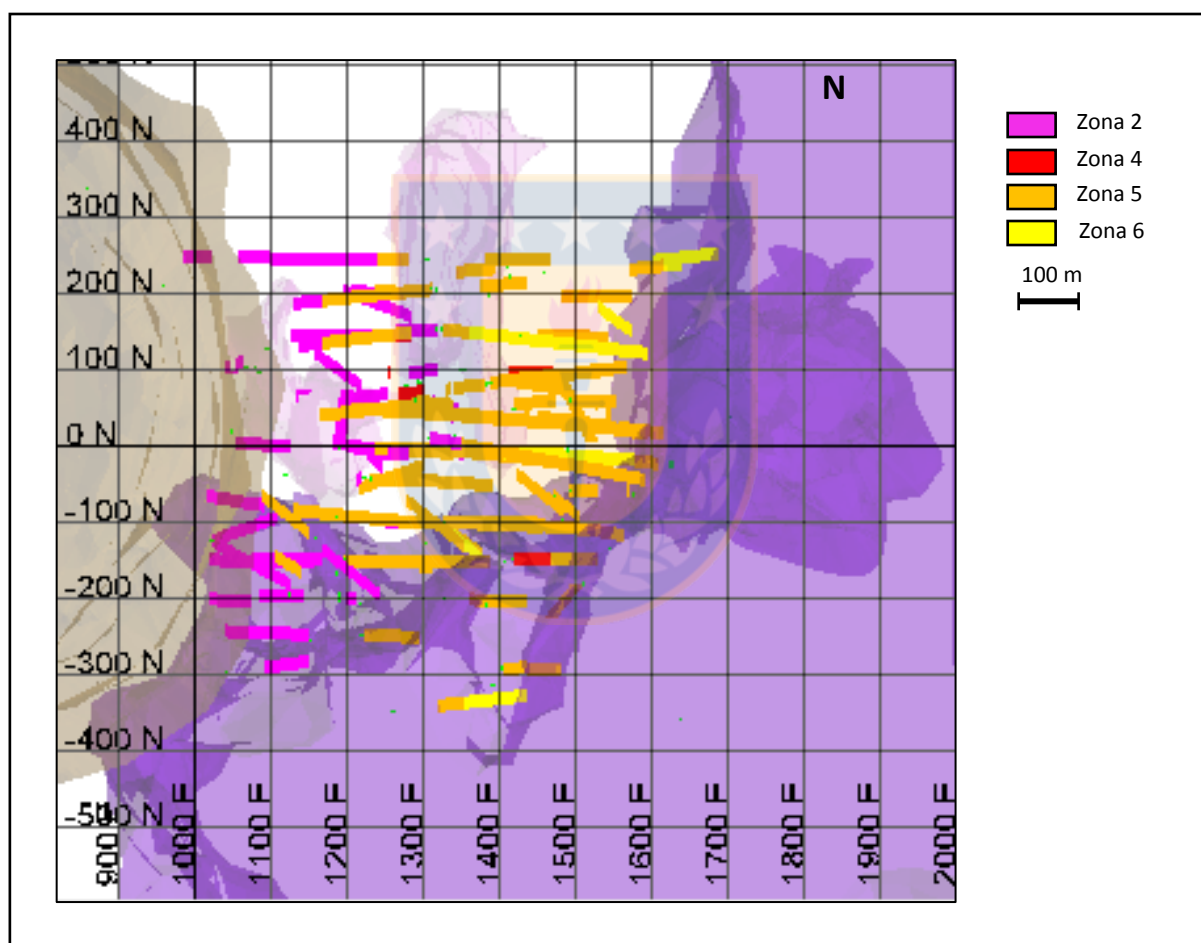


Figura 4.12: Vista en Planta del tipo de stockwork del CMET representado en colores.

A partir de la Figura 4.13 se concluye que la mayor concentración de vetillas blandas se encuentra en la zona 4 y 5, ambas con una predominancia de calcopirita concentrada en el CMET del este.

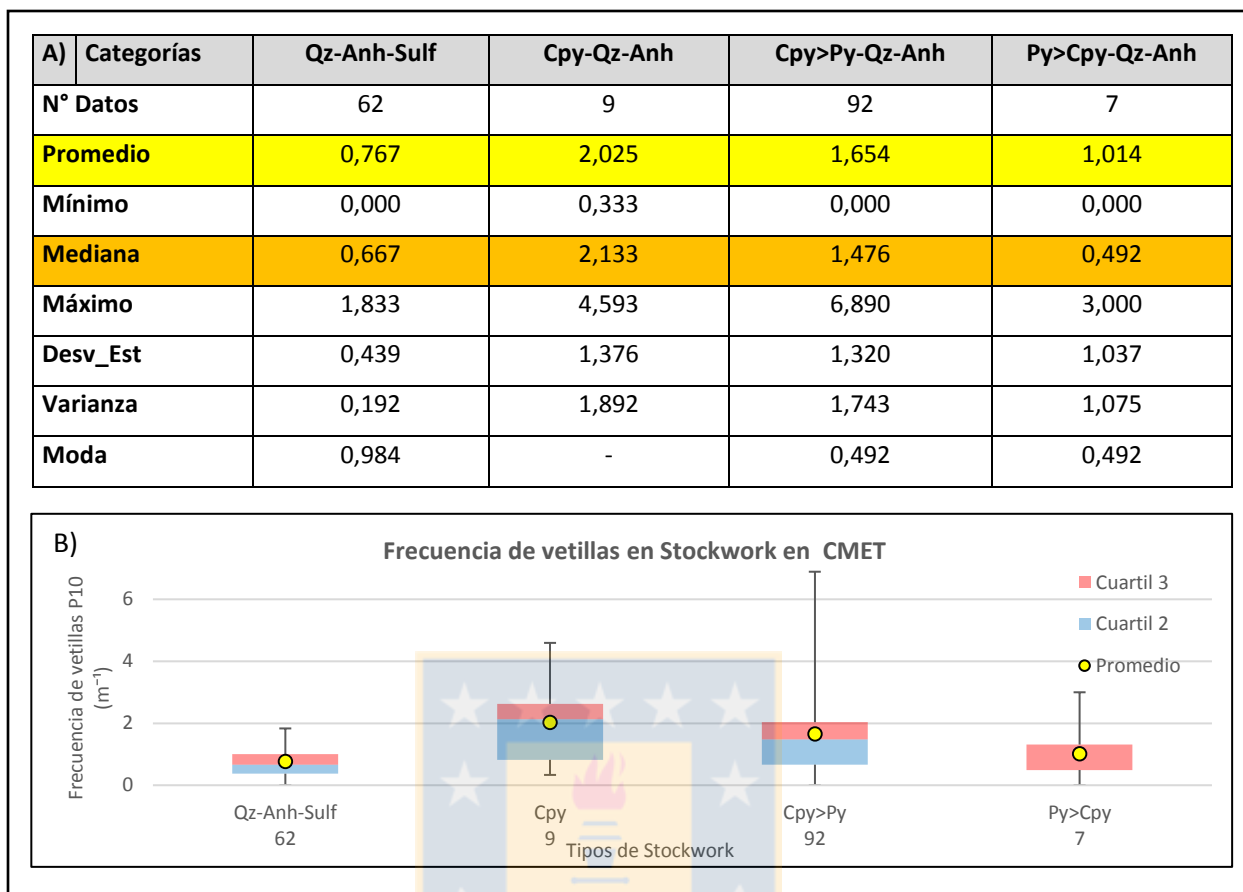


Figura 4.13: A) Estadística descriptiva y B) diagrama de cajas de frecuencia de vetillas (P_{10}) por asociación mineral o tipo de stockwork.

