



UNIVERSIDAD NACIONAL ANDRÉS BELLO  
Facultad de Ingeniería  
Carrera Geología

**IMPACTO DE LAS ETAPAS INICIALES DE EXPLORACIÓN Y LOS FACTORES  
GEOMETALÚRGICOS EN EL VALOR DE UN YACIMIENTO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

AMAYA MAITE FUENTES GAMÉ

Profesor guía:

Edmundo Tulcanaza Navarro

Miembros de la comisión:

Ximena Contardo Berríos

Cristian López Valenzuela

Viña del mar Chile, 2019

## RESUMEN

Los factores geometalúrgicos tienen un rol importante en cada una de las fases iniciales del desarrollo minero, desde la exploración hasta factibilidad. La misión de estos es identificar y clasificar los minerales según su comportamiento frente a un determinado proceso metalúrgico, consiguiendo planificar y dirigir más eficientemente los procesos de valorización de un recurso mineral y su explotación.

El término valorización se refiere a la estimación del valor financiero de un activo, es decir, estima cuanto podría pagar otra compañía por un activo minero en una fecha determinada. Valorizar un activo es necesario debido a la exigencia de contar con una información transparente, concreta y de la mejor calificación.

La presente investigación representa una recopilación de información enfocada a los factores geológicos y metalúrgicos, a la interrelación entre ellos y su impacto en el crecimiento de valor de un depósito minero, utilizando como caso estudio el yacimiento Cerro Negro, con el fin de entregar una guía preliminar para orientar futuros trabajos.

Los resultados de la investigación incluyen análisis del yacimiento abarcando su caracterización geometalúrgica intrínseca (litología, mineralización, alteración, recuperación metalúrgica, entre otros factores), así como el modelamiento geometalúrgico a través del software Vulcan 10, buscando relevar la necesidad de conducir estratégicamente la adquisición de información geometalúrgica durante el desarrollo de un recurso minero, para fines de identificar el crecimiento del valor de un depósito minero y la importancia de esos factores en su comercialización.

Mina Cerro Negro a la fecha ha centrado sus esfuerzos en el reconocimiento de reservas mineras, que al encontrarse en el manto mineralizado ha permitido la producción de minerales con leyes medias de 0.85%. Para realizar el estudio se contó con una visita de terreno a la faena recopilando información de tipo geológico que hacen referencia a la estimación de recursos mineros y producción, además de antecedentes metalúrgicos, tales como pruebas y ensayos realizados previo a la explotación de la mina, dentro de los que destacan pruebas de reducción de tamaño de partículas para determinar granulometría necesaria en el proceso, caracterización de minerales mediante microscopía, entre otras.

Se espera, además, que esta investigación constituya un aporte al conocimiento y difusión de la minería, especialmente dirigido hacia la industria minera, la comunidad nacional, a través de repositorios de carácter público.

## ABSTRACT

Geometallurgical factors play an important role in each of the early stages of mining development, from exploration to feasibility. These factors aim to identify and classify minerals according to their behavior in relation to a specific metallurgical process, being able to plan and conduct more efficiently the valuation processes of a mineral resource and its exploitation.

The term *valuation* refers to the estimated financial value of an asset, that is, it estimates how much another company could pay for a mining asset on a given date. The asset valuation is necessary due to the requirement of having transparent, factual and best rating information.

The present research is a collection of information focused on the geological and metallurgical factors, the correlation between them and their impact on the value growth of a mineral deposit, using Cerro Negro mine as a case study, in order to provide guidance for future work.

The results of this research cover the following: a mine analysis, including its intrinsic geometallurgical characterization (lithology, mineralization, alteration, metallurgical recovery, among other factors), as well as geometallurgical modelling through software Vulcan 10. The objective is to highlight the need to strategically conduct the acquisition of geometallurgical information during the mineral resource development to identify the value growth of a mineral deposit and the importance of those factors in its marketing.

Until today, Cerro Negro mine has focused its efforts on the recognition of mineral reserves, which being found in the mineralized *manto* allows the production of minerals with average grades of 0.85%. To carry out this study, a field trip was made to collect geological information concerning estimated mineral resources and production, as well as metallurgical background such as tests and trials made prior to mine production mainly particles size reduction tests to determine the required granulometry in the process, mineral characterization by microscopy, among others.

Moreover, it is expected that this research contributes to knowledge and make mining widely available to mining industry, national community through public repositories.

## **Agradecimientos**

A través de estas líneas quiero expresar mis agradecimientos a todas las personas que han sido parte de este trabajo, el cual no significa un simple término de una investigación, sino que marca el cierre de una etapa importante de mi vida, etapa en la cual aprendí y crecí.

En primer lugar, agradecer a quienes fueron parte de este trabajo, a mi profesor guía Edmundo Tulcanaza, por haber confiado en mí y darme el tema de tesis, por ser tan movido y conseguirme realizar el caso estudio en la mina Cerro Negro, por la paciencia, dedicación, comprensión y apoyo durante todo el año, con la mejor disposición siempre.

A las personas de Cerro Negro, en especial a Leopoldo Bustos superintendente de la mina, a Esteban Faundez geólogo de producción, a Jaime Barrera metalurgista del área sulfuros y a Claudio Peña metalurgista de la planta de óxidos, quienes me brindaron aporte intelectual, técnico y logístico, gracias por la buena disposición y estar siempre disponibles ante mis inquietudes y por darme la oportunidad de realizar mi tesis es sus dependencias.

A mi familia por la infinita paciencia, por aguantarme el mal genio producto de la carga de trabajo más tesis, por su apoyo incondicional y por siempre estar ahí. En especial a mis papas por su trabajo y sacrificio que han permitido estar donde estoy. Son y seguirán siendo un pilar fundamental en mi vida.

A mis amigas de toda la vida, las “cochinas” por ser las mejores, por posponer juntas porque “no estaríamos todas”, por darme apoyo moral a la distancia y siempre decirme “¡vos dale!” cuando ya estaba “chata”.

Gracias a mis compañeras, “las niñas” con quienes tuve el agrado de compartir clases, trabajos, largas horas en laboratorios y que formaron parte de este esforzado camino a la titulación.

A la Cami Espinoza por tener las palabras precisas para alentarme en cada momento, por su amistad incondicional y por estar siempre.

A la Oli por entender cuando no podía ir a trabajar y menos ir a montar.

Y a mis gordos, Atila y Tom por desvelarse conmigo.

A todos ellos ¡Infinitas gracias!

## Tabla de Contenidos

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 HIPÓTESIS.....	2
1.4 METODOLOGÍA .....	2
1.4.1 Recopilación y síntesis bibliográfica .....	2
1.4.2 Estudio de caso en Mina Cerro Negro.....	3
1.4.3 Análisis del Modelo geometalúrgico .....	3
1.4.4 Importancia de factores geometalúrgicos en su comercialización.....	3
<b>MARCO TEORICO</b> .....	4
2.1 MERCADO.....	4
2.1.1 Mercado Minero.....	4
2.1.2 Mercado de Cobre.....	4
2.2 VALORIZACIÓN DE ACTIVOS MINEROS .....	5
2.2.1 Metodologías de valoración de activos mineros .....	5
2.3 CATEGORIZACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS.....	7
2.4 FASES DEL DESARROLLO MINERO.....	9
2.4.1 Exploración básica .....	9
2.4.2 Exploración avanzada: .....	10
2.4.3 Perfil .....	10
2.4.4 Prefactibilidad: .....	11
2.4.5 Factibilidad .....	11
<b>FACTORES</b> .....	13
3.1 GEOLÓGICOS.....	13
3.2 METALÚRGICOS .....	15
3.3 INCERTIDUMBRE Y RIESGO.....	16
<b>MINA CERRO NEGRO</b> .....	19
4.1 MOTIVACION Y SELECCIÓN .....	19
4.2 UBICACIÓN Y ACCESOS .....	19

4.3 RESEÑA HISTORICA.....	20
4.4 GEOMORFOLOGIA DEL AREA .....	21
4.5 GEOLOGÍA DEL ÁREA .....	22
4.5.1 Geología regional .....	22
4.5.2 Geología local .....	23
4.6 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN .....	25
4.7 PRUEBAS METALÚRGICAS.....	27
4.7.1 Caracterización mineralógica .....	27
4.7.2 Pruebas de reducción de tamaño de partículas .....	28
4.7.3 Determinación del índice de trabajo .....	28
4.7.4 Ensayos de consumo de ácido y extracción de cobre.....	29
4.8 PROCESOS PRODUCTIVOS .....	29
4.8.1 Planta de Sulfuros .....	32
4.8.2 Planta de Óxidos .....	32
4.8.3 Insumos críticos.....	34
4.9 MODELO GEOMETALÚRGICO .....	35
5.0 ACTIVIDADES Y TRABAJOS .....	38
5.0.1 Reconocimiento inicial.....	38
5.0.2 Campaña de terreno.....	38
5.0.3 Trabajo en gabinete.....	39
<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>40</b>
5.1 VALIDACIÓN DE CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA .....	40
5.2 EL MERCADO EN LA VALORIZACIÓN .....	42
5.3 RELACIÓN FASES, INCERTIDUMBRES Y VALORIZACIÓN.....	43
5.4 GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOCIENTÍFICA. ....	47
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>52</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Esquema ilustrativo de la clasificación de recursos y reservas (Código CH 20235). .....	8
<b>Figura 2:</b> Conocimientos aceptados para la categorización de reservas mineras (Modificado de Codelco, 2013). .....	9
<b>Figura 3:</b> Esquema ilustrativo de las fases del desarrollo minero, las cuales pueden ser agrupadas en tres grandes etapas: exploración, desarrollo y producción, con respectivos años de ejecución. Elaboración propia. ....	12
<b>Figura 4:</b> Posible escenario de la vida de un proyecto minero (ASATCH, 2017). .....	15
<b>Figura 5:</b> Esquema ilustrativo de las incertidumbres y riesgos en las diversas fases del desarrollo minero y como afecta el valor en estas (CRISRSCO,2003). .....	18
<b>Figura 6:</b> Ubicación y ruta de acceso a la zona de estudio desde Viña del Mar. Imagen satelital Google Earth (2018). .....	20
<b>Figura 7:</b> Mapa Morfoestructural de la Región de Valparaíso: Sector Costero, Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes. Se encuentran en color amarillo, rojo y azul respectivamente. ....	22
<b>Figura 8:</b> Geología regional y local del área de estudio. Carta Quillota-Portillo, extraído y modificado de Rivano et al.,1993. ....	24
<b>Figura 9:</b> Mineralización de sulfuros. (A) Bornita asociada a Calcosina y en menor proporción Hematita, (B) Malaquita con Crisocola, (C) Brecha con vesículas rellenas de Crisocola. ....	26
<b>Figura 10:</b> Esquema idealizado del yacimiento Cerro Negro. Entregado por Cerro Negro. ....	26
<b>Figura 11:</b> Sección manto mineralizado explotado. Entregado por Cerro Negro. ....	30
<b>Figura 12:</b> Ilustración de uno de los sectores stock del rajo o también llamado cancha de acopio. Entregado por Cerro Negro. ....	31
<b>Figura 13:</b> Esquema de proceso industrial correspondiente a planta de sulfuros. Elaboración propia. ....	32
<b>Figura 14:</b> Esquema de proceso industrial correspondiente a planta de óxidos. Elaboración propia. ....	34
<b>Figura 15:</b> Modelo representando yacimiento Cerro Negro. Se muestra leyenda correspondiente a bloques y sondajes .....	36
<b>Figura 16:</b> Sección transversal en vista SW-NE del modelo. Los sondajes que están sobre la topografía quieren decir que actualmente ese material del cerro fue extraído, los colores azules son material estéril mientras que hacia el color rojo son minerales de alta ley (como indica la leyenda). ....	37
<b>Figura 17:</b> Modelo de bloques del yacimiento Cerro Negro. Cada bloque contiene tres valores; primer valor corresponde a ley cobre total (CuT), segundo valor a ley cobre en soluble (CuS) y el tercer valor se le asigna a la categorización donde 1 es medido, 2 indicado y 3 inferido. ....	37
<b>Figura 18:</b> Recuperación de cobre con respecto a la granulometría (Valdebenito, 2011). .....	41



**Figura 19:** Fases de desarrollo de un proyecto minero de acuerdo a la información y sus riesgos (Modificado de Tulcanaza, 2011). ..... 47

## Índice de Tablas

Tabla 1: Métodos de valoración aplicables en las diferentes fases del proyecto minero. 6  
Tabla 2: Insumos de alto impacto en el yacimiento Cerro Negro. .... 35  
Tabla 3: Recuento de información geometalúrgica. .... 48

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

La principal fuente de ingreso de Chile proviene de la industria minera, el mercado es amplio y posee un gran número de proyectos mineros en etapas de exploración, desarrollo y producción, cuyos inversionistas son nacionales como internacionales. Estas etapas son las responsables de dar valor al negocio minero, es decir forman parte de la cadena de valor de la industria minera. Uno de los primeros problemas que enfrentan las empresas al intentar vender, asociar o transferir alguno de sus activos, es saber el valor de dichos activos.

