



## GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO MINA VERDE, COQUIMBO, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE

**Autor: Daniel Alejandro Farfán Muñoz**

**Profesor Guía: MSc. Abraham Elías González Martínez**

**Profesores Comisión: MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez**

**Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn**

### 1. Resumen

Mina Verde es un yacimiento tipo skarn de cobre, que se aloja en la aureola de metamorfismo de contacto entre la facies (c) de la Formación Arqueros e intrusivos hipabisales. El bloque geológico corresponde a un monoclinal de rumbo NNW-SSE, inclinado 35 a 50 grados al este. La mena corresponde a calcopirita y, en menor medida, bornita, estando asociada principalmente a un horizonte sedimentario metamórfico de grano fino y color oscuro, históricamente denominado “lutitas”, y también a brechas hidrotermales tardías.

**Palabras clave:** Mina Verde, Skarn.

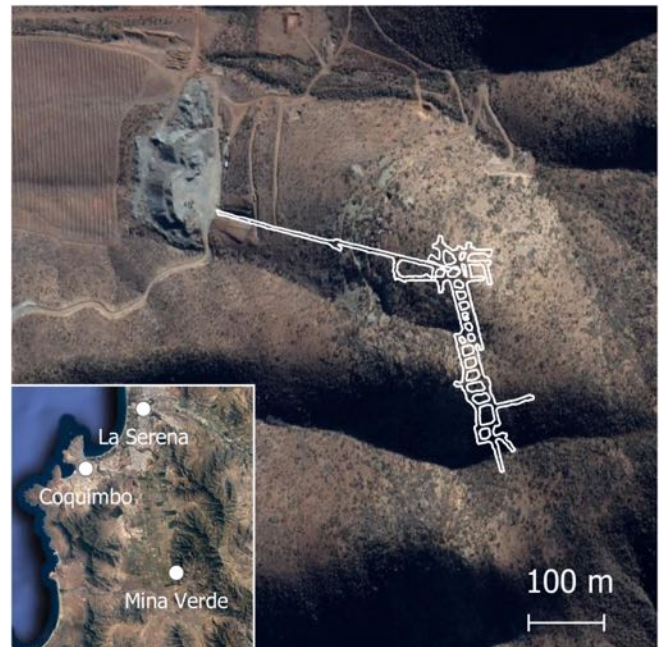
### 2. Introducción

Mina Verde se ubica en la Región de Coquimbo, Chile, a 22 kilómetros al sur de la ciudad de La Serena, en la Cordillera de la Costa, a una cota de 300 m.s.n.m. Se accede a ella por la Ruta 43 de sur a norte, tomando la salida de la plaza de pesaje El Peñón, y continuando a través de un camino de tierra por 6 km. Las coordenadas de referencia son 19J 286900 E 6668150 N, coordenadas UTM, datum WGS 84 (Figura 1).

Mina Verde forma parte del Distrito Minero Tambillos, de la Franja Metalogénica del Cretácico Inferior.

Mina Verde ha sido explotada de forma artesanal desde el año 1920, siendo posteriormente semimecanizada mediante un chiflón (Bassi, 1985). En la actualidad, se explota mediante el método Sub Level Stopping con una ley de corte de 0.6% CuT.

El proyecto se encuentra aprobado por SERNAGEOMIN para la explotación de 30.000 toneladas mensuales, sin embargo, la producción real durante 2021 y 2022 ha sido de alrededor de 10.000 toneladas mensuales, con leyes de 0.8 a 0.9% CuT.



**Figura 1:** Ubicación de Mina Verde y nivel 291 como referencia.

#### 2.1. Objetivo principal

El objetivo principal es generar un modelo litológico, estructural, y de mineralización, que permita determinar las unidades litológicas y/o estructurales que albergan la mena económica de cobre, para así dar continuidad a la actual explotación.

## 2.2. Objetivos específicos

1. Generar nuevas definiciones de unidades litológicas y alteraciones del yacimiento, en base a la campaña de sondajes diamantinos 2021 y 2022.
2. Registrar las estructuras y unidades mineralizadas principales.
3. Generar un modelo geológico y estructural en base a la nueva información.
4. Identificar si el control de la mineralización es litológico y/o estructural.

## 3. Planteamiento del problema

Los caserones producto de la explotación histórica de Mina Verde tienen una orientación concordante a la secuencia estratificada local (45/080). La mineralización se aloja en una unidad sedimentaria metamórfica históricamente denominada "lutitas", la que habría sido altamente susceptible a la mineralización cuprífera. Los detritos de perforación de color oscuro se usaban como guía de la mineralización.

Las reservas para explotar durante 2022 corresponden a los niveles inferiores (233 y 213) de esta unidad mineralizada (en adelante Unidad Principal), la cual ve reducida su tamaño debido a que la Falla Fastidiosa, que posee una inclinación hacia el suroeste, va limitando y reduciendo la extensión del cuerpo hacia el norte, a medida que se profundizan los niveles de explotación. Hacia el sur, la Unidad Principal se acuña y reduce su potencia, limitando su explotación económica. Las reservas por explotar en el nivel 213 son del orden de 30.000 t. Por ende, el agotamiento de la Unidad Principal limita la continuidad operacional hasta mediados de 2022.