Límites del Complejo Máfico El Teniente (CMET)

Para determinar el límite entre los dos tipos de CMET se utilizaron los quiebres de los gráficos cuantil-cuantil de la unidad litológica CMET en el Bloque 1 y Bloque 2 (Figura 4.7), además de la visualización de los datos en 3D para analizar la distribución de las vetillas blandas en el espacio. También se intersectó la información obtenida del análisis de zona mineral y tipo de stockwork. Según esta información se reconocen dos tipos de CMET, un CMET ubicado en el este con un $P_{10} > 2$, mientras que, en el oeste, se reconoce un CMET con un $P_{10} < 2$ (Figura 4.14). Se generó un cuerpo en 3D del CMET con más de 2 vetillas por metro (Figura 4.15). Este cuerpo se realizó mediante una triangulación, para lograrlo, primero se construyeron perfiles cada 50 metros para luego, con esta información construir plantas cada 25 metros (Figura 4.15).

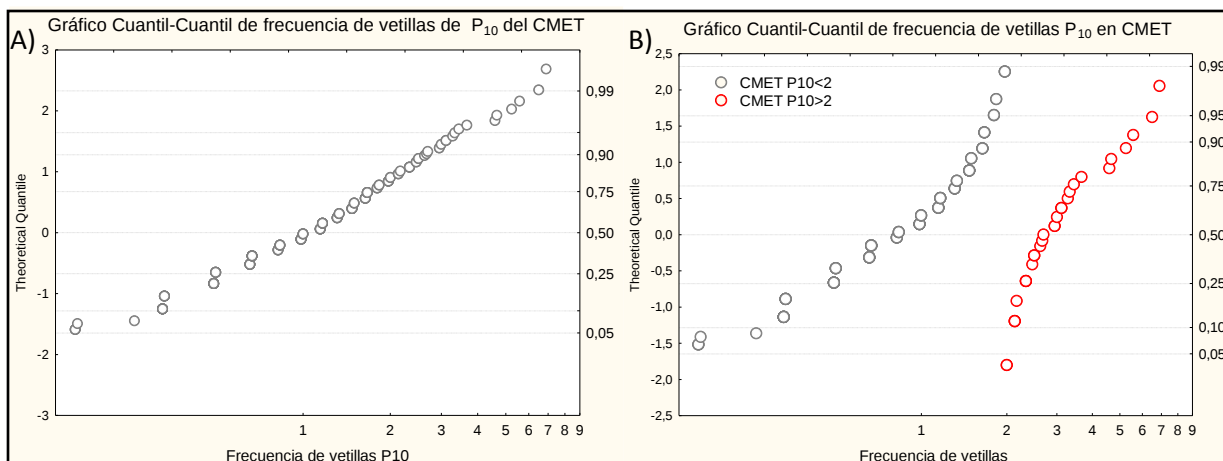


Figura 4.14: Gráfico cuantil-cuantil de frecuencia de vetillas para A) todo el CMET; B) CMET oeste ($P_{10} < 2$) en gris y CMET este ($P_{10} > 2$) en rojo.

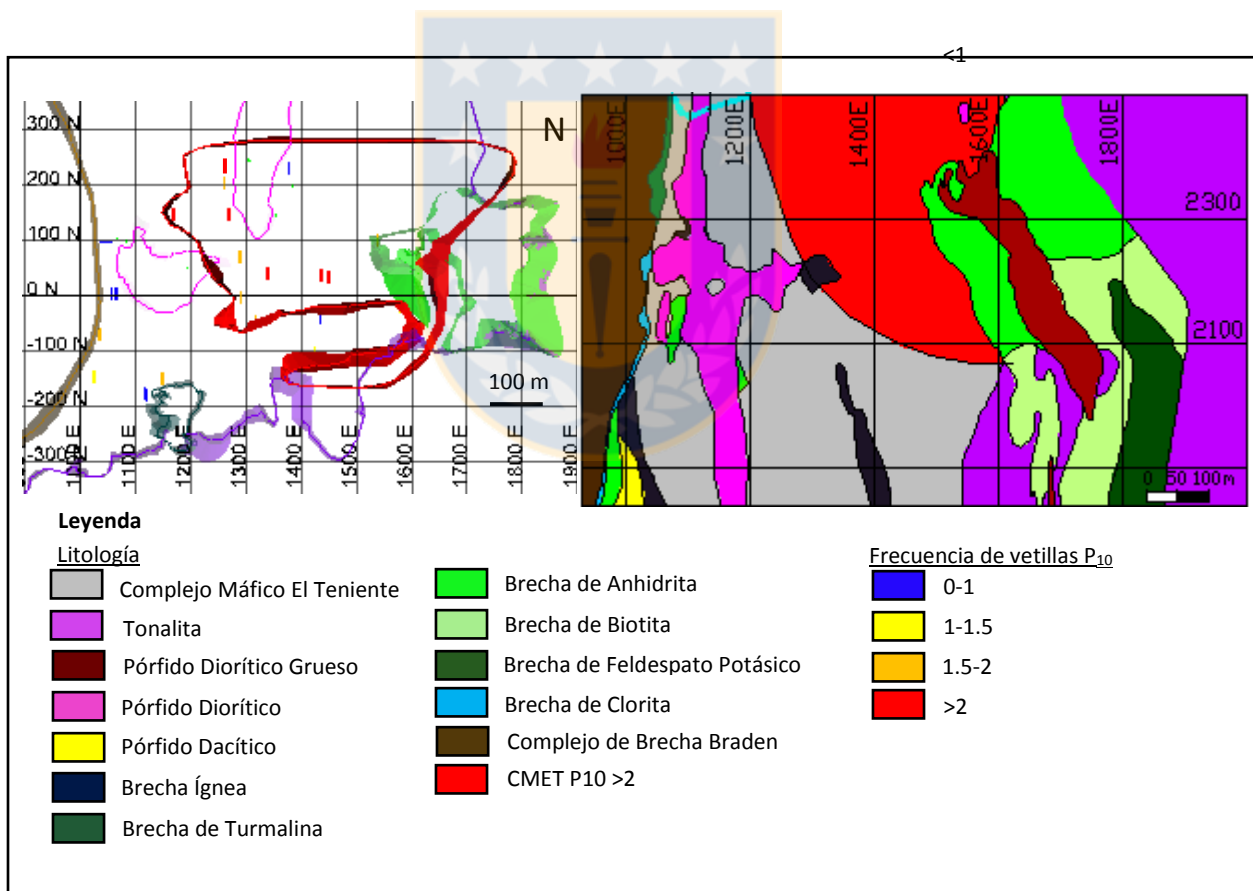


Figura 4.15: Cuerpo de CMET $P_{10} > 2$ en rojo en: A) Planta a la cota 2230 (Vulcan) con los P_{10} (rayas de colores) de las muestras de CMET representado en rangos de colores; B) Sección 50N.