En Chile existe un código para el informe de resultados de exploración y de estimación de recursos minerales y reservas mineras, estableciendo estándares mínimos de calidad para asegurar la fiabilidad de diversos proyectos, instaurado por la “Comisión Calificadora de Competencias en recursos y reservas mineras” creada por la Ley de la República de Chile N°20.235, reconocido por el *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards* (CRIRSCO) que lidera la fundación de un código internacional.

Los recursos naturales se han revalorizado a través del tiempo y los gobiernos, las comunidades y las empresas están interesados en su relevancia. Esto ha despertado el interés de los Estados, compañías y, sobre todo, de los ciudadanos que quieren saber qué pasa con sus recursos naturales, están muy pendientes de lo que tienen en la corteza terrestre y donde hay posibilidades de negocio.

La finalidad de este trabajo es relevar la necesidad de conducir estratégicamente la adquisición de información y datos geometalúrgicos durante el desarrollo de un recurso minero para fines de valorización y comercialización, enfocándose en los protocolos de la propiedad minera Cerro Negro.

La Mina Cerro Negro propiedad de la Compañía Minera Cerro Negro S.A, consiste en una mina a cielo abierto con producción de cobre, ubicada en una zona en la que se desarrolla una fuerte actividad de mediana y pequeña minería relacionada a la franja metalogénica de estratoligados de Cobre, del Cretácico Inferior, situada en la latitud 32°35'04" S y longitud 71°52'54" W.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Relevar la necesidad de conducir estratégicamente la adquisición de información geológica y datos geometalúrgicos durante el desarrollo de un recurso minero para fines de valorización y comercialización.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para llevar a concretar el objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar estatus del Activo Minero.
- Jerarquizar los factores geocientíficos.
- Identificar la naturaleza del mineral para su tratamiento posterior en la planta.
- Analizar modelo geometalúrgico realizado mediante el software Vulcan10.
- Evaluar el crecimiento del valor del depósito.
- Determinar la importancia de factores en su comercialización.

## **1.3 HIPÓTESIS**

El principal activo de una mina son sus reservas y si estas no existen o la calidad es muy baja entonces la mineralización no posee importancia económica. Este es un factor primordial y de suma responsabilidad, por ende, las etapas iniciales son las que dan el valor a la valorización de un depósito minero.

## **1.4 METODOLOGÍA**

Para lograr que este trabajo cumpla con los tiempos establecidos y de manera satisfactoria se definieron las siguientes etapas de estudio:

### **1.4.1 Recopilación y síntesis bibliográfica**

Tarea obligatoria para iniciar cualquier proyecto. Se basa en una revisión y selección de la información relacionada al área de estudio, también de las diferentes

metodologías y criterios para la valorización de activos mineros y los diferentes factores que influyen, además de los variados conceptos utilizados en minería.

#### 1.4.2 Estudio de caso en Mina Cerro Negro

Se analiza la faena por medio de una visita a terreno, en la cual se estiman 3 días de jornada durante el mes de septiembre, obteniendo información mediante la misma Compañía, además de observaciones y análisis por medio de testigos de sondajes, interpretando la información, la cual será base para las próximas etapas. Las actividades que comprende son: análisis litológico y mineralógico, identificación de alteraciones, recuperación metalúrgica, grado de liberación del metal y gestión de información geocientífica.

#### 1.4.3 Análisis del Modelo geometalúrgico

A partir de los resultados obtenidos en etapas anteriores se analizará el modelo de la faena realizado mediante el software “Vulcan10”, facilitado por Mina Cerro Negro.

#### 1.4.4 Importancia de factores geometalúrgicos en su comercialización

Etapa final en la cual se discutirá y concluirá la hipótesis del trabajo.

## Capítulo 2

# MARCO TEORICO

## 2.1 MERCADO

### 2.1.1 Mercado Minero

Según la Real Academia Española mercado se define como el conjunto de actividades realizadas libremente por los agentes económicos sin intervención del poder público y también como el conjunto de operaciones comerciales que afectan a un determinado sector de bienes. Uno de estos sectores es el minero, el cual se enfoca en la exploración, extracción, procesamiento y venta de recursos minerales. Dependiendo del tipo de mineral a extraer la actividad minera se divide en minería metálica (cobre, oro, plata, plomo, hierro, entre otros) y minería no metálica (arcilla, cuarzo, mármol, mica, entre otros).

Este trabajo se enfoca en el mercado minero metálico, específicamente en el mercado del cobre.

### 2.1.2 Mercado de Cobre

El cobre constituye la principal fuente de ingresos por exportaciones de la economía del país; entre el 50 al 60% en los últimos años (CODELCO,2017), y se comercializa bajo la forma de cátodos y concentrados de cobre a otros países donde son procesados para producir productos manufacturados.

Las transacciones de cobre se realizan en tres mercados internacionales: la Bolsa de Metales de Londres, el COMEX de la Bolsa Mercantil de Nueva York y la Bolsa de Metales de Shanghai. El precio depende de las condiciones del mercado internacional, tenderán a subir cuando la demanda es mayor.

En Chile, si bien la minería tiene una importante presencia en la actividad económica del país, tiene una presencia menor en la Bolsa de Valores de Santiago, con solo cuatro empresas las que representan menos del 5 % de la capitalización bursátil de la entidad (entiéndase por valor del capital de una sociedad obtenido a partir de su cotización en la bolsa).

## 2.2 VALORIZACIÓN DE ACTIVOS MINEROS

El término “valorización de un activo” se entiende por la estimación del valor financiero de tal activo, es decir, estima cuanto podría pagar otra compañía por un activo minero en una fecha determinada. El valor entregado es conocido como *Fair Market Value* (Valor de Mercado Justo), el cual es comúnmente definido como el precio más probable a ser obtenido en un mercado sin restricciones con las partes interesadas y actuando “*arm-length*” (término utilizado para indicar que las partes se encuentran en una posición de igualdad a la hora de negociar sus términos) (McCallun, 2011). Para obtener el valor es necesario que toda la información relevante al activo sea presentado en informes técnicos y de valorización que sean claros y fáciles de comprender, es por ellos que en países como Australia, Canadá y Sudáfrica se han creado códigos para el reporte de toda aquella información relevante, y tienen como finalidad establecer estándares para la realización de informes públicos de valorización así como también definir normas en su elaboración, estos códigos son llamados “código de reportes de reservas y recursos” y destacan JORC *code* formulado en Australia, NI143-101 en Canadá y SAMREC en Sudafricana, contenidos en el código internacional CRIRSCO formulado en el año 1994, en el cual también participan países como Rusia, Brasil, Estados Unidos, Indonesia y Chile. Es reconocido por organizaciones mundiales como el consejo de normal internacionales de contabilidad (IASB), la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), como la organización internacional clave que representa a la industria minera en cuestiones relacionado con la clasificación y reporte de activos minerales (CRIRSCO, 2003).

Este código internacional establece definiciones para entregar resultados de exploración y de estimación de recursos y reservas mineras, proporciona un sistema de categorización de las estimaciones según confiabilidad, define a un profesional competente y determina los criterios a ser considerados para la realización de informes técnicos.

### 2.2.1 Metodologías de valoración de activos mineros

Existen bastantes métodos de valorización de activos mineros reconocidos mundialmente. La elección más adecuada para su posterior aplicación depende de varios

factores; incluyendo certeza de futuras exploraciones, la extensión de la exploración, resultados de cualquier prueba de exploración, las características geológicas y geográficas y el nivel de experiencia y conocimiento.

A continuación, se describen los distintos métodos de valorización que son concordantes con criterios de mercado y aplicables a las diferentes etapas de un proyecto minero (Tabla1).

- Método de ingresos

El método basado en ingresos usa ingresos reales o posibles que podrían fluir desde el proyecto y generalmente se basan en análisis de flujo de caja descontado (*discounted cash flow* (DCF)) para llegar a un valor actual para el proyecto. Las técnicas DCF solo pueden ser aplicadas a proyectos en una etapa avanzada de desarrollo o a activos ya en operación, cuando se tiene confianza en las proyecciones (Ernst & Young, 2018).

- Método de mercado

El método de mercado se basa en las transacciones históricas de propiedades mineralizadas con el fin de proporcionar una mejor estimación para el valor actual de una propiedad. Corresponde a una valorización según información del mercado, incluyendo análisis de ventas en el mercado, uso de ofertas, reglas generales o medidas para comprar valores de metal en la tierra. Estos son aplicados a proyectos en todas las etapas de desarrollo (Lawrence, 2001).

- Método de costo

El método de costo corresponde al valor equivalente a los costos incurridos en llevar el proyecto al estado actual, describe el valor de una propiedad debe ser al menos el monto gastado en la propiedad para alcanzar un cierto nivel de conocimientos geológicos, sin embargo, ignora mucho los valores críticos inherentes a cualquier propiedad minera especialmente en las fases tempranas de exploración (Ernst & Young, 2018).

Tabla 1: Métodos de valoración aplicables en las diferentes fases del proyecto minero

Método de valoración	Exploración	Desarrollo	Producción
Ingresos	No utilizada	Ampliamente utilizada	Ampliamente utilizada
Mercado	Ampliamente utilizada	Ampliamente utilizada	Ampliamente utilizada
Costos	Bastante utilizada	No utilizada	No utilizada

(Modificado de Gonzales, 2017).

## 2.3 CATEGORIZACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS

El código anteriormente nombrado establece diversas definiciones. Para el desarrollo de este trabajo es necesario rescatar las definiciones principales (Fig.1):

- **Persona Competente:** persona miembro de una institución profesional de carácter minero-metalúrgico, o de una reconocida organización profesional extranjera. Debe tener un mínimo de cinco años de experiencia en la actividad que le haya sido encomendada.
- **Recurso Mineral:** concentración u ocurrencia de material de interés económico en la corteza terrestre en forma y cantidad en que haya probabilidades razonables de una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, ley, características geológicas y continuidad del recurso mineral son conocidas y estimados. Estos se subdividen en orden de confianza en categorías de Inferidos, Indicados y Medidos.
- **Recurso Medido:** parte del recurso minero en la cual la estimación del tonelaje, ley, forma y mineral presentan un alto grado de confianza, basada en información fiable recopilada en exploraciones, perforaciones y muestreos. Se infiere continuidad geológica.
- **Recurso Indicado:** parte del recurso minero en la cual la estimación del tonelaje, ley, forma y mineral presentan un razonable grado de confianza, basados en la información fiable recopilada en exploraciones, perforaciones y muestreos. No se tiene certeza en la continuidad geológica.
- **Recurso Inferido:** parte del recurso en la cual la estimación del tonelaje, ley, forma y mineral presentan un bajo grado de confianza, basados en la información recopilada en exploraciones, perforaciones y muestreos, los cuales sean limitados o de una calidad y confiabilidad inciertas, no pudiendo verificar la continuidad geológica.
- **Reserva Minera:** es la parte económicamente explotable de un recurso mineral medido o indicado. Las Reservas Mineras se subdividen en orden de confianza en Reservas Probables y Reservas Probadas.