Por otro lado, el modelo de mineralización de Mina Verde utilizado al año 2020 está basado en el modelo utilizado en Mina Florida, debido a que ambos yacimientos se emplazan en el contacto entre las mismas unidades litológicas. Sin embargo, poseen diferencias en tamaño, en el tipo y estilo de mineralización, y en la litología huésped, lo que conlleva a la necesidad de generar un modelo acorde a esta realidad.

En la base de datos histórica se diferencian 46 unidades litológicas diferentes, producto de los distintos equipos

de geólogos que han trabajado en la mina a lo largo de los años. Esto dificulta la interpretación geológica, por lo que se hace necesario la simplificación de estas unidades litológicas.

Tampoco existe una testigoteca que permita revisar los sondajes históricos, y la mayoría de las cajas portatestigos han perdido su información o están destruidas. Los soportes físicos o digitales de la información histórica sobre sondajes son prácticamente inexistentes.

## 4. Metodología

El presente informe se genera a partir del trabajo de geología de producción y las campañas de sondajes diamantinos de interior mina perforadas durante los años 2021 y 2022, junto a las siguientes etapas:

- **Recopilación de información histórica:** La información preexistente es escasa y corresponde a informes internos orientados principalmente a la estimación de recursos, con poco énfasis en la geología.
- **Definición de nuevas unidades litológicas:** Dado que no hay acceso a los testigos diamantinos históricos, los sondajes perforados durante 2021 y 2022 se utilizan como la base de la definición de las nuevas unidades litológicas.
- **Registro de estructuras:** Las estructuras relevantes de la mina fueron registradas topográficamente mediante estación total, para así poder interpretarlas en el software de modelamiento.
- **Construcción de la correlación entre litología y ley:** Esto permite determinar las Unidades Geológicas que albergan las mejores leyes de mineral.
- **Generación de modelo geológico:** La información recopilada es cargada e interpretada en el software de modelamiento.
- **Interpretación de resultados:** se define un nuevo modelo de mineralización para Mina Verde.

Como convención, se utiliza notación dip/dip direction para los datos estructurales. Todos los ángulos representan grados sexagesimales. Se omite el símbolo de grado (°).

## 5. Marco geológico regional

La siguiente información está condensada desde Geología Del Área Andacollo-Puerto Aldea (Emparán y Pineda, 2006).

### 5.1. Formación Arqueros (Ka; Cretácico inferior)

(Aguirre y Egert, 1962; emend. Emparán y Pineda, 1999) Secuencia constituida principalmente por rocas de depositación submarina: lavas andesítico-basálticas, basaltos, andesitas, con intercalaciones sedimentarias marinas de calizas, areniscas, lutitas y depósitos piroclásticos subaéreos, de estratificación gruesa (2 a 40 metros cada estrato) y en parte de aspecto macizo. No se observa base expuesta (la cual está limitada por la Falla Romeral) y subyace a la Formación Quebrada Marquesa mediante las fallas El Álamo y El Cobre. Se estima un espesor de 5.400 metros (Emparán y Pineda, 2006).

En la carta Andacollo-Puerto Aldea se describen 6 facies. El área de estudio involucra la facies (c), la que está constituida por rocas sedimentarias marinas, en parte fosilíferas. Comprende principalmente calizas y areniscas subordinadas, con intercalaciones de lutitas y tobos. Aflora en una angosta franja menor a 400 metros de ancho, de orientación 50/070. Para la fauna se han determinado edades paleontológicas hauteriviana-barremiana superior (Pérez y Rubilar, 2002), y valanginiana-hauteriviana inferior (Pérez y Reyes, 1998a).

La Formación Arqueros está intruida por intrusivos graníticos a dioríticos (Unidad Plutónica Kigd, 122-110 Ma) y por intrusivos hipabisales andesíticos basálticos-dioríticos (Unidad Hipabisal Kh, 96-94 Ma).

Emparán y Pineda (2006) describen extensos sectores de rocas córneas, con intensa silicificación y aspecto bandeado, que forman la aureola de contacto con la unidad Kigd al sur de la carta Andacollo-Puerto Aldea, y con la unidad Kh en el sector de Tambillos.

Se propone una edad Hauteriviano Medio mediante dataciones radiométricas (Emparán y Pineda, 2006), y Berriasiano-Barremiano Superior en base a edades paleontológicas (Pérez y Reyes, 1998a; Pérez y Rubilar, 2002).

### 5.2. Intrusivos Graníticos a Dioríticos Kigd (122-110 Ma; Cretácico Inferior alto)

(Emparán y Pineda, 2000) Corresponde a rocas plutónicas de composición dioritoide a granitoide. Preferentemente son de textura de grano grueso a medio, con tendencia porfírica, en los dioritoides y de grano fino en los granitoides. Forma plutones de entre 6 a 120 km<sup>2</sup>. Esta unidad intruye a la Formación Arqueros. No aflora en el área de estudio.

### 5.3. Intrusivos Hipabisales Andesíticos Basálticos-Dioríticos Kh (96- 94 Ma; Cretácico Superior temprano)

(Emparán y Pineda, 2006) Corresponden a rocas hipabisales de composición andesítica y andesítica-basáltica a diorítica porfírica y microdiorítica. Sus características texturales permiten separarla en dos facies muy distintivas en el terreno: una facies (a) de textura porfírica gruesa (“ocoítica”), y una facies (b) porfírica media a afanítica.