4.3.3. DEFINICIÓN DE ZONAS GEOTÉCNICAS

En base a la litología y la frecuencia de vetillas se definen en este trabajo cinco zonas geotécnicas (Figura 4.16 y 4.18), las que son agrupadas de la siguiente forma:

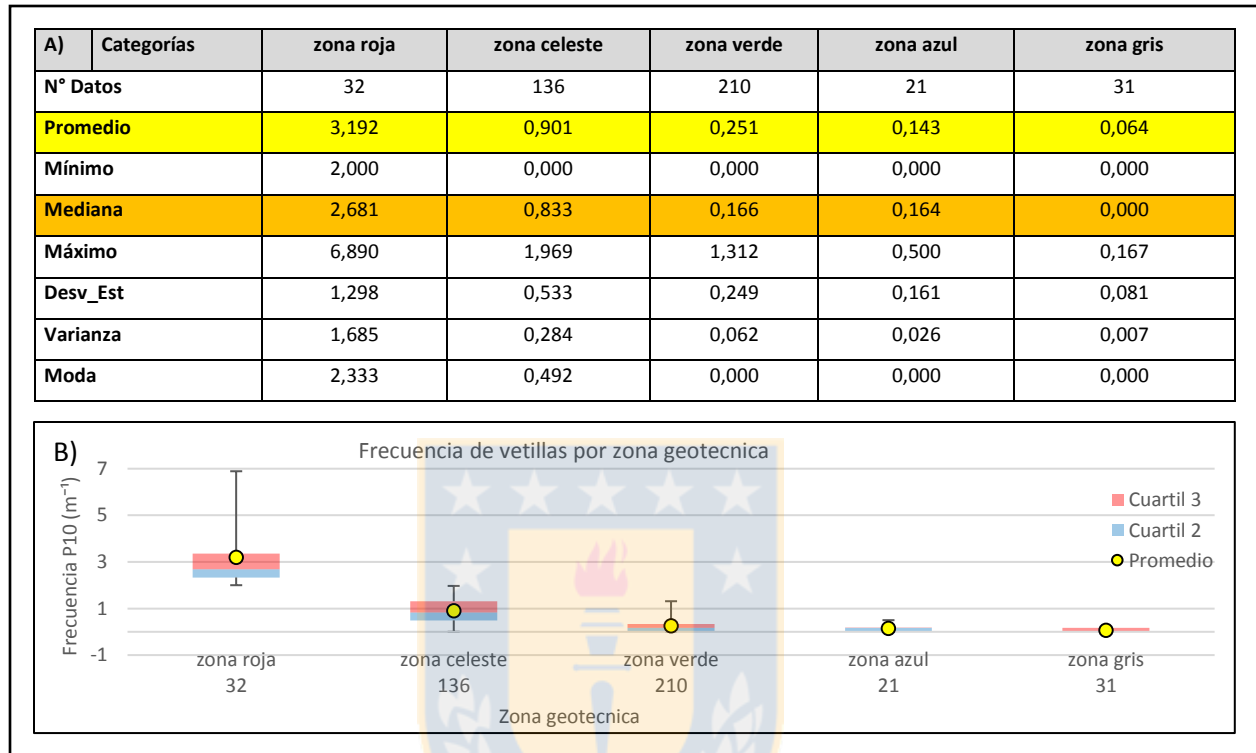


Figura 4.16: A) Estadística descriptiva y B) diagrama de cajas de frecuencia de vetillas blandas P_{10} de zonas geotécnicas.

Zona Gris: corresponde a las litologías con la frecuencia de vetillas más baja de la zona de estudio, es decir con la mejor calidad geotécnica como la Brecha Braden y Brecha Hidrotermal marginal (Brecha de Turmalina, Brecha de Clorita y Brecha de Sericita), ambas del Bloque 1. Las estadísticas de la Figura 4.2 muestran un P_{10} casi idéntica cercano a 0,06 (Figura 4.18).

Zona Azul: le sigue en frecuencia de vetillas blandas, y por lo tanto en calidad geotécnica, la Brecha de Anhidrita del Bloque 2 y las Brechas Hidrotermales interiores (Brecha de Biotita y Brecha de Feldespato Potásico) también en el Bloque 2. Estas brechas se encuentran entre las rocas intrusivas y se componen los clastos de éstas, principalmente tonalita. Ambas presentan un P_{10} muy similar, cercano al 0,1 (Figura 4.18).

Zona Verde: conjunto de rocas intrusivas, Grupo Tonalita, Grupo Diorita y Grupo Microdiorita, las cuales muestran una frecuencia de vetillas similar entre ellas (Figura 4.17) y que

no cambia de forma significativa en el espacio, como se puede ver en el análisis de zona minera (Figura 4.6). A estas litologías, por similitud en la frecuencia de vetillas blandas, se suma la Brecha de Anhidrita del Bloque 1. Todas estas litologías tienen un P_{10} de 0,2 (Figura 4.18).

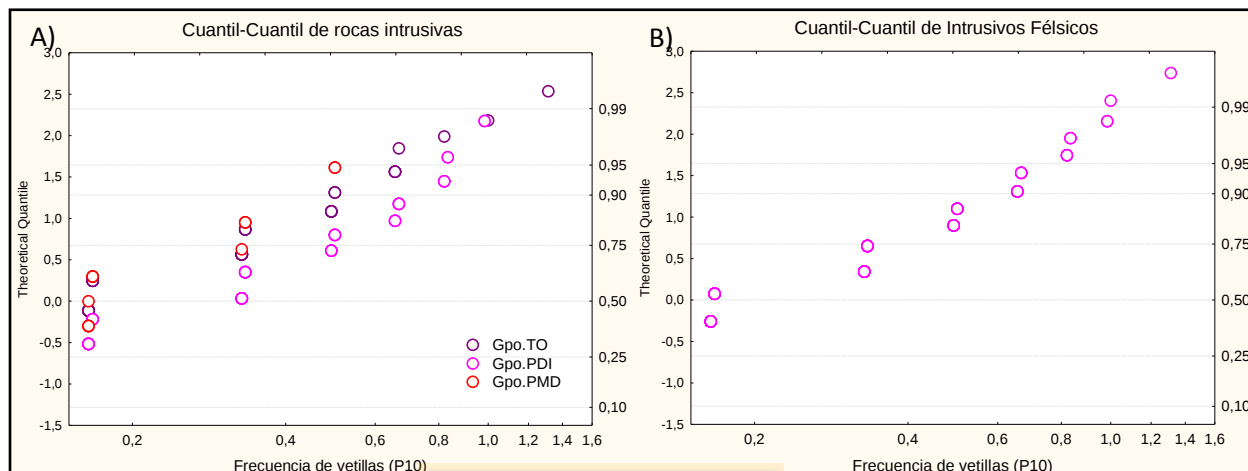


Figura 4.17: Gráfico cuantil-cuantil de P_{10}^* en rocas intrusivas. A) Grupo de Tonalita, Diorita y Microdiorita separadas; B) todas las rocas intrusivas juntas.

Zona Celeste: rocas del Complejo Máfico El Teniente (CMET) en el oeste con valores de $P_{10} < 2$ (Figura 4.18).

Zona Roja: agrupa el conjunto de rocas del Complejo Máfico El Teniente (CMET) en el este con $P_{10} > 2$. Esta zona agrupa las rocas de mayor frecuencia de vetillas blandas de la zona de estudio y, por lo tanto, con la peor calidad geotécnica (Figura 4.18).