- **Reserva Probables:** porción del recurso indicado eventualmente medido económicamente extraíble, no disponen de suficiente información para asegurar la recuperación.
- **Reservas Probadas:** porción del recurso medido económicamente extraíble, presentan certeza prácticamente absoluta.

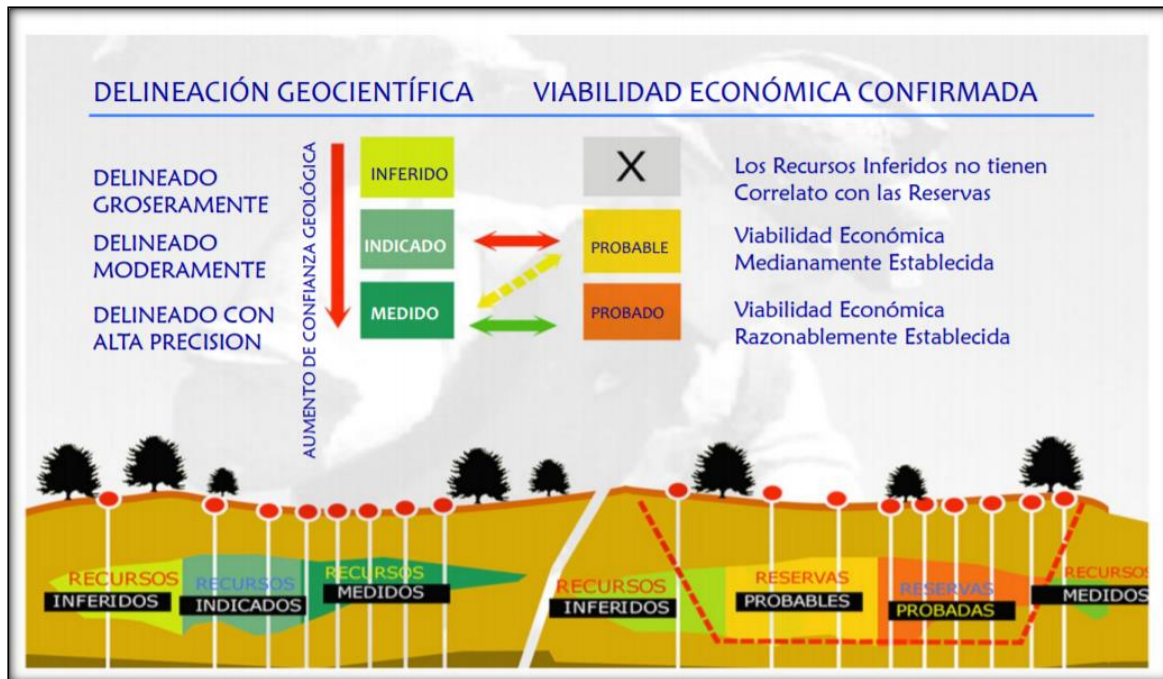


Figura 1: Esquema ilustrativo de la clasificación de recursos y reservas (Código CH 20235).

El código establece una relación directa entre recurso medido y reserva probada, y entre recurso medido-indicado y reserva probable, de manera tal que el recurso indicado debe convertirse primero en recurso medido para posteriormente, ser convertido en reserva probada.

Cabe destacar que los recursos y reservas son validados por personas competentes y calificadas, quienes son miembros de la Comisión Calificadora de Competencias en Recursos y Reservas Mineras y tienen la obligación de guiarse por los estándares y procedimientos establecidos por la Comisión.

A continuación, en la figura 2 se muestra la categorización de recursos y reservas con el conocimiento aceptado necesario, el cual va aumentando a medida que se avanza en las etapas iniciales de un proyecto minero.



Figura 2: Conocimientos aceptados para la categorización de reservas mineras (Modificado de Codelco, 2013).

## 2.4 FASES DEL DESARROLLO MINERO

El desarrollo minero consta de 5 fases iniciales (Fig. 3):

### 2.4.1 Exploración básica:

Primera etapa del desarrollo minero en la cual se define la zona a explorar y su geología, seguido por un reconocimiento general del área, con el fin de identificar algunas características favorables que puedan indicar la presencia de un yacimiento. El geólogo estudia diferentes antecedentes utilizando técnica como mapas geológicos, imágenes satelitales, geofísica, entre otros. Una vez identificada el área, se procede a ir a terreno

para registrar características de las rocas (color, textura, estructura, minerales) y recoger las primeras muestras que permitan determinar el contenido de elementos de interés para la explotación.

#### 2.4.2 Exploración avanzada:

En esta segunda etapa, el objetivo es lograr un conocimiento detallado del depósito mineral, definiendo la geometría, sus principales características y su tamaño, además de determinar la ley del elemento a explotar, precisando el valor del depósito. Generando así un modelo geológico y un modelo de recursos del depósito.

En esta etapa se utilizan técnicas de sondajes, muestreo de túneles, zanjas y/o caminos, y se realizan estudios metalúrgicos como lixiviación en botella (determina pH y temperatura), para luego generar los modelos de ingeniería en las etapas siguientes.

El éxito de esta fase es el hallazgo de anomalías minerales, considerando recursos hipotéticos. Como resultado se debe realizar un estudio de factibilidad para tomar la decisión de seguir adelante con el proyecto, si el estudio es positivo, podemos decir que estamos en presencia de un yacimiento.

#### 2.4.3 Perfil:

Es la etapa en la cual se identifican las oportunidades para el desarrollo del proyecto. Los geólogos estudian la composición de la estructura que contiene el mineral, tomando diferentes muestras de distintos lugares para realizarles pruebas metalúrgicas, principalmente de granulometría, caracterización mineralógica mediante microscopio, análisis químicos y ensayos de consumo de ácido, para determinar posibles reservas y leyes minerales. En la mediana y pequeña minería estas son efectuadas en laboratorios externos.

Se basa en información de estudios preliminares, los controles estructurales, tipo de alteración, la mineralización, la litología y la estimación y categorización del recurso se infieren de información inicial de muestreo y sondajes. Se seleccionan alternativas posiblemente factibles, o aquella alternativa que es técnica y económicamente mejor entre las alternativas estudiadas, para luego tomar la decisión de continuar o no con el proyecto.

#### 2.4.4 Prefactibilidad:

En esta etapa se realiza una evaluación más completa y profunda de las alternativas identificadas en la etapa de perfil y de las posibles soluciones. Es decir, se basa en información de estudios detallados, en el cual los controles estructurales, tipo de alteración, la mineralización, la litología y la estimación y categorización del recurso han sido validadas en base a un adecuado muestreo, análisis químicos y pruebas metalúrgicas efectuadas en planta piloto. Permitiendo la generación de un plan minero factible y económicamente viable.

#### 2.4.5 Factibilidad:

Esta etapa determina la rentabilidad del yacimiento y define el método de explotación, la metalurgia, y el transporte, además de los costos de producción y los recursos requeridos para desarrollar la mina.

Desde el punto de vista geometalúrgico se estudia la ley del mineral y su tonelaje, las posibles alternativas de explotación del yacimiento en términos de métodos mineros, diseños de explotación, maquinaria a emplear y ritmos de producción. Dentro de esta etapa existen subetapas de las cuales destacan; la selección del tamaño de la mina y la planta, además del método de explotación y procesamiento, la determinación de las reservas, la realización del plan minero, la especificación del equipamiento e infraestructura y finalmente los aspectos legales, sociales y ambientales.

Estas fases representan los trabajos que se realizan en una mina previo a la construcción y explotación, las etapas van avanzando secuencialmente capturando más información de manera de incrementar la precisión de los datos, “yendo de lo macro a lo micro”. Cada una de estas fases se desarrolla en un tiempo estimado. La etapa de exploración demora alrededor de 5 años (2 años exploración básica y 3 años exploración avanzada), para desarrollo se consideran 3 años en los cuales cada fase demora aproximadamente 1 año, y la etapa final de producción demora 3 años.

El objetivo principal es aumentar certidumbre, recabando la información suficiente y necesaria para tomar la mejor decisión desde el punto de vista técnico económico.

Los valores estimados de cada una de las etapas, generalmente se dan por unidad de metal. Así en el caso del cobre los valores varían desde la exploración a 1c US\$/lbCu (un centavo de dólar por libra de cobre) hasta la factibilidad entre 10 a 12 c US\$/lbCu.



**Figura 3:** Esquema ilustrativo de las fases del desarrollo minero, las cuales pueden ser agrupadas en tres grandes etapas: exploración, desarrollo y producción, con respectivos años de ejecución. Elaboración propia.

# Capítulo 3

## FACTORES

### 3.1 GEOLÓGICOS

Los Factores Geológicos, son de vital importancia en este negocio ya que entregan los datos base de la cadena de valor del negocio minero, partiendo por la ocurrencia de mineralización que podría dar forma a un depósito mineral, y que de acuerdo con diferentes componentes como lo son: condiciones de mercado, tecnologías, logísticas, medioambientales, entre otras, podrían constituir un yacimiento mineral económicamente viable transformándose en una operación minera. Mediante las diversas etapas explicadas anteriormente, se busca aumentar el valor, con diferentes estudio técnicos y económicos (estudios de prefactibilidad y factibilidad), los cuales tiene por finalidad aumentar el conocimiento geológico de la zona de estudio, establecer parámetros geo-minero-metalúrgicos y económicos, y por consecuencia disminuir el riesgo del activo. Es por ellos, que la calidad de los datos es de suma importancia. Para que la calidad sea efectiva se requiere que los datos sean confiables, es por ellos que el profesional geólogo a cargo surge como el primer factor a la hora de generar valor, pues es él quien descubre el activo y proyecta su potencial en el tiempo.

El modelo geológico es una representación tridimensional de la posición espacial y la forma que poseen los cuerpos minerales en el yacimiento. Contienen de manera ordenada y sistemática los atributos especiales como litología, alteración y mineralización de una clase de depósito mineral (Cox y Singer, 1992). Es así como se define otro factor geológico de gran importancia, la determinación del modelo geológico, el cual está estrechamente ligado al tipo de depósito. La importancia de esto radica en que no es lo mismo explorar y explotar un depósito tipo pórfido cuprífero que uno tipo estratoligados, ya que las alteraciones, asociaciones minerales y forma de la mineralización se disponen de manera distinta en cada caso. El interés de la construcción de un modelo ya sea del punto de vista litológico, un modelo de bloques, de cavidades, de topografía, entre otros, es que es fácil de entender a simple vista y de rápido acceso, además en muchos casos la mineralización se encuentra asociada a unidades geológicas específicas, por lo cual resulta clave para poder entender el proceso de mineralización y definir la evaluación de

recursos. Si este no se considera resulta una mala decisión para la empresa, debido a que las estimaciones de recursos dependen de decisiones apropiadas sobre las distintas poblaciones relevantes desde el punto de vista geológico y estadístico (Srivastava, 2005).

El producto final del modelo es el desarrollo de un modelo de bloques que es el resultado de la fase de exploración y evaluación de recursos de un cuerpo mineralizado. Luego de diversas campañas de sondajes, se extraen datos puntuales, que son procesados con técnicas geoestadísticas de interpolación para interpretar el volumen y distribución de leyes del cuerpo completo. Contiene además parámetros metalúrgicos de interés en base a la información generada a partir de pruebas metalúrgicas estándares en condiciones de laboratorio (Codelco, 2010). Utilizando todas las herramientas geológicas, geoquímicas, geofísicas y estadísticas a nuestra disposición, mejor será el modelo y por ende más efectivas serán las exploraciones y la evolución de los recursos minerales (Barton, 1993).

El geólogo, cuya experiencia y responsabilidad determinara la credibilidad de los datos que entregue, certificados bajo protocolos de QA/QC (*Quality Assurance/Quality Control*), proceso usado para medir y asegurar la calidad de un producto, y que se verán reflejados en el modelo geológico propuesto, junto con otras áreas del conocimiento, como lo son minería y economía, establecerán el modelo geometalúrgico que será el punto de partida del valor del activo.