La roca intrusiva de interés en el área de estudio corresponde a la facies (b), la cual se caracteriza por poseer fenocristales en general menores a 6 mm, de colores predominantes pardo claro y gris pardusco. Forma principalmente stocks, y también diques; los stocks varían en tamaño de 0,3 a 8 km<sup>2</sup>, con formas irregulares, pero con tendencia a una elongación nortesur; los diques poseen una gran variedad de tamaños con ancho de 0.6 a 12 m y orientaciones diversas.

Esta unidad intruye a la Formación Arqueros en el área de estudio.

En el contacto de estos cuerpos hipabisales con las rocas de caja, frecuentemente se observan minerales oxidados de cobre, limonitas y, en parte, calcopirita; se sitúan numerosas minas en esos lugares de contacto.

La información radiométrica disponible es concordante con las relaciones de contacto e indicaría para esta unidad una edad del Cretácico Superior temprano (96-94 Ma).

### 5.4. Geología estructural

En el área de estudio, las rocas estratificadas poseen una disposición homoclinal con dip entre 20 y 50, y dip direction de 060 a 070, con variaciones locales de mayor amplitud.

La Falla El Álamo es la estructura de mayor importancia en las cercanías del área de estudio, 2 km al este de Mina Verde, y corresponde a una falla normal con reactivación inversa, poniendo en contacto las formaciones Arqueros y Quebrada Marquesa. Esta falla está segmentada y desplazada por fallas noreste-suroeste.

### 5.5. Geología económica

En el Distrito de Tambillos, Emparán y Pineda (2000) describen depósitos de cobre-magnetita y de cobrecobalto de tipo skarn. Se emplazan en rocas sedimentarias marinas de la facies (c) de la Formación Arqueros, formando skarns de granate y de anfíbola. Se describen también mantos de cobre al norte de El Peñón, correspondientes a Mina Verde y San Cristóbal, que contienen magnetita, piritita y calcopirita, con escasa bornita.

## 6. Resultados

Para efectos del modelamiento geológico, durante 2022 se determinó dividir Mina Verde en tres bloques, limitados por las principales estructuras: Bloque Norte, limitado al sur por la Falla Fastidiosa; y los bloques Este y Oeste, limitados entre ellos por la Falla Norte-Sur, y al norte por la Falla Fastidiosa (Figura 2). En el Bloque Oeste se encuentran los cuerpos mineralizados, mientras que en el Bloque Este se observa una secuencia de roca fresca sin mineralización, que, hasta el momento, no ha podido ser correlacionada con el Bloque Oeste.

**Tabla 1:** Principales rasgos estratigráficos y estructurales en Mina Verde

Nombre	Dip/dip direction
Estratificación	44/076
Falla Fastidiosa	55/190
Falla NS	70/240
Veta 2 291	73/206
Bypass 264-273	51/196
264-SE	60/204

### 6.1. Estructuras mayores

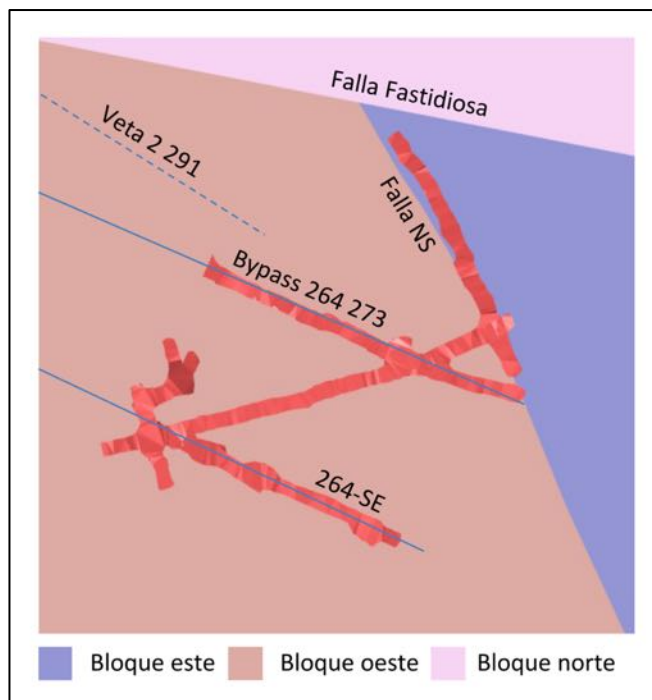
#### 6.1.1. Falla Fastidiosa

Es la principal estructura presente en Mina Verde, la cual tiene una disposición 55/190 (Tabla 1, Figuras 2 y 3) y un espesor variable entre 1 y 5 metros. Las estrías de movimiento observadas son subhorizontales, por lo que se desprende que se trataría de una falla

transcurrente. Informes preexistentes (Araya, 1996) asumen un movimiento dextral, el cual no ha podido ser corroborado durante el desarrollo de este informe. Esta falla limita la mineralización de mena hacia el norte de la mina. La brecha de falla posee mineralización de cobre no explotable debido a su relleno arcilloso. Esta falla es la única estructura de importancia reconocida previo a este informe.