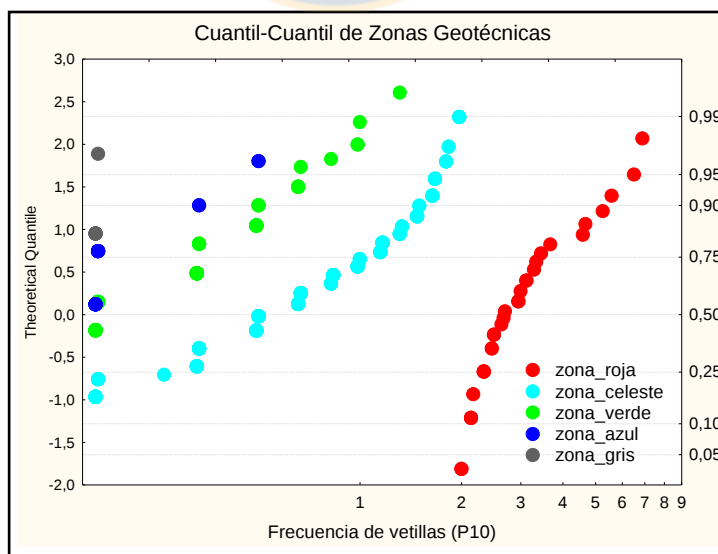


Figura 4.18: Gráfico cuantil-cuantil de frecuencia de vetillas por zona geotécnica en Esmeralda.

4.4. DEFINICIÓN DE UNIDADES DE ESTIMACIÓN Y MODELO DE BLOQUES

Se denomina unidad de estimación (UE) a aquella porción del espacio contenida dentro de la región en estudio y se caracteriza por la estacionariedad de la variable a estimar, es decir que la esperanza y la varianza son independientes de la posición espacial dentro de la unidad de estimación. La definición de las unidades de estimación está determinada por las unidades o zonas geotécnicas del área de estudio. Por lo tanto, las unidades de estimación sólo se pueden definir como un subconjunto de las zonas geotécnicas.

Las unidades de estimación se corresponderían casi en su totalidad con las zonas geotécnicas, sin embargo, la zona verde se divide, pese a la similitud en frecuencia de vetillas, ya que existe una diferencia litológica y geográfica. La Brecha de Anhidrita del Bloque 1 se compone sólo de clastos de CMET y se encuentra al oeste, a diferencia de las rocas intrusivas félsicas que se encuentra al este.

Finalmente, se definen 6 unidades de estimación (Figura 4.19, 4.20 y 4.21):

- Unidad 1: CMET de la zona geotécnica roja, es decir con una frecuencia de vetillas blandas mayor a 2, la que se encuentra principalmente al este.
- Unidad 2: CMET de la zona geotécnica celeste, es decir con una frecuencia de vetillas blandas menor a 2, la que se encuentra en el oeste.
- Unidad 3: concentra todas las unidades félsicas, Grupo Tonalita (tonalita, brecha ígnea de tonalita, pórfido diorítico blanco), Diorita (pórfido diorítico, brecha ígnea de pórfido diorítico y pórfido diorítico grueso) y Microdiorita (pórfido microdiorítico y brecha ígnea de pórfido microdiorítico)
- Unidad 4: Brecha de Anhidrita del Bloque 1
- Unidad 5: corresponde a las rocas de brechas de anhidrita del Bloque 2 y al Grupo de Brechas Hidrotermales interiores (brechas de biotita y brechas de feldespato potásico) también ubicadas en el Bloque 2.
- Unidad 6: Grupo de Brechas Hidrotermales marginales (brecha de turmalina, clorita y sericita) y rocas del Complejo Brecha Braden.

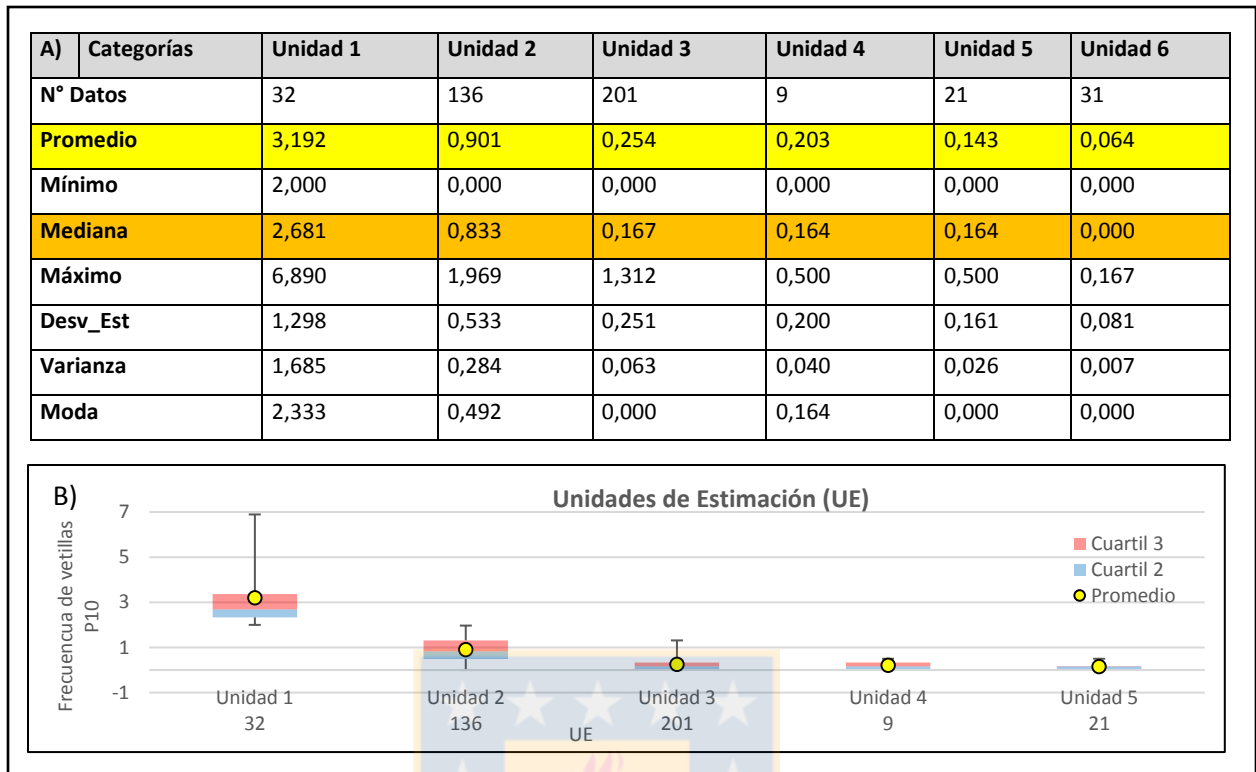


Figura 4.19: A) Estadística descriptiva y B) diagrama de cajas de la frecuencia de vetillas (P_{10}) por Unidad de Estimación.

En el gráfico cuantil-cuantil (Figura 4.20) se observan las distintas unidades de estimación. Las unidades 1 y 2 se distinguen claramente, mientras que la unidad 3 y 4 (zona geotécnica verde), muestran valores muy similares de P_{10} . La unidad 5 se distingue bien, no obstante, la unidad 6 sólo se aprecian dos puntos, esto se debe a la poca variabilidad del valor de P_{10} , ya que existen datos.

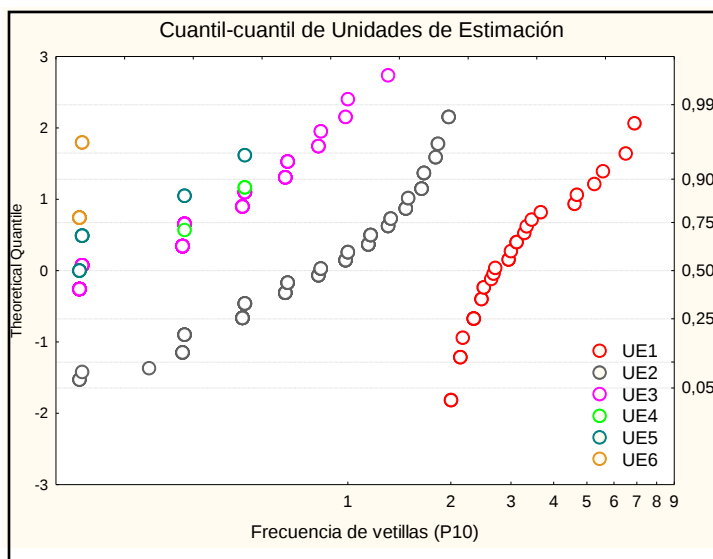


Figura 4.20: Gráfico cuantil-cuantil de P_{10} de Unidades de Estimación.