A continuación (Fig.4) se muestra cómo el valor de un proyecto va aumentando a medida que se aumenta su conocimiento geológico. Por otro lado, se aprecia que el caso favorable es el menos probable y que la posibilidad de abandonar un proyecto por ser económicamente inviable es en lo que ocurre en la mayoría de los casos.

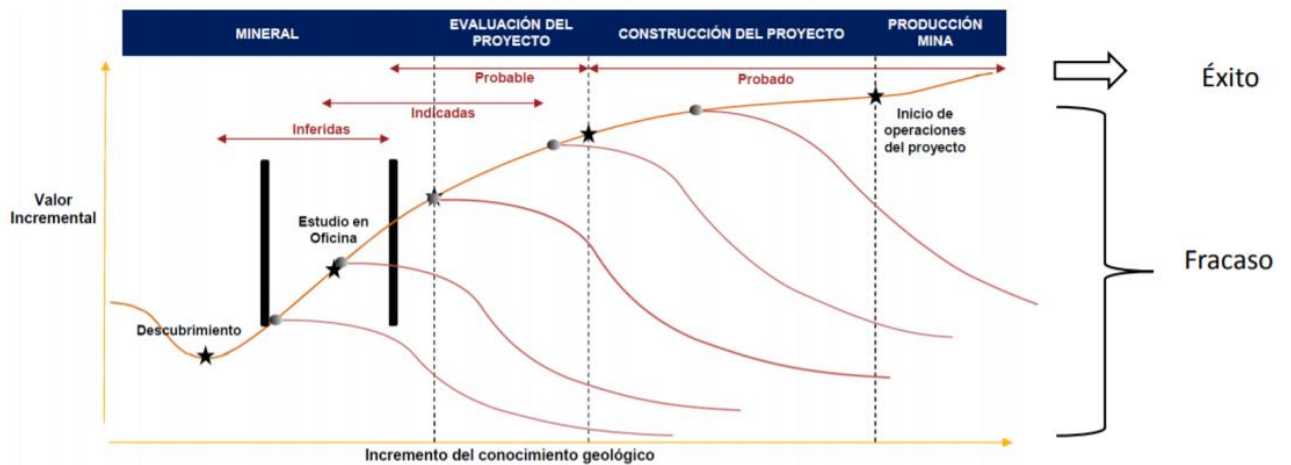


Figura 4: Posible escenario de la vida de un proyecto minero (ASATCH, 2017).

## 3.2 METALÚRGICOS

Los factores metalúrgicos están asociados a los procesos de planta, corresponden al conjunto de procesos que se llevan a cabo para separar selectivamente las especies minerales de interés de aquellas sin valor. Se puede dividir en cuatro grandes áreas: procesamiento de minerales, procesos hidrometalúrgicos, procesos electrometalúrgicos y procesos pirometalúrgicos.

Los procesos hidrometalúrgicos se refieren al tratamiento de metales mediante soluciones acuosas. El objetivo de estos procesos está orientado a extraer, purificar, concentrar o recuperar especies inorgánicas de valor económico. Consta de cuatro etapas: (1) chancado y molienda en la que el mineral se tritura en seco y pasa a un circuito de molienda húmeda, produciendo una pulpa de mineral fino, (2) lixiviación, etapa en que la pulpa pasa al circuito de lixiviación produciendo disolución del metal contenido en el mineral. El residuo de lixiviación que contiene los componentes no lixiviados es filtrado obteniéndose un residuo sólido seco (estéril de tratamiento), (3) extracción por disolventes orgánicos, tercera fase en la solución acuosa obtenida en la etapa de lixiviación pasa al circuito de extracción con disolventes, donde por medio de un agente de extracción, se obtiene su purificación y concentración y por último, (4) electrodeposición en la cual la concentración purificada pasa a las celdas, lugar donde



se deposita sobre cátodos de acero inoxidable. Los cátodos de alta pureza son desplazados y enviados directamente a la industria de transformación.

También están los procesos electrometalúrgicos, los cuales consisten en la producción de metales mediante la aplicación de energía eléctrica, dependiendo del tipo de depósito se distinguen dos procesos principales: la electroobtención que consiste en la extracción de metales a partir de soluciones puras, densas y compactas y la electrorefinación que trata de la obtención de metales de alta pureza a partir de un metal impuro.

La última área asociada a la metalurgia son los procesos pirometalúrgicos, es una técnica tradicional de extracción de metales. Permite obtener metales a partir de sus minerales o de sus concentrados por medio del calor, se trata principalmente de extraer el metal del mineral, eliminar la ganga y purificar los metales, para incrementar la ley y el contenido de metal, considera tres fases consecutivas: fusión que tiene por objetivo concentrar el metal mediante una separación de fases de alta temperatura, una sulfurada rica en metal y otra oxidada, conversión que incrementa la riqueza del producto sometiéndolo a una gran oxidación, y por último la refinación la cual consiste en la eliminación de impurezas remanentes en el material mediante un tratamiento térmico.

Hay que considerar que para estos procesos en planta sean realizados adecuadamente, se debe estudiar previamente el material mediante diferentes pruebas metalúrgicas dentro de las que destacan, caracterización mineralógica, determinación de granulometría, cantidad de insumos necesarios para que la producción sea efectiva, análisis químicos entre otros, efectuadas generalmente en laboratorios certificados.

### **3.3 INCERTIDUMBRE Y RIESGO**

Los conceptos de riesgo e incertidumbre están relacionados, pero son diferentes. La incertidumbre involucra a variables que son desconocidas y cambiantes, pero su incertidumbre puede ser conocida y resuelta con el tiempo, eventos y acciones, en otras palabras, es la posibilidad de que un evento ocurra o no. El riesgo por otro lado es algo que se tiene y es el resultado de la incertidumbre. Es la probabilidad de que un peligro existente durante un periodo de tiempo concreto provoque un incidente. A veces, el riesgo

puede permanecer constante mientras la incertidumbre aumenta con el tiempo (Mun,2006).

La mayor parte de las incertidumbres están centradas en los estudios preliminares, en las fases iniciales, en las cuales el financiamiento corresponde a capital de riesgo, y estas disminuyen en la fase de factibilidad donde el financiamiento corresponde mayormente a capitalización pública (Fig.5). Las incertidumbres y riesgos en proyectos mineros medidos en términos de probabilidad de fracaso, se reducen a través de un proceso secuencial en el cual se perfecciona el conocimiento de los parámetros que afectan, es decir, en fases exploratorias existe un 70% al fracaso, en perfil un 50%, en estudios de factibilidad un 20% y fases de ingeniería un 10% de probabilidad a fracasar (Tulcanaza, 2011).

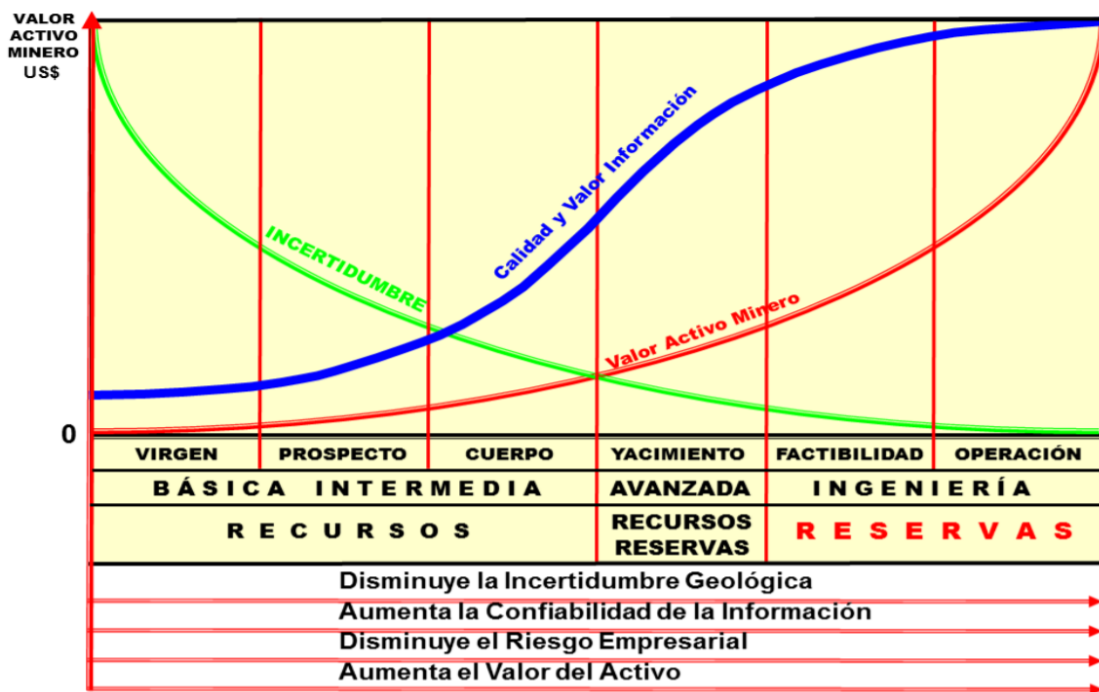
La estimación de recursos y reservas está fuertemente asociada con el riesgo geológico, que es el efecto de la incertidumbre geológica en el desempeño del proyecto por no cumplir con las expectativas, ya sea por el yacimiento y sus condicionamientos o la naturaleza del mineral en sí. Surge debido a que la información geológica se obtiene a partir de un número limitado de muestras. Esto se puede minimizar reduciendo la incertidumbre utilizando el conocimiento, perforaciones, ensayos de trabajo y estudios.

Dentro de las incertidumbres relevantes enfocadas en la valorización de yacimientos están las asociadas a operaciones, estas tienen relación con los tiempos, velocidades y capacidades de los componentes mineros, también con la estrategia de operación ante cambios de no disponibilidad de los componentes (Manriquez,2015), es decir, pérdidas operacionales de servicio, mantenciones, fallas, velocidades de camiones, tiempo de carga y descarga de estos, etc. También es considerado como incertidumbre el precio del cobre e insumos requeridos en el yacimiento y la disponibilidad de agua. De igual manera es necesario considerar los riesgos representados por la rotación de personal que a veces implica la pérdida de datos muestrales, omisión y atrasos de informes, desorden en procedimientos, falta de reconciliaciones, entre otras.

La vulnerabilidad de la industria, representada por las incertidumbres intrínsecas del recurso minero y por el riesgo de los negocios debido a la deflación de los precios de las materias primas, requiere de un proceso de aseguramiento de protocolos y métodos asociados con toda la cadena de valor del negocio, incluyendo parámetros económicos

y análisis competitivos de su estructura financiera. Métodos y procedimientos utilizados en la industria deben ser rigurosos y sólidamente fundamentados.

Luego del procedimiento de identificar y evaluar los riesgos, se definen las acciones que se realizaran para tratar esos riesgos, estas pueden ser de mitigación o eliminación conforme a los objetivos que tenga cada compañía y considerando siempre que cualquier acción que se tome frente a riesgos se tiene un costo asociado, el cual debe evaluarse al momento de tomar la decisión de eliminar o mitigar.



**Figura 5:** Esquema ilustrativo de las incertidumbres y riesgos en las diversas fases del desarrollo minero y como afecta el valor en estas (CRISRSCO,2003).

## Capítulo 4

# **MINA CERRO NEGRO**

### **4.1 MOTIVACION Y SELECCIÓN**

La mediana minería está viviendo un periodo de transformación, paso de ser una industria desarrollada por familias vinculadas al sector, a enfrenta un proceso de cambio, con relevantes implicancias tanto para las comunidades como a nivel regional. Actualmente ha tenido una tasa de crecimiento promedio en los últimos años de 8.5% y los ingresos superan los US\$2.000 millones (minería chilena, 2011). La faena Cerro Negro, además de pertenecer al sector de mediana minería y dedicarse a la extracción de minerales también produce cátodos y concentrados de cobre, es un yacimiento muy completo en todo ámbito. Sin dejar de considerar las facilidades y el apoyo que me otorgaron desde el inicio cuando se seleccionó la faena como caso estudio hasta el final de este trabajo.