#### 6.1.2. Falla NS

Durante la campaña de sondajes 2021, se descubrió y definió una nueva estructura mineralizada, la cual fue denominada Falla Norte Sur (o Estructura NS), la cual tiene una disposición 70/240 (Tabla 1, Figuras 2 y 3). Esta estructura, que corresponde a una falla inversa, define el límite entre los Bloques Este y Oeste, presentando mineralización de calcopirita dentro de una brecha de falla posteriormente mineralizada, de espesor variable entre 2 y 6 metros, acuñándose hacia el norte hasta el contacto con un dique andesítico, ubicado metros antes de la Falla Fastidiosa. Posee un plano con relleno arcilloso. La mineralización de cobre asociada a la brecha de falla sustentará la producción de los próximos 2 años, y actualmente se encuentra en preparación.



**Figura 2:** Los tres bloques geológicos de Mina Verde, y las principales estructuras. Nivel 264 como referencia.

### 6.2. Estructuras menores

En Mina Verde existen estructuras menores que poseen mineralización de cobre y un tamaño suficiente para sustentar un desarrollo minero. Estas estructuras

fueron descubiertas y modeladas durante 2021 y 2022, y han sido explotadas principalmente mediante avances horizontales.

### 6.2.1. Veta 2 291

Es una estructura lenticular, de alta ley, brechosa, con mineralización de calcopirita y bornita asociada a calcita, ubicada en el nivel 291. La orientación principal es 73/206 (Tabla 1, Figuras 2 y 3). Se acuña hacia el sureste y hacia el noroeste, y es correlacionable con una de las antiguas labores de pirquineros en superficie.

### 6.2.2. Bypass 264-273

Esta estructura corresponde a una brecha hidrotermal de potencia variable entre 10 centímetros y 2 metros, posteriormente fallada, que posee una disposición 51/196 (Tabla 1, Figuras 2 y 3), y mineralización de calcopirita y bornita asociada a calcita. Es una estructura que se proyecta por lo menos hasta el nivel 233, y resulta de interés el conocer su continuidad sobre el nivel 273.

### 6.2.3. 264-SE

Corresponde a una brecha hidrotermal posteriormente fallada, de disposición 60/204 (Tabla 1, Figuras 2 y 3), de potencia variable entre 50 centímetros y 2 metros. Exhibe mineralización de calcopirita asociada a calcita, y se acuña hacia el sureste, perdiendo su continuidad.

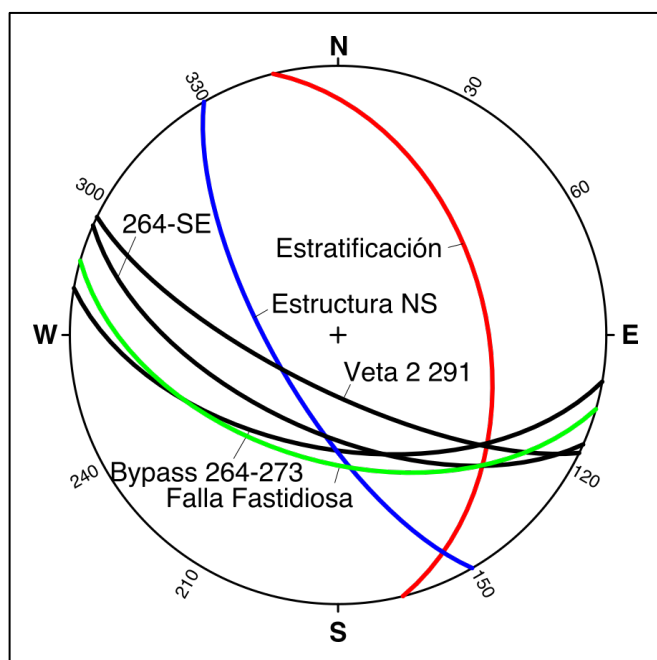


Figura 3: Proyección estereográfica de los principales rasgos estructurales y estratificación de Mina Verde.

## 6.3. Unidades Geológicas

Fueron definidas 14 unidades geológicas en base a unidades litológicas descritas macroscópicamente; las brechas y transiciones se definen como unidades geológicas para efecto de modelamiento geológico.

Tabla 2: Porcentaje de datos por cada Unidad Geológica y ley ponderada de cobre total como porcentaje. Datos 2021 y 2022. Datos ordenados por porcentaje.

UG	Porcentaje	Ley ponderada %CuT
CS	38.14%	0.15
GRT	18.16%	0.21
<b>BCS</b>	<b>9.51%</b>	<b>0.58</b>
CSN	7.91%	0.14
DQ	7.88%	0.14
ARN	4.54%	0.17
CSS	2.96%	0.13
ARNS	2.56%	0.05
CSK	2.36%	0.15
<b>CSO</b>	<b>1.86%</b>	<b>0.28</b>
LTC	1.66%	0.19
LT	1.31%	0.17
ARC	0.91%	0.14
<b>BLT</b>	<b>0.23%</b>	<b>0.26</b>

Las unidades denominadas “calcosilicatadas” corresponden a hornfels afectados parcialmente por otras alteraciones. Ya que no existen estudios microscópicos que permitan definir con precisión la litología de las unidades de granulometría más fina, no es posible determinar con la información disponible la composición real de estas unidades. Para evitar constantes modificaciones de la base de datos, se optó por mantener los códigos existentes, adecuando las descripciones.