Con las unidades de estimación ya definidas, se pueden generar secciones de estas unidades (Figura 4.21).

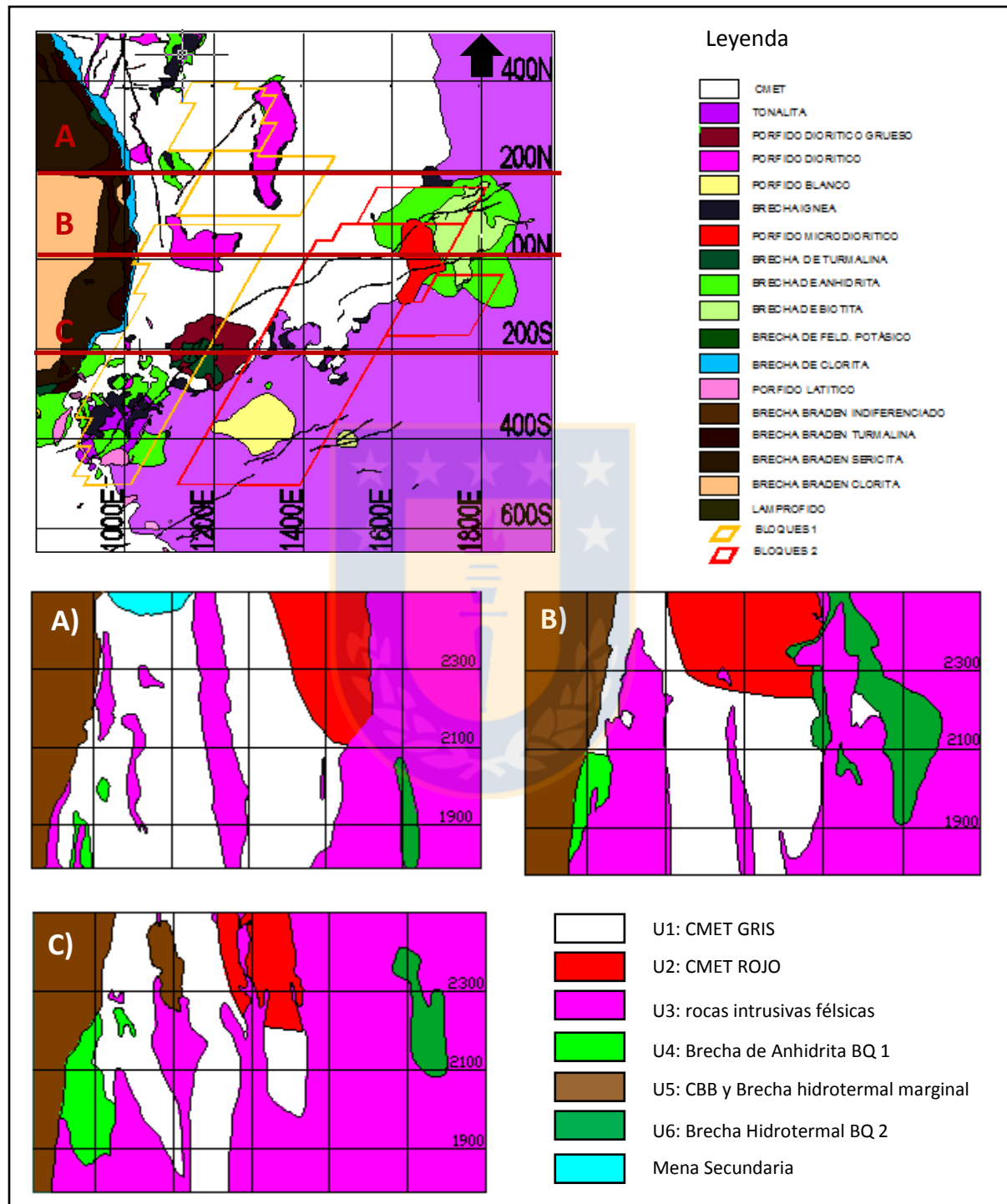


Figura 4.21: Mapa de planta 2030 indicando litología, bloques de producción y secciones (Modificado de De Los Santos y Ramírez 2016); A) Unidades de Estimación sección 250N; B) Unidades de Estimación sección 00N y C) Unidades de estimación sección 200S.

Luego, se configura un modelo de bloques en base a la frecuencia de vetillas mediante el *software Vulcan* que nos entregará las propiedades geotécnicas de la roca de las distintas unidades de estimación (Figura 4.22).