### **4.2 UBICACIÓN Y ACCESOS**

La propiedad minera Cerro Negro se encuentra ubicada en la Región de Valparaíso a 210 kilómetros al noreste de Santiago, y a 27 kilómetros al sureste de Cabildo, en la provincia de Petorca, comuna de Cabildo, sector de Pitipeumo, en la latitud de 32°35'04" S y longitud 71°52'54" W.

Para llegar hasta la localidad se puede acceder vía terrestre desde Viña del Mar por Ruta 60, hasta llegar a la intersección con Ruta 5/Panamericana Norte, avanzar 45 kilómetros hacia el norte hasta llegar a ruta E-35 en la Ligua. Continuar por E-35 y E-41 durante 32 kilómetros hacia E-461 en Cabildo, desde este punto son 6 kilómetros por camino de tierra (Fig. 6).



**Figura 6:** Ubicación y ruta de acceso a la zona de estudio desde Viña del Mar. Imagen satelital Google Earth (2018).

### 4.3 RESEÑA HISTORICA

Mina Cerro Negro es propiedad de la Compañía Minera Cerro Negro S.A, donde el 99.9% de las acciones las tiene Compañía Minera Cobriza S.C.M.

Las primeras exploraciones y excavaciones datan de 1920, pero no es hasta el 23 de julio de 1944 que se inaugura el complejo industrial mina-planta Cerro Negro como el comienzo de la gran minería en Chile, hasta el año 1975 ENAMI (Empresa Nacional de Minería) mantuvo su planta regional junto a un poder comprador en minerales.

Debido a la gran recesión económica el complejo permaneció cerrado desde 1981 hasta 1983, año en que Don Andrónico Luksic toma el control de la compañía, consiguiendo incrementar la capacidad de tratamiento de minerales sulfurados de 25.000 a 49.000 ton/mes. Luego de unos años, en 1996, considerando las nuevas políticas del grupo económico y la inestabilidad del precio del cobre, se decide la paralización de la

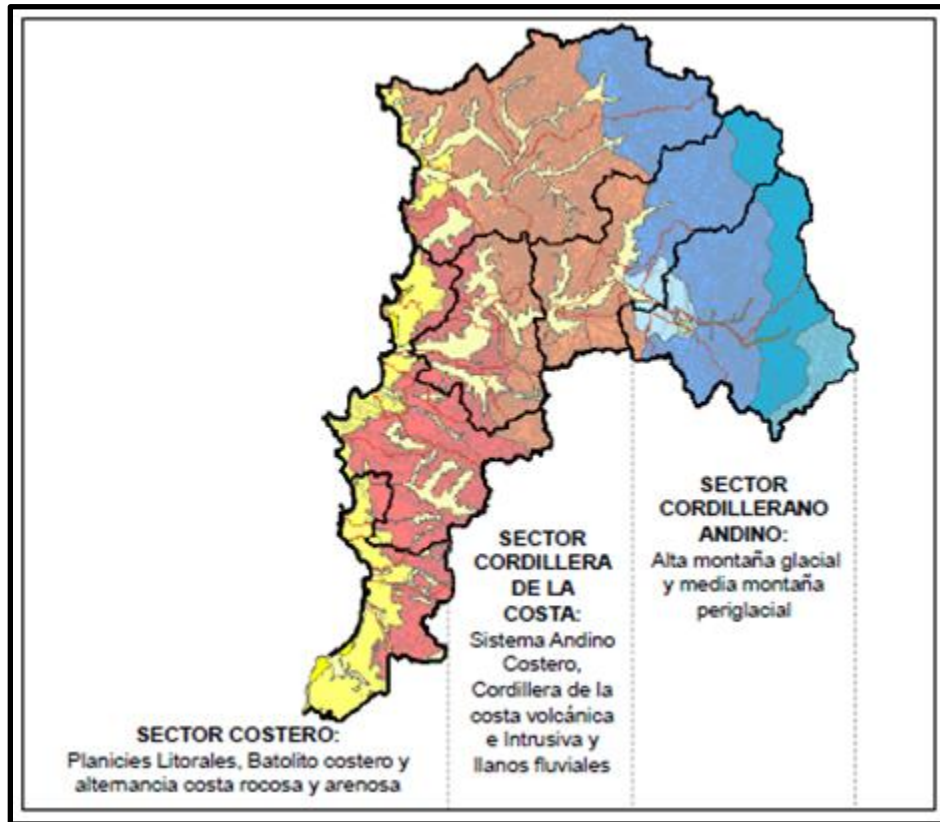
faena. Sin embargo, con el objeto de mantener en funcionamiento la faena, en noviembre 1996 los trabajadores adquieren la compañía.

En el año 1997 se inician las operaciones de la planta de lixiviación con una capacidad inicial de procesamiento de 6.000 ton/mes. El producto final es precipitado de cobre comercializado en ENAMI Ventanas. Dos años después se construye la planta de Extracción por Solventes (SX) y la planta de sulfato. La planta Electroobtención (EW) se construye a comienzos del año 2001, ampliándose a principios del año 2002.

En noviembre del año 2001 se instala un poder comprador ENAMI para Minerales oxidados de cobre y se acuerda la devolución de finos en forma de cátodos de cobre. A fines del año 2005 se inicia la lixiviación secundaria de rípios, cuyos finos son destinados a producir sulfato de cobre. Actualmente se está dando inicio a la ampliación del área. El proyecto contempla el mejoramiento y ampliación de las áreas de chancado, lixiviación, extracción por solventes y electroobtención.

#### **4.4 GEOMORFOLOGIA DEL AREA**

La Región de Valparaíso presenta tres unidades morfoestructurales mayores, las cuales corresponde, de oeste a este: Sector Costero, Cordillera de la Costa, y La Cordillera Principal de los Andes (Fig. 7). Al norte del Río Aconcagua, la Cordillera de la Costa y La Cordillera Principal de los Andes forman una sola unidad, con cerros que sobrepasan los 2.000 m.s.n.m. La Depresión Intermedia sólo está presente en algunas cuencas interiores, como San Felipe, La Ligua y Catapilco. En la desembocadura de los ríos La Ligua y Petorca se forman terrazas litorales y zonas de dunas. Entre el valle de La Ligua y el Aconcagua el relieve se presenta como una cadena de cerros y la Cordillera de la Costa se divide en dos ejes: los Altos de Putaendo y los Altos de Catemu.



**Figura 7:** Mapa Morfoestructural de la Región de Valparaíso: Sector Costero, Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes. Se encuentran en color amarillo, rojo y azul respectivamente.

## 4.5 GEOLOGÍA DEL ÁREA

### 4.5.1 Geología regional

El sector costero está formado por planicies litorales y batolito costero, corresponden a niveles de terrazas que han sido interpretados como terrazas de abrasión marina de edad Plio-Pleistocenas, labradas sobre los complejos intrusivos Paleozoicos y Mesozoicos (Gana *et al.*, 1996) con elevaciones que fluctúan entre los 100 y los 500 m.s.n.m. (Farías, 2007).

La Cordillera de la Costa se caracteriza por tener un relieve abrupto, constituido por rocas intrusivas del Jurásico al Cretácico, en conjunto con secuencias volcánicas y sedimentarias que van desde el Jurásico al Cretácico Inferior (Rivano *et al.*, 1993), correspondientes a las Formaciones: Ajial, Cerro Calera, Horqueta, Lo Prado y Veta Negra (Fig.8). Estas últimas están plegadas formando un bloque monoclinal de rumbo NS y manto 35°E (Gana *et al.*, 1996). Además, hay que considerar, la presencia de la

franja Metalogénica del Cretácico Inferior que se extiende entre los 22° y 34° de latitud sur y presenta un variado conjunto de depósitos metalíferos, entre ellos pórfidos cupríferos y depósitos estratoligados (Maksaev *et al.*,2007).

La Cordillera Principal de los Andes, está compuesta por rocas volcánicas y volcanoclásticas Cretácicas y Paleógenas, pertenecientes a las Formaciones: Las Chilcas, Los Pelambres y Farellones, intruidas por cuerpos plutónicos del Neógeno (Rivano *et al.*, 1993).

#### 4.5.2 Geología local

La faena Cerro Negro corresponde a un sector de la Cordillera de la Costa, de la parte central de Chile donde afloran rocas de edad Cretácica Inferior, asignadas al miembro Pitipeumo de la Formación Las Chilcas (K1c) (Rivano *et al.*, 1986). El miembro Pitipeumo está compuesto por una secuencia sedimentaria concordante con rocas volcanoclásticas, que de base a techo está constituida por; areniscas rojas, tobas de lapilli (Brecha Diablo), lutitas negras (en parte también calizas y margas carbonosas), areniscas verdes, brechas y nuevamente areniscas verdes. (Espinoza,1969). Estas rocas presentan una estructura de homoclinal de rumbo N75° a 80° W con inclinación 8° a 20° S, afectando por fallas de rumbo NNE, NNW y EW (Olcaj, 1979).

La Formación Las Chilcas esta intruida por pórfidos andesíticos aflorantes y otros que no alcanzan la superficie que han sido ubicados en las labores subterráneas asociadas al desarrollo de la actividad económica en la mina. Algunos presentan morfología de sills en las areniscas ubicadas en el sector oriental del yacimiento. Cubriendo las zonas bajas de los cerros, donde hay menor pendiente se encuentran depósitos aluviales y coluviales. Se caracterizan por ser material poco consolidado, compuesto principalmente por ripios, gravas y arenas (Fig.8).



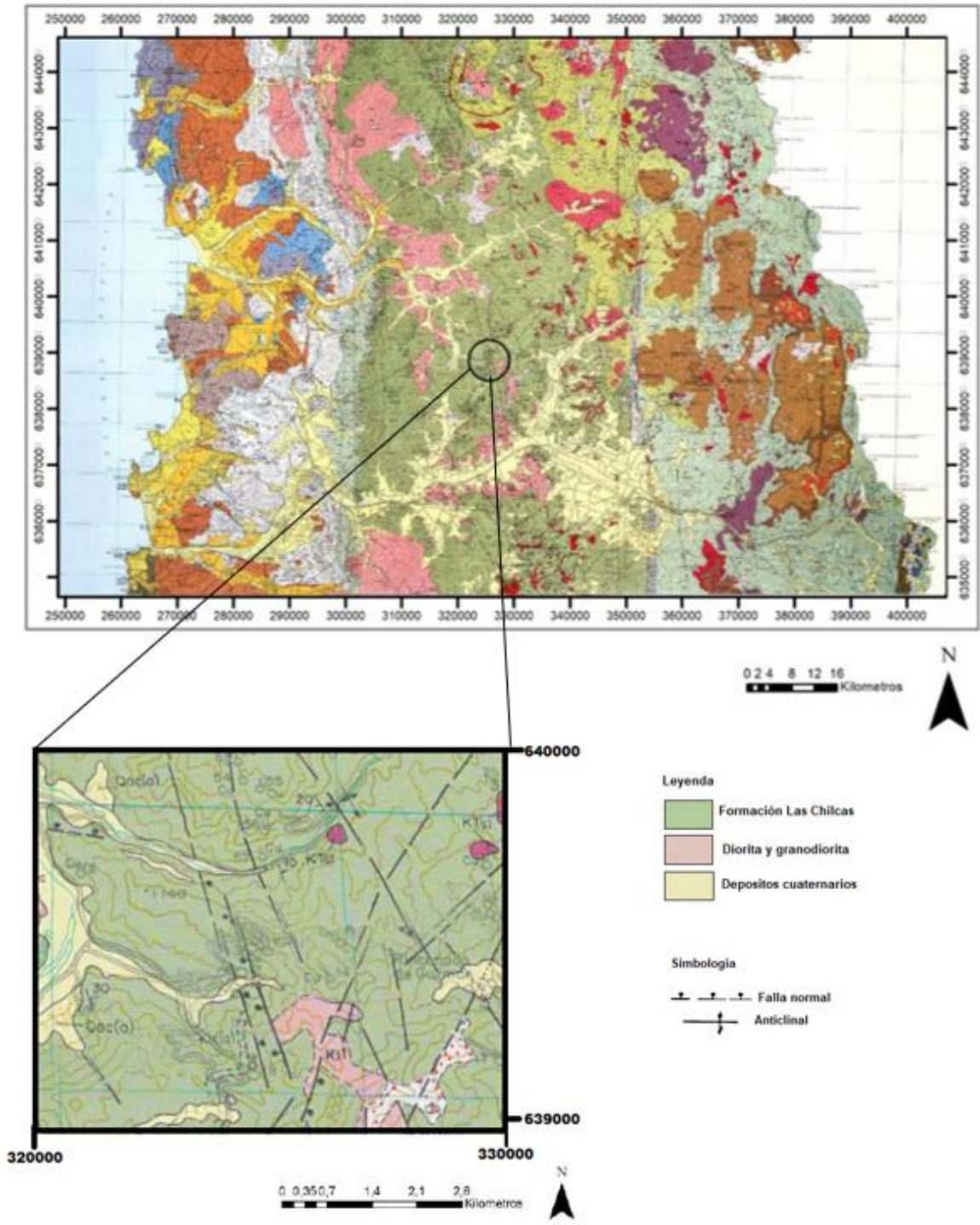


Figura 8: Geología regional y local del área de estudio. Carta Quillota-Portillo, extraído y modificado de Rivano et al.,1993.