### 6.3.1. Unidad de Granatita (GRT)

Esta unidad consta de una roca semi compacta, porosa, compuesta de granates de 2 a 5 mm y de anfíboles fibrosos intergranulares, con una presencia mayoritaria de granate hacia la base de la unidad, aumentando gradualmente el contenido de anfíboles hacia el techo, donde presenta contenido variable de pirita, pirrotina, y calcopirita despreciable, la que está asociada a calcita y actinolita intersticial. No ha sido posible determinar el tipo de granate, que probablemente sea Andradita, debido a la asociación con mineralización de cobre (Einaudi y Burt 1982).

### **6.3.2. Unidad de Transición Granatitas a Anfibolitas (CSK)**

Unidad que representa la transición desde Granatita a Anfibolita. Posee una matriz de grano fino, de color verde oscuro, que contiene anfíboles fibrosos como remplazo de los cristales de granate. En sectores se encuentra mineralizada con pirrotina y/o pirita diseminada. Contiene nódulos irregulares de granatita que, en ocasiones, posee mineralización de pirita diseminada o coronítica, y escasa calcopirita.

### **6.3.3. Unidad de Anfibolitas (ARN)**

Roca afanítica negruzca verdosa, producto del reemplazo masivo de anfíboles y clorita sobre granate. Posee una gran cantidad de pirita y pirrotina diseminadas y en lentes, y pirita en nódulos redondeados menores a 1 cm. Esta roca suele tener fracturas con material de relleno negruzco y brillo vítreo. Una característica para su identificación es la alta dureza, el sonido acampanado y alto rebote al golpe con el martillo.

### **6.3.4. Unidad Calcosilicatada (CS)**

Esta unidad se define como un hornfels de composición silíceo-calcárea, y se compone de una alternancia sedimentaria, desde limolita a arenisca grano fino. En la sección silícea de esta secuencia se observa cloritización, un aspecto bandeado y color verdoso. Esta unidad posee concreciones o nódulos característicos, posiblemente de origen calcáreo arcilloso, redondeados, elongados, e isorientados, con longitudes de 10 a 15 cm y 5 cm de alto, que se caracterizan por poseer un núcleo de calcita y clorita, y coronas de cristales de pirita bien desarrollados.

### **6.3.5. Unidad Calcosilicatada Nodular (CSN)**

Se compone de una secuencia nodular irregular, que se puede dividir en tres composiciones: una matriz mixta, más silícea que calcárea, homogénea verdosa y afanítica; una porción de nódulos irregulares silíceos en tonos blancos que se presenta con textura en apariencia fluidal o nodular isorientada, los que están rellenos por una tercera porción mixta calcárea-clorítica, de tonos verdosos más oscuros, compuesta de calcita, clorita y pirita diseminada.

### **6.3.6. Unidad Calcosilicatada Silicificada (CSS)**

Esta unidad posee un alto contenido de sílice, que anteriormente ha sido interpretado como silicificación, aunque también puede ser interpretado como horizontes sedimentarios más silíceos, metamorfizados

a cuarcitas. Contiene una primera generación de núcleos originalmente calcáreos de aspecto blanco lechoso-rosáceo a lila, la cual suele presentar cristales discontinuos, bien desarrollados de pirita y pequeños cristales de galena. Una segunda generación de núcleos de calcita presenta cuarzo, clorita y sulfuros, que le da un aspecto verdoso, y suele contener pirita diseminada. Esta unidad se caracteriza por sus colores más claros, siempre predominando el blanco lechoso, la alta dureza de la roca, fractura concoidea y su sonido acampanado al golpe del martillo.

### **6.3.7. Unidad Brecha calcosilicatada (BCS)**

No se trata de una litología en sí, sino que una Unidad Geológica para efectos de modelamiento. Esta unidad se define como una brecha hidrotermal tardía, de fragmentos angulosos, matriz de calcita, y mineralización de calcopirita y bornita. La BCS afecta principalmente a rocas de las unidades CS y CSN, y en ella se alberga gran parte de la mineralización económica de cobre, con una ley ponderada de 0.58% CuT.

### **6.3.8. Unidad Calcosilicatada Oscura (CSO)**

En el Bloque Oeste, se observan uno o dos niveles de una roca oscura, de grano fino, composición silíceo-calcárea, planos de estratificación bien definidos y brillo opaco, denominada históricamente como "lutita". Se encuentra afectada por un fuerte diaclasamiento perpendicular a la estratificación, creando bloques cúbicos que se desprenden de la caja con facilidad. Posee mineralización de calcopirita y bornita diseminada, como pátinas en los planos de diaclasamiento, o en una brecha concordante con la estratificación, correspondiendo en gran medida a la Unidad Principal.

### **6.3.9. Unidad de Lutita (LT)**

Esta unidad se ha observado exclusivamente en el Bloque Este. Corresponde una roca oscura, de grano fino, composición silíceo-calcárea, y brillo opaco. No está afectada por metamorfismo evidente, no posee planos de estratificación definidos, comportándose como una roca maciza, y su diaclasamiento tiende a confundirse como una estratificación que mantee hacia el oeste.

### **6.3.10. Unidad Alternancia de lutita (LTC)**

Corresponde a una alternancia estratificada de lutita y limolita calcárea, de color negruzco, con bandeado calcáreo grisáceo, de grano más grueso que presenta



abundante pirita diseminada de tamaño menor a 1 mm y también bordeando estos niveles calcáreos, concordantes con la estratificación.