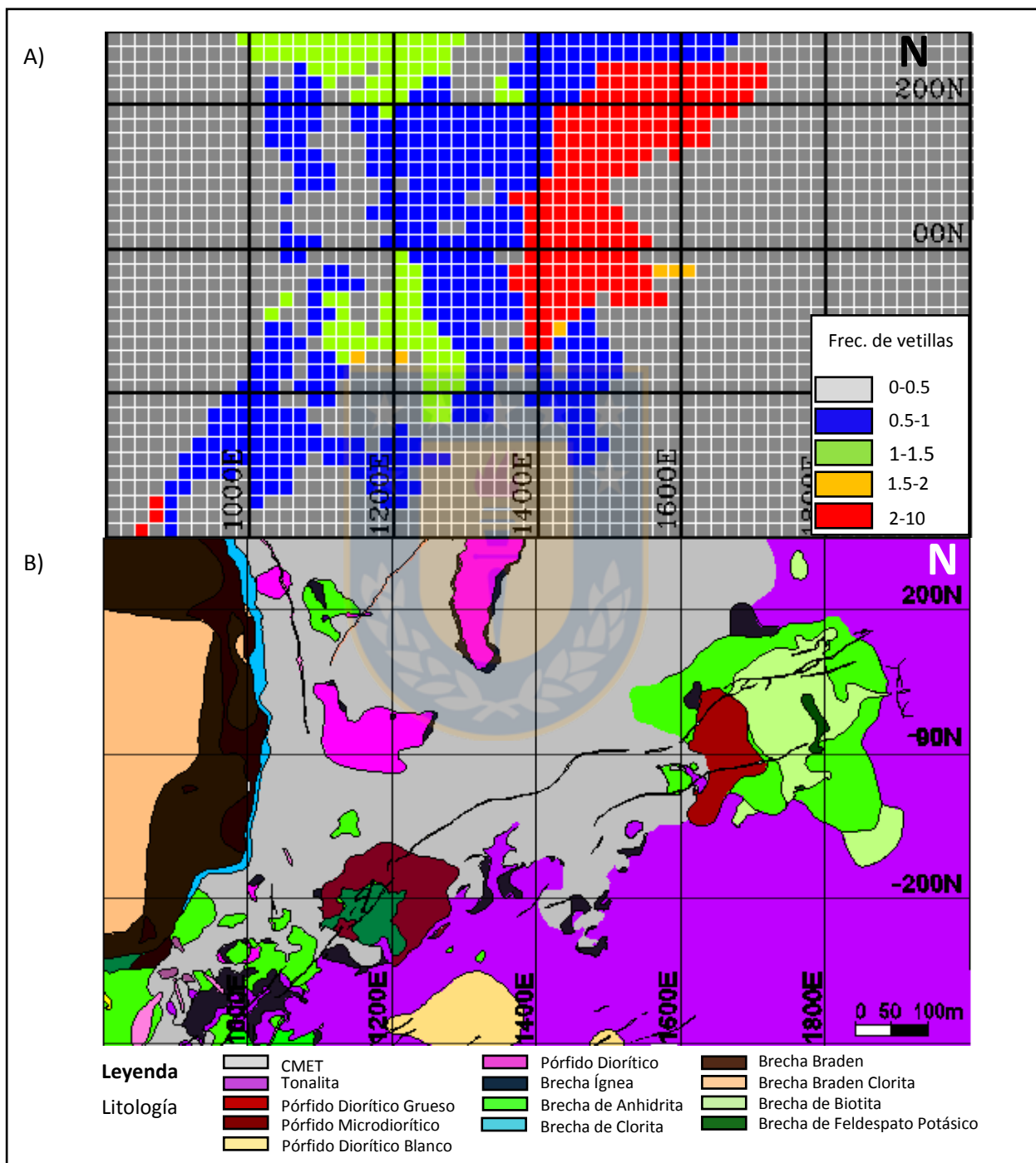


Figura 4.22: A) Modelo de Bloques cota 2192; B) Planta cota 2192 (Modificado de De Los Santos y Ramírez, 2018).

5. CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados y el modelo de bloques se puede concluir que el P_{10} , el número de vetillas blandas por metro de sondaje, depende del tipo de litología en que se encuentran y del tipo de relleno de éstas, es decir, de los minerales que las componen.

El Complejo Máfico El Teniente, caracterizado por un denso stockwork, es la unidad litológica que posee claramente el mayor número de vetillas blandas, así como la mayor dispersión. Le siguen las rocas intrusivas félsicas y las Brechas Hidrotermales de Anhidrita, Biotita y Feldespato Potásico. Al contrario, la Brecha Braden y las Brechas Hidrotermales marginales de Turmalina, Clorita y Sericita, son las unidades con menores cantidades de vetillas blandas.

Otro factor que tiene influencia en el número de vetillas blandas es el tipo de alteración. En las zonas donde predomina la alteración Hidrotermal Principal con abundante calcopirita en el relleno de las estructuras, el valor de vetillas blandas aumenta notablemente en comparación con las zonas donde predomina la alteración Tardimagmática y/o Hidrotermal Tardía, con vetillas donde prevalece el cuarzo y, de forma subordinada, la anhidrita.

Los bloques de producción se diferencian principalmente por el tipo de litología que poseen como se puede ver en la Tabla 4.3. En el Bloque 2 predominan las rocas intrusivas félsicas, principalmente las del Grupo Tonalita, mientras que el Bloque 1, las rocas félsicas corresponden al Grupo Diorita. Por otro lado, si bien ambos bloques tienen Brecha de Anhidrita, éstas son distintas, ya que la del Bloque 1 se compone de clastos de CMET, mientras que la del Bloque 2 es de clastos de rocas intrusivas félsicas. Sin embargo, la diferencia más importante es el tipo de *stockwork* que presenta el Complejo Máfico El Teniente. En el Bloque 2 predomina un CMET con alteración Hidrotermal Principal (HP) con gran cantidad de calcopirita en sus vetillas, mientras el Bloque 1 tiene CMET con alteración Tardimagmática (TM) y/o Hidrotermal Tardía (HT) con una gran cantidad de cuarzo en sus vetillas. Por lo tanto, el número de vetillas blandas en CMET en el Bloque 2 es mucho mayor que en Bloque 1 (Tabla 5.1).

Con toda esta información se configuró un modelo de zonación geotécnica que se correlaciona bien con la estabilidad y hundibilidad de la Mina Esmeralda. Esto se traduce en que el CMET es la unidad litológica que presenta el mayor grado de fragmentación debido al denso stockwork que lo caracteriza, al contrario de las unidades félsicas y brechas. Sin embargo, es el CMET del bloque 2

el que presenta menor estabilidad y mayor fragmentación debido al relleno blando de sus vetillas. Sin embargo, hay muy pocas muestras para alguna de las litologías como el Pórfido Diorítico Blanco, Pórfido Diorítico Grueso y Pórfido Microdiorítico, lo que podría llevar a resultados poco representativos, por lo tanto, se recomienda realizar un nuevo análisis incorporando una mayor cantidad de muestras de éstas unidades para disminuir el error.

Tabla 5.1: Tabla resumen de las diferencias entre los sectores productivos de Mina Esmeralda, Bloque 1 y Bloque 2.

	BLOQUE 1	BLOQUE 2
Litología	CMET PDI > TO BXANH (CMET) BXTU-BXCL-BXSER CBB	CMET TO > PDI BXANH (TO) PMD BXBI-BXKDF
Alteración dominante	HT>HP	HP
Zona mineral dominante	Bo>Cpy; Cpy>Bo	Cpy>Py
Tipo de stockwork dominante	2, 3 y 4	4, 5 y 6
Brecha de Anhidrita	$P_{10} = 0,203$ Brechización en CMET	$P_{10} = 0,116$ Brechización en intrusivo félsico
CMET	$P_{10} = 1,164$	$P_{10} = 1,654$
Zona geotécnica dominante	Gris-Celeste-Azul	Roja-Celeste-Verde

CMET: Complejo Máfico El Teniente; TO: Tonalita; PDI: Pórfido Diorítico; BXANH (CMET): Brecha de Anhidrita en CMET; BXANH (TO): Brecha de Anhidrita en Tonalita; PMD: Pórfido Microdiorítico; BXTU: Brecha de Turmalina; BXCL: Brecha de Clorita; BXSER: Brecha de Sericita; BXBI: Brecha de Biotita; BXKDF: Brecha de Feldespato Potásico; CBB: Complejo de Brecha Braden.

6. REFERENCIAS

- AGUIRRE, L. 1960. Geología de Los Andes de Chile Central, Provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas. N° 9: 70 pp. Santiago.
- ARREDONDO, C. 1994. Distribución, caracterización y génesis de los cuerpos de brecha en el sector central-este del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 99 pp. Santiago.
- BRZOVIC, A. 2001. Fundamentos Geológicos para un Sistema de clasificación geotécnica del macizo rocoso primario, Mina El Teniente; Hundibilidad Fase I. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). API-TO1m101-GL187/01:70 pp. Rancagua
- BRZOVIC, A. 2009. Rock mass strength and seismicity during caving propagation at the El Teniente Mine, Chile. 7th International Symposium Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSiM7). Vol. 2: 838-852. New York.
- BRZOVIC, A. y BENADO, D. 2003. Sistema de clasificación geotécnico de roca primaria, Mina El Teniente. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). SGL-I-05/2003: 50 pp. Rancagua.
- BRZOVIC, A y FIGUEROA, C. 2009. Caracterización de las Estructuras Geológicas que definen la Fragmentación durante el hundimiento de la Mena Primaria en Mina El Teniente, Chile. Seminario Internacional de Geología para la industria minera GEOMIN N°1. N° 24. Antofagasta.
- BRZOVIC, A y QUEZADA, O. 2000. Estandarización Líneas de Detalle. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). CL-121/00: 45 pp. Rancagua.
- BRZOVIC, A y VILLAESCUSA, E. 2007. Rock mass characterization and assessment of block-forming geological discontinuities during caving of primary copper ore al the El Teniente mine, Chile. *International Journal of Rock Mechanics y Mining Science*. Vol. 44: 565-583.
- BRZOVIC, A.; SEGUEL, J. y BENADO, D. 2009. Enrejado de vetillas y calidad geotécnica de roca de Mena Primaria en Mina El Teniente, Chile. Seminario Internacional de Geología para la industria minera GEOMIN N° 1. N° 25: 500-505. Antofagasta.