## 4.6 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN

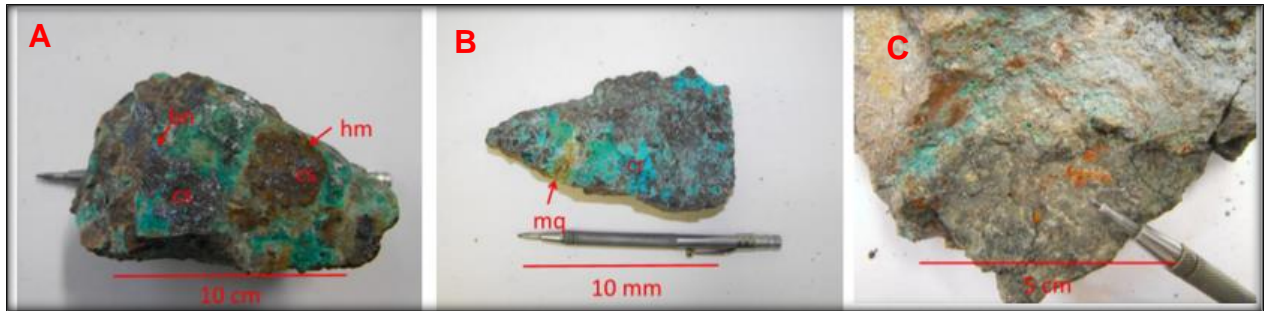
La faena Cerro Negro es un depósito estratoligados, denominado también tipo manto (Ruiz et al., 1965), corresponden a cuerpos subhorizontales o a cuerpos de brecha y veta con mineralización importante de sulfuros de cobre (Fig.10). Son, después de los yacimientos tipo pórfido cuprífero, la fuente más importante de producción de cobre en Chile.

La mineralización de sulfuros (Fig.9) se presenta principalmente diseminada en el techo de la unidad denominada Brecha Diablo, y en menor proporción en las lutitas y areniscas rojas. La Brecha Diablo es una unidad sin estratificación visible, cuyo espesor varía entre 0 a 200 metros acuñándose hacia el norte (Arévalos, 1992). Las lutitas están silicificadas y tienen un espesor que varía entre 5 a 40 metros.

Los minerales de la mena son en orden de abundancia: Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Bornita ( $\text{Cu}_2\text{FeS}_4$ ), Calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y en menor cantidad Galena ( $\text{PbS}$ ) y Esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), la ganga corresponde a Pirita ( $\text{FeS}_2$ ). La mineralización de mena se presenta principalmente en forma diseminada en la matriz de la brecha y en menor proporción en los clastos.

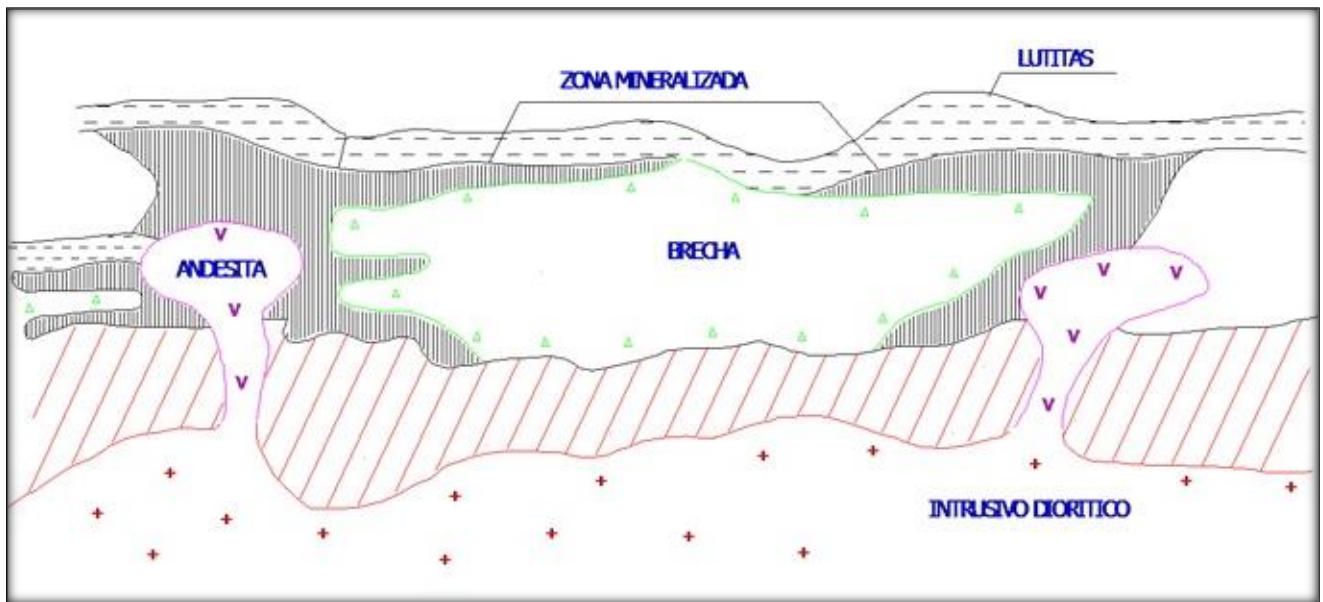
Existe, además una mineralización de óxidos de cobre (Fig.9), la cual se asocia al afloramiento de la brecha, el desarrollo de zonas de fracturas y la presencia de la Brecha Diablo en zonas de quebradas.

Los óxidos correspondientes presentes son óxidos verdes y negros, dentro de los óxidos verdes se destaca la Malaquita ( $\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) con Crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) y eventualmente Atacamita ( $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ ) con Azurita ( $2\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), dentro de los óxidos negros existe Tenorita ( $\text{CuO}$ ), Cuprita ( $\text{CuO}_2$ ), Chenevixita ( $\text{CuFe}_2^{3+}(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4$ ), *copper pitch* y *copper wad*, estos últimos son mineraloides, es decir, una asociación de varios minerales, siendo *copper wad* un oxidado silicatado rico en manganeso, mientras que *copper pitch* rico en fierro.



**Figura 9:** Mineralización de sulfuros. (A) Bornita asociada a Calcosina y en menor proporción Hematita, (B) Malaquita con Crisocola, (C) Brecha con vesículas rellenas de Crisocola.

La alteración hidrotermal que acompaña la mineralización consiste en clorita, calcita, cuarzo y subordinadamente albita y epidota (Olca, 1979). En la zona de lutitas la alteración está caracterizada por arcilla y sílice, en las areniscas rojas existe una alteración incipiente de clorita y calcita, mientras que en la Brecha Diablo el cemento de la brecha es clorita y calcita, y en menor proporción arcilla, cuarzo, albita y epidota.



**Figura 10:** Esquema idealizado del yacimiento Cerro Negro. Entregado por Cerro Negro.

## 4.7 PRUEBAS METALÚRGICAS

En la faena Cerro Negro se realizan diversas pruebas metalúrgicas a nivel de laboratorio previo a mandar el mineral a las plantas. La información recopilada en estas pruebas es utilizada para definir el comportamiento de las unidades geológicas, mineralógicas en la producción y su proyección, constituyendo la base del modelo geometalúrgico del yacimiento. Esto se ejecuta de manera anticipada, a fin de prever el comportamiento metalúrgico del mineral. Los estudios metalúrgicos son:

### 4.7.1 Caracterización mineralógica

Técnica utilizada desde la fase de exploración, consiste en simples observaciones visuales con ayuda de una lupa, hasta observaciones más avanzado mediante un microscopio óptico, desarrollado dentro de la misma faena (en sala de microscopia) por especialista en petrografía y microscopia.

Al utilizar el microscopio óptico se magnifican las imágenes observadas hasta 1.000 veces. Los minerales son identificados por las principales propiedades ópticas como: color, pleocroísmo, anisotropía entre otras. Las características mas importantes para un depósito de cobre corresponden a: distribución de tamaño de los granos, tipo de minerales huésped y ganga, asociaciones minerales, alteraciones minerales y texturas.

Todos estos rasgos pueden ser fotografiados a través del microscopio, lo que permite preservar un registro de cada una de estas características, que serán utilizadas para establecer los procesos de extracción de cobre más adecuada.

Dentro de los estudios de composición mineral existen pruebas más sofisticadas, de las cuales la Compañía utiliza difracción de rayos X, que es una técnica de gran importancia, ya que permite identificar los minerales por sus estructuras cristalinas, ayuda a la identificación de minerales que parecen similares bajo microscopio, especialmente minerales de grano muy fino tales como arcillas.

La caracterización de arcillas se desarrolla a partir de una muestra de 1 kg realizando una serie de etapas de cuarteo para obtener una muestra de 250 gr se pulveriza y se preparar la muestra para el difractómetro.

#### 4.7.2 Pruebas de reducción de tamaño de partículas

El propósito de lograr mediante procesos mecánicos la reducción de tamaño de grano de una muestra de material desde su tamaño en estado natural hasta un tamaño que permita realizar trabajos de análisis químicos y trabajos de planta. Las muestras son recolectadas por geólogos de exploración, estas presentan un tamaño variado por lo que es necesario obtener un tamaño uniforme. Se realizan análisis granulométricos como técnicas de chancado para disminuir el tamaño de las partículas, además de clasificación, cuarteo, pulverizado y homogenizado para análisis químicos para determinar leyes minerales de CuT y CuS.

El método más sencillo de disminución de tamaño de material se realiza por medio de una serie de mallas de distintos anchos de entramado actuando como filtros de los granos, conocida como columna de tamices. Hay que tener en cuenta que este método no presenta como resultado el tamaño de partícula de un material, simplemente la distribución de tamaño de grano en estado natural, es decir, la muestra en estado natural mediante vibración que obliga a pasar a través de las aberturas que presentan las mallas a partículas de menor tamaño.

#### 4.7.3 Determinación del índice de trabajo

La energía es uno de los insumos de mayor relevancia en los costos de una planta en procesamiento de minerales, por lo que todo esfuerzo en optimizar los consumos energéticos tendrá un beneficio directo en los costos de operación. Es muy importante conocer el índice de trabajo ya que nos indica la dureza de acuerdo a la escala de Mohs, para optimizar el consumo de energía.

Consiste en pruebas llevadas a cabo en un molino de trituración a pequeña escala, el cual mide la energía necesaria para realizar una reducción de tamaño estándar. Es una medida de la dureza del mineral desde el punto de vista de la molienda. La prueba se ejecuta con muestras de 1 kilogramo de mineral en un molino normal (10 cm de diámetro por 30 cm de largo), y mide el tiempo (en minutos) que se tarda en moler una muestra en la que el 80% pasa el corte de los 12,5 milímetros a una en la que el 80% pasa el corte de los 1,70 milímetros.