#### **6.3.11. Unidad Brecha de Lutita (BLT)**

Corresponde a una brecha de lutita asociada a estructuras de fallas, de clastos angulosos y matriz de calcita. En el contacto con la Falla NS, se caracteriza por poseer un fuerte vetilleo y stockwork de calcita, y mineralización de calcopirita y menor bornita.

#### **6.3.12. Diques andesíticos (DQ)**

Corresponde a diques de intrusiones hipabisales de composición andesítica, que en sus zonas de contacto con la roca encajante presentan una masa fundamental afanítica, con cristales de plagioclasa tabulares mayores a 5 mm, y en su zona más distal de la caja tienden a variar su textura de porfídica a una textura inequigranular seriada. En los contactos con la roca de caja se observa mineralización de sulfuros de cobre, que en algunos casos pueden ser de interés económico.

#### **6.3.13. Secuencia sedimentaria fresca (ARNS)**

En el Bloque Este se observa un paquete de areniscas calcáreas que varía su tamaño de grano de fino a grueso, suele presentar vetilleo débil y discontinuo de calcita, que en ocasiones genera brechas, sin mineralización. También posee nódulos o concreciones calcáreas elongadas.

#### **6.3.14. Unidad Transición entre ARN y CS (ARC)**

Corresponde a una unidad menor, que representa una transición entre las unidades ARN y CS.

### **6.4. Alteración**

En Mina Verde, los eventos de alteración definen en gran medida a algunas de las unidades litológicas, causando en algunos casos la total destrucción de la litología original. Las principales alteraciones observadas son: granatización, anfibolitización y cloritización. Las epidotización y alteración potásica se observan principalmente al norte de la Falla Fastidiosa.

#### **6.4.1. Granatización**

Esta alteración oblitera completamente la roca original, definiendo a la Unidad de Granatita (GRT). Se observa hacia la base y el oeste de la secuencia, y presenta un contacto sinuoso y gradacional con la anfibolitización.

#### **6.4.2. Anfibolitización**

Corresponde a la alteración dominante de la Unidad de Anfibolita (ARN) y de la Transición de Granatitas a

Anfibolitas (CSK), y se manifiesta principalmente como reemplazo por actinolita. También se observa, en menor medida, en los nódulos de la Unidad Calcosilicatada (CS).

#### **6.4.3. Cloritización**

Corresponde a la principal alteración en las unidades CS, CSN, ARN, y CSK. En la unidad CSN, se encuentra principalmente rellenando los nódulos que caracterizan a esta unidad. En la unidad CS, se encuentra en nódulos y diseminado en bandas concordantes con la estratificación. En la unidad ARN, la clorita se observa junto a la actinolita, en una relación 1:1 aproximadamente, como resultado de la alteración retrógrada de granate.

#### **6.4.4. Epidotización**

La epidota es más común en el Bloque Norte, en forma de parches aislados masivos, afectando principalmente a rocas andesíticas. Ocasionalmente se asocia a la alteración potásica.

#### **6.4.5. Alteración Potásica**

De manera similar y asociada a la epidotización, se observa principalmente en el Bloque Norte, afectando a rocas andesíticas, de forma selectiva. También afecta de forma puntual a la granatita.

#### **6.4.6. Silicificación**

En la unidad CSS, se observan interdigitaciones o bandeamientos silíceos, que alternan con zonas más calcáreas, y que se caracterizan por una coloración blanquecina. Debido a su limitada presencia en el área, no ha sido posible definir si esto es causado por procesos hidrotermales. Es probable que, en vez de tratarse de una alteración, sean niveles con abundante chert o sílice por precipitación, ya sea de restos de organismos silíceos, o del volcanismo asociado a la cuenca.

#### **6.4.7. Calcita hidrotermal**

En el Bloque Oeste, la calcita se observa en zonas de brecha y fracturamiento, fuertemente asociada a la mineralización de calcopirita y bornita, formando en ocasiones geodas abiertas o drusas de cristales centimétricos. También se observa como relleno de intersticios en la Unidad de Granatita (GRT). En el límite entre los bloques Este y Oeste, se encuentra principalmente asociada a la estructura NS, en brechas y rellenando diaclasas. En el bloque Norte, sólo se observa rellenando intersticios en la granatita.

## 6.5. Mineralización

En Mina Verde, los minerales de mena explotados corresponden a sulfuros de cobre: calcopirita, y bornita en menor medida. Esta mineralización se encuentra asociada, en el Bloque Oeste, a la Unidad Calcosilicatada Oscura (CSO), junto a estructuras brechosas mineralizadas, en general fuertemente asociadas a calcita.

En la unidad GRT se observan sectores de pirrotina masiva, intersticial y diseminada, desde el nivel 291 al 213, en el límite noroeste. La pirita se observa de forma intersticial más que masiva. La misma asociación se observa en la ARN y CSK.

En las unidades CS, CSN y CSS, se observa principalmente pirita, en agregados alrededor de los nódulos, como textura coronítica, en bandas masivas concordantes a la estratificación, y diseminada. La galena es menor, y se observa como cristales aislados distribuidos dentro de la matriz.