BURGOS, L. 2002. Caracterización de las Andesitas de la Mina El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 108 pp. Concepción.

CAMUS, E. 1975. Geology of the El Teniente ore body with emphasis on Wall-rock alteration. *Economic Geology*. Vol. **70**: 1.341-1.372.

CANNEL, J. 2004. El Teniente Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Central Chile. Ph.D. Thesis. University of Tasmania (Inédito): 317 pp. Launceston.

CAVIERES, P. 1999. Evolución de los métodos de explotación en la Mina El Teniente. Informe preparado para el Programa de Post-Título en Geomecánica y Geotecnia Aplicada a la Minería. Universidad de Chile, Departamento de Minas (Inédito): 102 pp. Santiago.

CHARRIER, R. 1973. Geología Regional de las Provincias de O'Higgins y Colchagua. Geología Regional y Geoquímica del drenaje de las Provincias de O'Higgins y Colchagua. Instituto de Investigación de Recursos Naturales IREN: 69 pp. Santiago.

CHARRIER, R. 1981. Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the Central Argentinean-Chilean Andes (32°-35°S) and chronology of their tectonic evolution. *Zentralblatt für Mineralogie. Geologie und Paläontologie*. Vol. **1**, (3-4): 344-355. Stuttgart.

CHARRIER, R. 1983. Informe geológico de la Hoja El Teniente, escala 1:250.000. Convenio Departamento de Geología, Universidad de Chile – SERNAGEOMIN: 155p. Santiago.

CHARRIER, R. y MUNIZAGA, F. 1979. Edades K-Ar de volcanitas cenozoicas del sector cordillerano del Río Cachapoal, Chile (34°15' L.S.). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **7**: 41-51. Santiago.

CHARRIER, R.; WYSS, A.; FLYNN, J.; SWISHER, C.; MARCK, N.; ZAPATTA, F.; MCKENNA, M. y NOVACEK, N. 1996. New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the Upper Tinguiririca Valley (35°S, Central Chile). *Journal of the South American Earth Sciences*. Vol. **9** (N° 5/6): 393-422.

CHARRIER, R.; BAEZA, O.; ELGUETA, S.; FLYNN, J.; GANS, P.; KAY, S.; MUÑOZ, N.; WYSS, A. 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° L.S.). *South American Earth Sciences*. Vol **15**: 117-139.

CHARRIER, R.; WYSS, A.; FLYNN, J.; SWISHER, I.C.; SPIECHIGER, S. y ZAPATTA, F. 1994. Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las formaciones Coya-Machalí y Abanico, entre los 33°50' y 35°S, Cordillera Principal Chilena. Congreso Geológico Chileno N° 7. Actas 2: 1.316-1.319. Concepción.

CUADRA, P. 1986. Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas adyacentes. *Revista Geológica de Chile*. N° **27**: 3-26. Santiago.

DAVIDSON, J. y VICENTE, J. 1973. Características paleogeográficas y estructurales del área fronteriza de las Nacientes del Teno (Chile) y Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35°15' latitud S). Congreso Geológico Argentino N° 5. Actas 5: 11-55. Buenos Aires.

DE LOS SANTOS, C.G. 2011. Efecto de la mineralogía, alteración y geometría en la resistencia mecánica de las vetillas, mina El Teniente, Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 174 pp. Concepción.

DE LOS SANTOS, C.G. 2017. Emisión de Plantas de zonación geotécnica. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). GRMD-SGL-NI-00149-2017: 10 pp. Rancagua.

DE LOS SANTOS, C.G. y BRZOVIC, A. 2013. Geotechnical propieties on cemented and healed stockwork veins at the El Teniente mine, Chile. Seminario Internacional de Geología para la industria minera GEOMIN N° 3. N° **20**: 5 pp. Santiago.

DE LOS SANTOS, C.G. y RAMÍREZ, M. 2016. Modelo litológico y estructuras intermedias interpretadas, Nivel Producción, Sector Esmeralda Sur, cota 2192. GL9-10815-1. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 33 pp. Rancagua.

DE LOS SANTOS, C.G. y RAMÍREZ, M. 2018. Plano Litológico Mina Esmeralda Sur Nivel Producción (cota 2192). Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). GL9-10815-3: 42 pp. Rancagua.

- ENRIONE, A. 1972. Estabilidad de los terrenos del área de Alto Colón. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 10 pp. Rancagua.
- FALCÓN, M y RIVER, O. 1998. Estudio geológico distrital de la División El Teniente de CODELCO-Chile, escala 1:25.000. Vicepresidencia de exploraciones y asociaciones mineras, CODELCO-Chile (Inédito): 108 pp. Santiago.
- FAUNES, A. 1981. Caracterización de la mineralogía y de alteración en un sector del stock tonalítico del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al de Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 175 pp. Santiago.
- FIGUEROA, C. 2003. Caracterización Geológica y Geotécnica de colpas en puntos de extracción, Mina Teniente Sub-6. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 135 pp. Concepción.
- FUENZALIDA, H. 1967. Clima. Geografía Económica de Chile. Corporación de Fomento de la Producción. Editorial Universitaria: 99-151. Santiago.
- GARRIDO, I. 1995. Geología estructural del distrito y la mina El Teniente y situación geodinámica regional. Proyecto Geodinámica Mina El Teniente, Proyecto API-1-1.689. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). Vol.1: 61 pp. Rancagua.
- GARRIDO, I.; RIVEROS, M.; CLADOUHOS, T.; ESPÍÑEIRA, D. y ALLMENDINGER, R. 1994. Modelo geológico-estructural, yacimiento El Teniente. Congreso Geológico Chileno N° 8. Actas 2: 1.553-1.558. Concepción.
- GAVIA, B. 2005. Resistencia en vetillas selladas del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 86 pp. Santiago.
- GODOY, E. y LARA, L. 1994. Segmentación estructural andina a los 33°-34°S. Nuevos Datos en la Cordillera Principal. Congreso Geológico Chileno N° 7. Actas 2: 1.344-1.346. Concepción.
- GÓMEZ, R. 2001. Geología de las unidades volcanogénicas cenozoicas del área industrial de la mina El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región. El Teniente. Memoria para optar el Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 143 pp. Santiago.

HAMRIN, H. 2001. Underground mining methods and applications. Underground Mining Methods; Engineering fundamental and international case studies. (W.A. Hustrulid y R.L Bullock editor). Society for mining, metallurgy, and exploration SME: 3-14 pp. Colorado.

HEVIA, B. 1984. Estudio Geotécnico de probetas de testigos de sondajes sometidas a ensayos de mecánica de rocas. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 25 pp. Rancagua.

HITSCHFELD, M. 2006. Petrografía y geoquímica de los intrusivos leucocráticos del sector Sur-Este del yacimiento El Teniente, VI Región, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 154 pp. Concepción.

HOWELL, F. y MOLLOY, J. 1960. Geology of the Braden Orebody, Chile. *Economic Geology*. Vol. 55: 863-905.

KARZULOVIC, A. 1997. Modelo geomecánico del Macizo rocoso primario. Mina El Teniente. Conceptos Fundamentales. Superintendencia de Planificación, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 20 pp. Rancagua.

KARZULOVIC, A. 2001 Propiedades geomecánicas de estructuras en roca primaria. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). DT-CG-01-003: 30 pp. Rancagua.