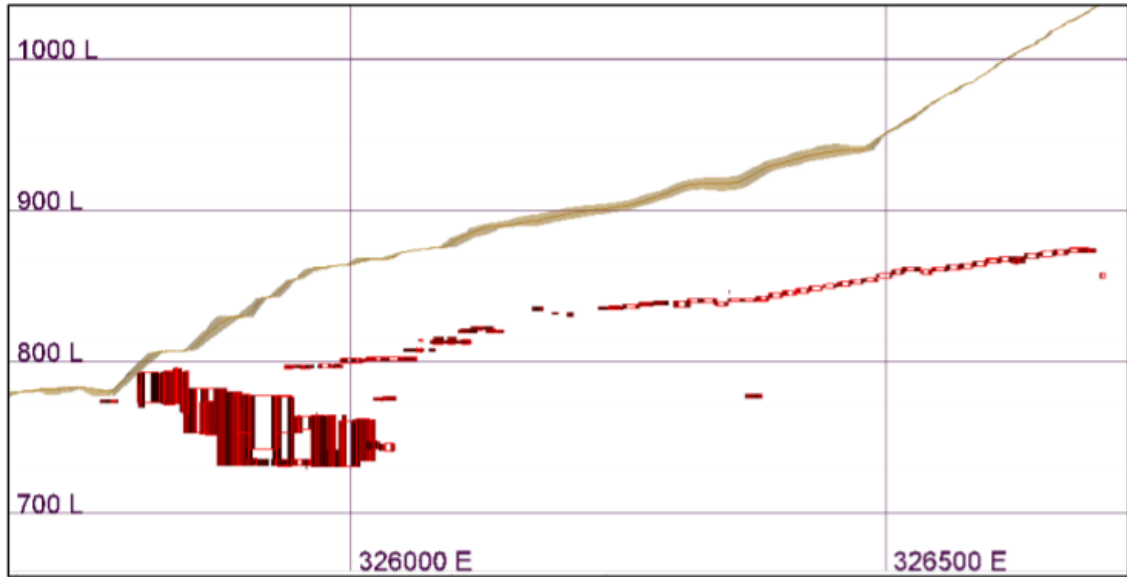
#### 4.7.4 Ensayos de consumo de ácido y extracción de cobre

En la actualidad el ácido sulfúrico representa un problema debido a que el consumo de ácido programado en planta se basa principalmente en la experiencia adquirida en años de pruebas hechas a escala piloto y por el mecanismo de prueba y error, y en general, se utiliza una gran cantidad de ácido de tal forma que se obtiene un exceso respecto del requerimiento óptimo.

Mediante una muestra pulverizada con ácido sulfúrico durante un tiempo de 30 a 60 minutos se obtiene una pulpa, la cual es filtrada obteniéndose un volumen de solución adquiriendo sus características.

### 4.8 PROCESOS PRODUCTIVOS

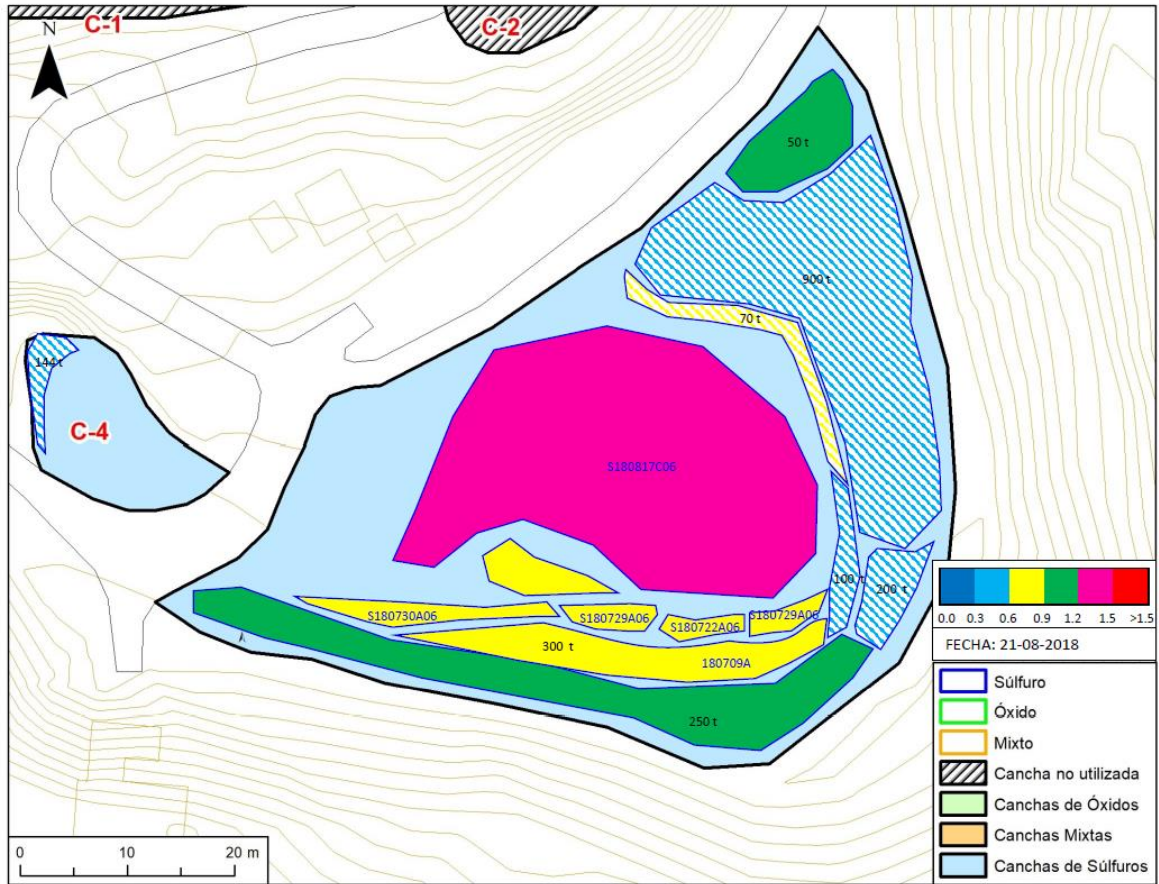
Cerro Negro extrae mineral desde principios del siglo pasado, en sus inicios mediante labores subterráneos, utilizando el método *room and pillar*, el cual consiste en explotar el cuerpo mineralizado a través de cámaras separadas por medio de pilares siguiendo el manto mineralizado. Actualmente opera bajo la metodología de explotación a rajo abierto, con una producción de 50.000 toneladas mensuales entre minerales sulfurados y oxidados. La capacidad de movimiento promedio de roca es de 350.000 toneladas mensuales realizados con excavadora y camiones. La figura 11 muestra una sección tipo dentro del área mina Cerro Negro, en color rojo se observan las galerías subterráneas explotadas antes del cambio en el método de extracción a rajo abierto. En color pardo, se observa la actual topografía.



**Figura 11:** Sección manto mineralizado explotado. Entregado por Cerro Negro.

El proceso productivo se inicia con la perforación de un taladro llamado DTH (*Down the hole*) de mallas en estéril y mineral. Una vez tronado el material, se remueve mediante camiones apoyados con excavadoras. El mineral es acopiado en el sector stock del rajo o también conocidas como canchas de acopio (Fig.12) y el estéril enviado a botadero. Dentro de Cerro Negro existen diferentes canchas de acopio de mineral; seis de sulfuros, dos de óxidos, una mixta y dos que no se utilizan actualmente. El transporte final desde la mina a las plantas se realiza con camiones convencionales.





**Figura 12:** Ilustración de uno de los sectores stock del rajo o también llamado cancha de acopio. Entregado por Cerro Negro.

Cabe recalcar que Cerro Negro posee dos plantas, una de sulfuros y otra de óxidos. La producción propia es de 20.000 toneladas mensuales de sulfuros y 50.000 toneladas mensuales de minerales oxidados de cobre. Se obtienen alrededor de 270 toneladas de cobre fino mensual en la planta de sulfuros y alrededor de 210 toneladas de cobre fino en la planta de óxidos, en esta también se elaboran 240 toneladas mensuales de cátodos los cuales son vendidos a ENAMI igualmente el concentrado que fluctúa entre 15-20% de cobre, ya que esta faena no posee sistema de fundición (Cerro Negro. S.A, 2018).

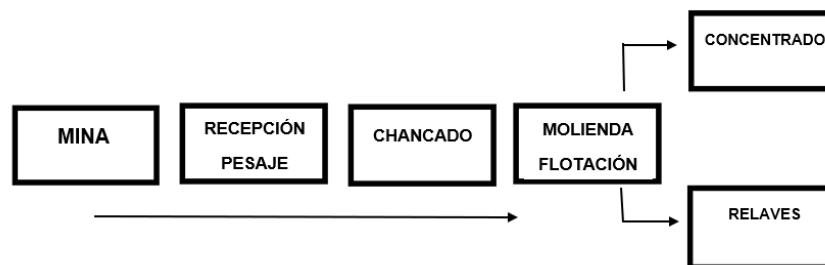
Hay que considerar también la lixiviación secundaria de rípios que genera una producción adicional de 120 toneladas mensuales de sulfato de cobre pentahidratado. La mineralización se estima en aproximadamente 9 millones de toneladas con una ley de 1.5 a 2% de Cu (Cerro Negro. S.A, 2018).



#### 4.8.1 Planta de Sulfuros

El proceso industrial (Fig.13) se inicia con la recepción y pesaje del mineral en las canchas de acopio, para luego reducirlos de tamaño mediante chancado, quedando un tamaño final de  $100\% < \frac{3}{8}$ . La capacidad instalada de chancado es de 80.000 toneladas mensuales. Los parámetros requeridos en la concentradora son; la ley mínima de cobre en soluble (CuS) que se puede procesar es de 0.60% y como ley máxima 1.10%, además de ley de cobre total (CuT) de 1.03%.

El mineral sulfurado chancado es almacenado en cuatro silos con capacidad de 320 toneladas, para luego ser procesado mediante molienda, esta entrega una pulpa con 38% de sólidos y tamaño 65-72% bajo la malla Tyler #200, esto equivale a un producto con p80 (tamaño de tamiz que deja pasar 80% de las partículas del producto) de 100 a 130 micrones, la cual es enviada a la etapa de flotación, aquí es preparada con reactivos y luego flotada en celdas de flotación wencos de 500 y 1.000 pies cúbicos, obteniendo un concentrado final de 18-25% Cu. El concentrado obtenido es pesado, filtrado y acopiado en la cancha de embarque para su despacho final.



**Figura 13:** Esquema de proceso industrial correspondiente a planta de sulfuros. Elaboración propia.

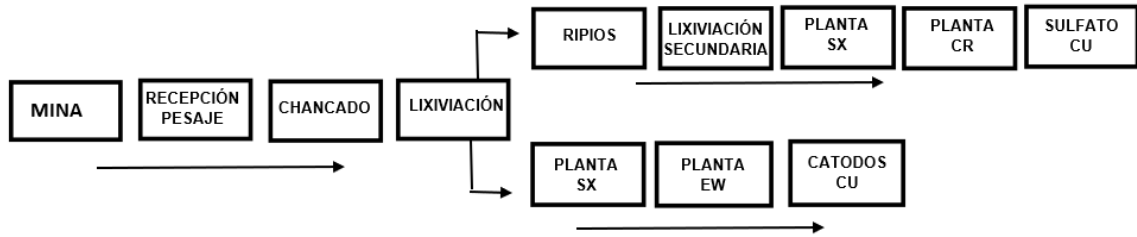
#### 4.8.2 Planta de Óxidos

Los parámetros requeridos en la planta de óxidos para mantener el proceso controlado son de una ley mínima de 0.7% CuS y ley máxima 1.30% CuS. El proceso de esta planta (Fig.14) se inicia aprovechando el chancado de la planta de sulfuros, luego el mineral es acumulado en el stock de óxidos para ser cargado y transportado hasta el sector de aglomerado, aquí se le agrega ácido sulfúrico en una concentración de 47

kilogramos/toneladas de mineral, para facilitar las reacciones químicas durante la lixiviación y así juntar las partículas más finas de cobre. El mineral aglomerado es cargado en pilas de altura entre 1.8 a 2.2 metros, dando inicio a la etapa de lixiviación (LX) mediante el riego con refino proveniente de la planta de extracción por solvente (SX), básicamente, consiste en recuperar los metales presentes en la roca mineralizada mediante la aplicación de agua y ácido sulfúrico, produciendo una solución de sulfato de cobre que es recolectada, refinada y concentrada para su posterior tratamiento. Las pilas son regadas por espacio de 60-90 días hasta que el 70-75% del cobre soluble contenido ha sido extraído.