## 7. Discusión

### 7.1. Clasificación genética del yacimiento

Las principales características que permiten determinar la génesis del yacimiento Mina Verde son:

- La presencia de rocas intrusivas adyacentes a una secuencia volcanosedimentaria calcárea
- La abundancia de granate hacia el contacto con las rocas intrusivas
- La presencia de texturas hornféisicas
- La asociación de minerales de alteración
- La mineralización de cobre

Los depósitos minerales asociados a estas características han sido clasificados de diferentes formas en la literatura a lo largo del tiempo: "metamórfico hidrotermal", "pirometasomático", "tactitas", "metamórfico ígneo", "metasomático de contacto" (Misra, 2012; Edwards, 1986). Actualmente, el término "depósito tipo skarn" (Burt 1977, Rose & Burt 1979, Einaudi et al. 1981) es el más utilizado y reconocido por los geólogos, siendo menos restrictivo en su connotación genética, dado que este tipo de depósitos pueden generarse mediante procesos completamente metamórficos, metasomáticos o una

combinación de ambos, mientras que el contacto con rocas intrusivas no necesariamente es evidente (Edwards y Atkinson 1988), ni tampoco necesario, ya que, a menores escalas, pueden generarse por la interdifusión de componentes en los contactos entre estratos de rocas silíceas y carbonatadas, sometidas a metamorfismo regional (Best, 2003).

En base a esta última clasificación, el yacimiento corresponde a un exoskarn cálcico de cobre, no asociado a pórfidos, producto de metamorfismo de contacto y reacción de litologías carbonatadas correspondientes a la facies (c) de la Formación Arqueros, con fluidos ácidos producidos por procesos metasomáticos asociados a la facies (b) de la unidad Intrusiva Hipabisal Kh.

### 7.2. Etapas de formación de skarn

Los depósitos tipo skarn se desarrollan típicamente como resultado de tres procesos secuenciales:

#### 7.2.1. Metamorfismo isoquímico de contacto (progrado)

Durante las etapas tempranas de emplazamiento de rocas intrusivas, las unidades sedimentarias son sujetas a metamorfismo de contacto, y la formación de una variedad de texturas hornféisicas. Este proceso es en gran medida térmico, y se comporta como un sistema cerrado, con la excepción de la desvolatilización de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, proceso que genera un aumento de la porosidad, lo que facilitará el flujo de fluidos en etapas posteriores (Robb, 2004).

#### 7.2.2. Metasomatismo y reemplazo (progrado)

Esta etapa implica la saturación de agua y vapor del magma, y el flujo de esta fase fluida hacia el halo metamórfico circundante. A mayores profundidades, los fluidos se desplazan a través de estructuras aisladas, o de forma paralela a la estratificación, mientras que, a menores profundidades, los fluidos serán distribuidos de forma más pervasiva, manifestándose como un halo de fracturamiento cercano a la intrusión.

Sílice, aluminio, hierro y otros componentes son introducidos en los sedimentos calcáreos por los fluidos magmáticos, mientras que el calcio, magnesio y CO<sub>2</sub>, son derivados de las rocas sedimentarias e introducidos al sistema metasomático. Los carbonatos son altamente solubles en fluidos hidrotermales de alta temperatura que poseen bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>, y se disuelven mucho más rápido que los silicatos a temperaturas similares (Ridley, 2013).



### **7.2.3. Afluencia de aguas meteóricas y precipitación de mineralización metálica (retrógrada)**

El sistema magmático-hidrotermal sufre un enfriamiento progresivo, y comienza a ser dominado por aguas meteóricas, produciéndose una serie de alteraciones retrógradas y la precipitación de las principales etapas de minerales de metales base, los que pueden depositarse como diseminaciones o vetas. La alteración retrógrada se superpone a las alteraciones metamórficas y metasomáticas tempranas (Robb, 2004).

Según el mismo autor, la precipitación tardía de los metales se relaciona con:

- una disminución de la temperatura de los fluidos, lo que conlleva a una disminución de la solubilidad.
- mezcla de fluidos.
- neutralización de los fluidos con litologías carbonatadas.
- mezcla de los fluidos magmáticos con los componentes meteóricos tardíos.

La superimposición de estos tres eventos conduce a una paragénesis confusa, y a una mineralogía y zonificación complicadas (Edwards, 1986).

### **7.3. Modelo genético del yacimiento**

En base a las evidencias de terreno, asociaciones minerales y relaciones de corte, la secuencia de eventos propuesta para la génesis del yacimiento en Mina Verde se desarrolla de la siguiente manera: los Intrusivos Hipabisales generaron metamorfismo de contacto en las rocas carbonatadas de la facies (c) de la Formación Arqueros, generando texturas hornfésicas, afectando a toda la secuencia sedimentaria dentro del halo metamórfico, proceso evidenciado por las unidades CS, CSO, CSN y CSS. Posteriormente, durante la etapa de metasomatismo, se genera el desarrollo de granates (GRT) en el contacto con el intrusivo, debido a la reacción de las soluciones ácidas del mismo con las rocas sedimentarias carbonatadas. Luego, la alteración retrógrada, producto de la interacción con aguas meteóricas, se manifiesta como alteración clorítica en las unidades calcosilicatadas (CS, CSS, y CSN), y anfibolitización y cloritización en la zona distal de la Unidad de Granatitas (GRT), generando la unidad de

Anfibolitas (ARN). Los contactos son generalmente irregulares, con formas nodulares o cóncavo-convexas. Finalmente, la mineralización económica de cobre se deposita en forma de pátinas y como brechas concordantes con la estratificación en la unidad CSO del Bloque Oeste, y como brechas hidrotermales asociadas a calcita en las estructuras Falla NS, Bypass 264-273, 264-SE y Veta 2 291.