KAY, S. y KURTZ, A. 1995. Magmatic and Tectonic Characterization of the El Teniente Region. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 180 pp. Rancagua.

KAY, S.M.; MPODOZIS, C. y COIRA, B. 1999. Neogene magmatism, tectonism and mineral deposits of the Central Andes (22°-33°S Latitude). *Geology and Ore Deposits of the Central Andes* (Skinner, B. J. editor). Society of Economic Geologist. N° 7: 27-59 pp. Colorado.

KAY, S., MPODOZIS, C.; RAMOS, V. y MUNIZAGA, F. 1991. Magma source variations for mid-late Tertiary magmatic rock associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the Central Andes (28-33°S). *Andean magmatism and its tectonic setting* (Harmon, R. Rapela, C. editor.) Geological Society of America. N° 265: 113-137 pp. Colorado.

- KLÖHN, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central: provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas. N° 8: 95 pp. Santiago.
- KURTZ, A.; KAY, S.; CHARRIER, R. y FARRAR, E. 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, Central Chile (34°-35°). *Revista Geológica de Chile*. Vol. 16: 145-162. Santiago.
- MAKSAEV, V. y ZENTILLI, M. 2002. Chilean strata-bound Cu-(Ag) deposits: An Overview. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold y Related Deposits: A Global perspective* (Porter, T.M. editor. PGC Publishing. Vol 2: 185-205. Adelaide.
- MAKSAEV, V.; MUNIZAGA, F; MCWILLIAMS, M.; FANNING, M; MATHUR, R; RUIZ, J. y ZENTILLI, M. 2004. New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from UPb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os, and Fission-Track Dating: Implications for the Evolution of a Supergiant Porphyry Cu-Mo Deposit. *Society of Economic Geologist*, Special Publication. N° 11:15-54.
- MARAMBIO, F.; PEREIRA, J. y RUSSO, A. 2000. Caracterización de las propiedades geotécnicas de las "Andesitas de la Mina", Yacimiento El Teniente, Chile Central. Congreso Geológico Chileno N° 9. Actas 1: 279-282. Puerto Varas.
- MARAMBIO, F.; PEREIRA, J. y RUSSO, A. 1999. Estudio de propiedades geotécnicas proyecto Pipa Norte. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). GL-280/99: 96 pp. Rancagua.
- MUNIZAGA, F.; MAKSAEV, V.; MATHUR, R.; RUIZ, J; MCWILLIAM, M. y THIELE, K. 2002. Understanding molybdenite Re-Os ages from the El Teniente porphyry copper deposit, Chile. *The Geological Society of America*. N° 152-5: 1-2.
- MOREL, R. y SPRÖHNLE, C. 1992. Mapa de la geología distrital, Hoja Sewell. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). GL88-7548: 5 pp. Rancagua.
- OJEDA, J.; HERNÁNDEZ, E.; OSSANDÓN, G.; ENRIONE, A. y MESTRE, A. 1980. El pórfido cuprífero El Teniente. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 76 pp. Rancagua.

OSSANDÓN, G. 1974. Petrología y alteración del Pórfido Dacítico, Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 112 pp. Santiago.

PADILLA, R. 2004. Aplicación de conceptos geológicos en la estimación de la resistencia a la tracción en vetillas selladas del stockwork del Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 150 pp. Concepción.

PEREIRA, J. 1995. Caracterización de la fase inicial del proceso de fragmentación de la zona de mineral primario inducida por la minería masiva. Sector Teniente 4 Sur- Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 105 pp. Santiago.

PLIGER, R. 1981. Plate reconstruction, a seismic ridges and low angle subduction beneath the Andes. *Geological Society of American Bulletin*. Vol. **92**: 448-456.

RIVERA, O. y CEMBRANO, J. 2000. Modelo de formación de cuencas volcano-tectónicas en zonas de transferencia oblicuas a la cadena andina: El caso de las cuencas Oligo-Miocenas de Chile Central y su relación con estructuras NNW-NW (33°00'-34°30'S). Congreso Geológico Chileno N° 9. Actas **1**: 631-636. Puerto Varas. Chile.

RIVERA, O. y FALCÓN, M.F. 1998. Estudio geológico de la División El Teniente de Codelco-Chile, escala 1:25.000. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 268 pp. Rancagua.

RIVERA, O. y FALCÓN, F. 2000. Secuencias de relleno de cuencas volcano-tectónicas transversales Oligo-Miocenas en los alrededores del Yacimiento El Teniente (33°45'-34°30'S). Congreso Geológico Chileno N°9. Actas **1**: 819-823. Puerto Varas.

ROGRIGO, J. 1999. Influencia de las estructuras en la ruptura de las probetas sometidas a compresión uniaxial. Andesita, Teniente 4, Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 100 pp. Santiago.

- ROJAS, E.; MOLINA, R. y CAVIERES, P. 2001. Preundercut caving El Teniente mine, Chile. *Underground Mining Methods; engineering fundamental and international case studies* (Hustrulid, W. R. y Bullok, R. (Eds.). Society for mining, metallurgy, and exploration SME: 20-45. Colorado.
- SCHACHTER, P.V.; DONOSO, J.; RÍOS, V.P. y ROJAS, I.P. 2017. Modelamiento Geotécnico Yacimiento El Teniente. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito). NIG-023-2017: 34 pp. Rancagua.
- SKEVES, A. 1997. Informe petrológico preliminar del sector oriental del perfil 124 en El Teniente. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 49 pp. Rancagua.
- SKEWES, M. 2000. Rocas ígneas del depósito de cobre El Teniente, Chile. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 94 pp. Rancagua.
- SKEWES, M. y STERN, Ch. 1994. Tectonic trigger for the formation of the Late Miocene Cu-rich breccia pipes in the Andes of Central Chile. *Geology*. Vol. 22: 551-554.
- SKEWES, M. y STERN, Ch. 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: 893-909.
- SKEWES, M.A.; ARÉVALO, A.; FLOODY, R.; ZUÑIGA, P. y STERN, CH. 2002. The giant El Teniente breccia deposit: Hypogene Copper distribution and emplacement. *Society of Economic Geologist, Special Publication*. N° 9: 299-332.
- STERN, Ch. y SKEWES, M. 1997. Subduction of the Juan Fernández Ridge below Central Chile: effects on subduction geometry, rates of subduction erosion, arc migration and magma chemistry, and genesis of copper deposits. Congreso Geológico Chileno N° 8. Actas 3: 1.724-1.728. Antofagasta.
- THIELE, R. 1980. Carta Geológica de Chile N° 39. Hoja Santiago, escala 1:125.000. Instituto de Investigaciones Geológicas Chile: 51 pp. Santiago.
- VILLALOBOS, J. 1975. Alteración hidrotermal de las andesitas del yacimiento El Teniente, Chile. Tesis de Grado de Doctor. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 125 pp. Santiago.

WILLONER, A. 2000. Characterization of rock mass quality and prediction of mass behaviour: and investigation into the parameters which influence the strength of healed joints in hypogene mineralized andesite at El Teniente Copper mine, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. The University of Leeds, School of Earth Sciences (Inédito): 82 pp. Leeds.

ZUÑIGA, P. 1979. Estudio de colpas y sondajes IG-11, Block 11-101 Ten-4 Central. Superintendencia de Geología, CODELCO-Chile, División El Teniente (Inédito): 20 pp. Rancagua.

ZUÑIGA, P. 1982. Alteración y mineralización hipógenas en el sector oeste del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología: 104 pp. Santiago.