### **7.4. Continuación de la Unidad Principal al norte de la Falla Fastidiosa**

Se ha planteado que podría existir una continuación del Cuerpo Principal al noreste de la Falla Fastidiosa, asumiendo que tuvo un movimiento dextral. Es probable que esta suposición se desprenda de interpretación de fallas dextrales que cortan a la Falla El Álamo en la hoja Andacollo-Puerto Aldea. A la fecha, esta continuación no ha podido ser demostrada, quedando pendiente la planificación de sondajes que puedan confirmar o descartar la hipótesis.

### **7.5. Mineralización en estructuras discordantes a la estratificación**

Hasta 2021 se consideraba que la mineralización de cobre en Mina Verde se alojaba exclusivamente en la Unidad Calcosilicatada Oscura (CSO). Posteriormente, y gracias a una correcta interpretación de la geología estructural de la mina, se pudo determinar un control diferente de la mineralización. La identificación de estructuras con mineralización de cobre, de orientación NW-SE, como Veta 2 291, Bypass 264-273, y 264-SE, han permitido dar continuidad a la operación.

### **7.6. Unidades Geológicas hospedantes de la mineralización**

En base a la tabla 2, se desprende que la Unidad Geológica más favorable a la mineralización es la Brecha Calcosilicatada (BCS), con una ley ponderada de sus interceptos de 0.58% CuT. Las unidades BLT (Brecha de Lutita) y CSO (Calcosilicatada Oscura), aunque representan un porcentaje menor de los interceptos, siguen siendo de interés. Lo anterior implica ampliar el enfoque exploratorio, dando énfasis a la detección de brechas mineralizadas, y a la correlación espacial de las mismas, dado el conocimiento actual del control estructural de la mina.

## 8. Conclusión

La mineralización de cobre en Mina Verde explotada históricamente se encontraba asociada únicamente a un horizonte de roca sedimentaria metamorfozada, de color oscuro y grano fino, más permeable y frágil, correspondiente a la unidad CSO, cuyo protolito es probablemente una lutita. Esta unidad pudo desarrollar una zona de cizalle paralela a la estratificación, generando brechas, lo cual favoreció la mineralización posterior. El agotamiento de este recurso motivó a buscar nuevos sectores de interés económico, dentro del alcance actual de las labores. Como resultado, se determina que la mineralización también está fuertemente asociada a brechas hidrotermales tardías, de orientación NW a SE, tales como Veta 2 291, Bypass 264-273, 264-SE, y Cuerpo NS. La continuidad operacional de Mina Verde dependerá de la correcta interpretación geológica y estructural del yacimiento, en base a los mapeos de galerías, con el apoyo de la información de los sondajes diamantinos interior mina, y de un seguimiento frente a frente de las estructuras mineralizadas, manteniendo los avances en mineral.

## 9. Referencias

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

Araya, M. 1996. Proyecto San Cristóbal Norte, sector Mina Verde. Informe de Diagnóstico. Cominor ingeniería y proyectos S.A.

Bassi, H. 1985. La Verde, un yacimiento cuprífero filo-hidrotermal terciario, ligado a la cuenca marina cretácica de Chile central. IV Congreso Geológico Chileno.

Burt, D. 1977. Mineralogy and petrology of skarn deposits. *Società Italiana di Mineralogia e Petrologia Rendiconti*.

Edwards, R. 1986. *Ore Deposit Geology and its Influence on Mineral Exploration*. Chapman and Hall Ltd.

Einaudi M; Meinert LD, Newberry RJ. 1981. Skarn deposits. *Economic Geology* 75th Anniversary.

Einaudi, M.; Burt, D. 1982. Introduction; terminology, classification, and composition of skarn deposits. *Economic Geology*. Vol. 77(4): 745–754.

Emparán, C.; Pineda, G. 1999. Area Condoriaco-Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No. 12, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Emparán, C.; Pineda, G. 2006. Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Misra, K. 2012. *Understanding Mineral Deposits*. Springer Publishing.

Ridley, J. 2013. *Ore Deposit Geology*. Cambridge University Press.

Pérez, E.; Reyes, R. 1998a. Ammonites provenientes de los alrededores de Mina Los Mantos Altos, noreste de Estación Pejerreyes, norte de Ovalle, IV Región. Inédito. Informe Paleontológico No. 1998-10, Servicio Nacional de Geología y Minería, 6 p. Santiago.

Pérez, E.; Rubilar, A. 2002. Fauna fósil del Cretácico Inferior, recolectada al sureste de La Serena, IV Región. Inédito. Informe Paleontológico No. 2002-01, Servicio Nacional de Geología y Minería, 6 p. Santiago.

Robb, L. J. 2004. *Introduction to Ore Forming Processes*. Blackwell Publishing.

Rose, A.; Burt, D. 1979. Hydrothermal alteration. En *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, segunda edición. Wiley.