La solución rica de lixiviación, la que contiene el cobre recuperado, es recolectada por canales y acumulada en piscinas de decantación. Esta solución es bombeada a la planta SX, donde una solución con contenido de cobre es contactada con un reactivo orgánico (extractante + diluyente), el cual es capaz de extraer cobre contenido en forma selectiva, dependiendo del grado de acidez de la solución, esto se realiza en equipos mezcladores-decantadores revestidos con fibra de vidrio. La solución con alta concentración de cobre (electrolito) es enviada a la planta de electroobtención (EW) y la solución de refino con alta concentración de ácido es bombeada a la planta de lixiviación. Las pilas pobres luego de ser lixiviadas son cargadas y transportadas al botadero de rios de la planta.

La solución rica de lixiviado proveniente de la planta de lixiviación también es bombeada a la planta SX con un flujo de entrada de 3.500 litros/minutos, correspondiente al circuito EW, aquí se disponen celdas electrolíticas cargadas con láminas iniciales de cobre, las cuales son delgadas planchas de cobre dispuestas en forma paralela con ánodos de plomo. Se crea una diferencia de potencial en la celda, haciendo pasar un flujo de corriente continua en un solo sentido generado por un rectificador de 15 kiloampere y 50 volts. Producto de la corriente generada, los iones de cobre libres en el electrolito migran hacia los cátodos obteniendo al cabo de 7 días de ciclo, cátodos de cobre de 60 kilogramos y 99.998% de ley.



**Figura 14:** Esquema de proceso industrial correspondiente a planta de óxidos. Elaboración propia.

#### 4.8.3 Insumos críticos

Los insumos críticos son aquellos cuya situación de abastecimiento podría ser crucial para un proyecto, son relevantes dentro de la estructura de costos de una operación minera y, por lo tanto, su comercialización genera importantes ingresos para las empresas que los proveen (Cochilco,2017). Los insumos de alto impacto en el yacimiento Cerro Negro son energía eléctrica, agua, ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y capital humano (Tabla 2).

La energía eléctrica es de uso intensivo requerida en los diversos procesos productivos. En la planta de óxidos el consumo de energía desde el proceso de chancado hasta electroobtención es de 1.150.629 KWh (kilowatt-hora) considerando que el consumo por cada tonelada de cobre fino producido es de 4.261 KWh/ton y 46 KWh/ton mineral.

Los diferentes procesos de la faena, como plantas de sulfuros, óxidos y otros anexos a la operación de estas, como riego de caminos, compromisos de reforestación, agua potable y control de polvo en la zona de chancado, requieren agua, esta alcanza 47.36 lts/s (litro por segundo), y se obtiene de un sistema de suministro propio y de aguas alumbradas que son aquellas que se descubren en el proceso de perforación o de cualquier tarea minera análoga, cuyo aporte aproximado es de 5 lts/s. Además, hay que considerar la captación e impulsión desde pozos profundos situados aguas abajo de la planta, a través de 12 pozos de extracción, para los cuales se cuenta con los derechos de aprovechamiento del agua. Adicionalmente la faena tiene derechos de agua superficial que alcanzan un caudal de 50.9 lts/s.

Toda el agua de la faena es recirculada, nada se pierde No obstante se está realizando un plan de aumentar la reutilización del agua industrial desde un 35% a un 50%, aumentando las eficiencias en los mecanismos de recuperación de agua, especialmente en la planta de sulfuros.

Otro de los insumos críticos es el ácido sulfúrico, Chile mantiene un alto nivel de consumo, gracias a su empleo en la lixiviación de cobre, el año 2016 alcanzo 9.06 millones de toneladas, el que continúa subiendo (Cochilco,2016). En Cerro Negro el consumo de esta molécula está en los 6 kg H+/kg Cu, esto significa 6 kilogramos de ácido por kilogramo de cobre producido, lo cual es equivalente a 47 kilogramos de ácido por tonelada de mineral (47 kg H+/ton-min).

Finalmente, en la minería actual, no solo basta con saber la tasa de productividad, sino que también los trabajadores deben estar capacitados para sobrellevar las exigencias de lidiar con los sistemas de turnos. En el yacimiento CN, se busca que los trabajadores posean un conjunto de capacidades técnicas y habilidades interpersonales que les permitan llevar a cabo de mejor manera su labor diaria, pudiendo contar con la asesoría de diversas consultoras. La empresa pretende ser líder en la protección e integridad de sus trabajadores, generando un ambiente laboral seguro y comfortable.

Tabla 2: Insumos de alto impacto en el yacimiento Cerro Negro.

Insumo	Planta Sulfuros	Planta Óxidos	Cerro Negro general
Energía	-	1.150.629 kwh	
Agua	No especifica	No especifica	47.36 lts/s
Ácido sulfúrico	No aplica	6 kgH+/kgCu	6 kgH+/kgCu
Capital humano	Capacitación	Capacitación	Capacitación

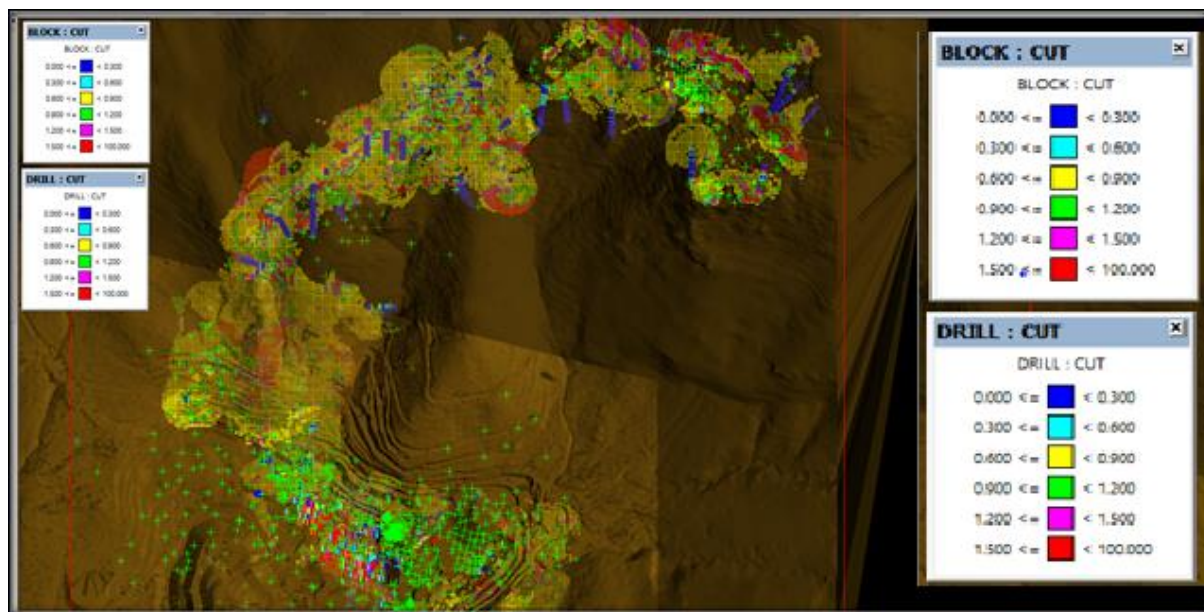
(Elaboración propia)

## 4.9 MODELO GEOMETALÚRGICO

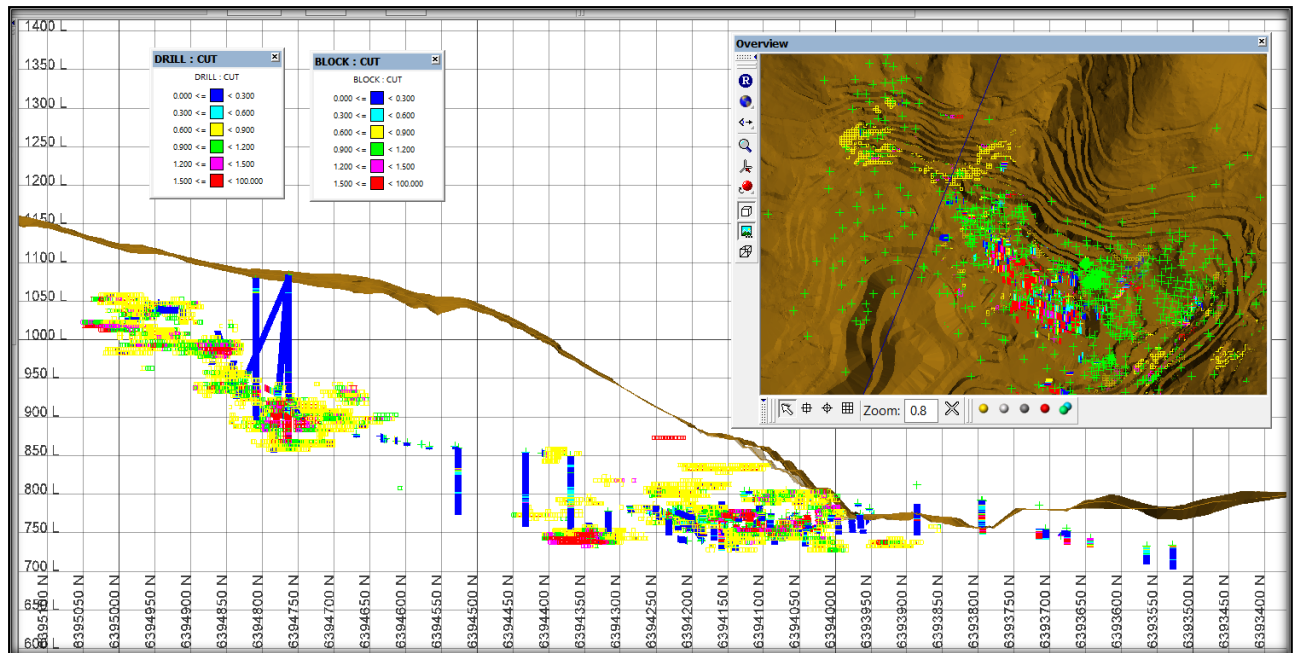
Dicho anteriormente, un modelo geológico es una representación tridimensional de un volumen rocoso donde se presentan diferentes características geológicas, por ejemplo, litología, estructuras, mineralización, alteración, entre otras. Su construcción es compleja puesto que, con datos en su mayoría de sondajes, deben formarse modelos de las estructuras y mineralizaciones presentes en el depósito. De la misma manera, a

medida que se avanza en el estudio del yacimiento, aumenta la información disponible ya sea por mayor disponibilidad de sondajes o pozos de tronadura que permiten aumentar el nivel de información e ir corrigiendo y validando el modelo, y como consecuencia, generar un mejor modelo geológico. Parte del producto final del modelo es el desarrollo de un modelo de bloques (Fig.16) que consiste en un arreglo de “n” volúmenes idénticos (en general cubos) distribuidos en el espacio, siendo el volumen completo la representación global del yacimiento. Cada cubo que conforma el modelo contiene información característica de dicho volumen, y de la porción de yacimiento que representa, atributos tales como densidad o ley de algún elemento, calidad geotécnica, etc.

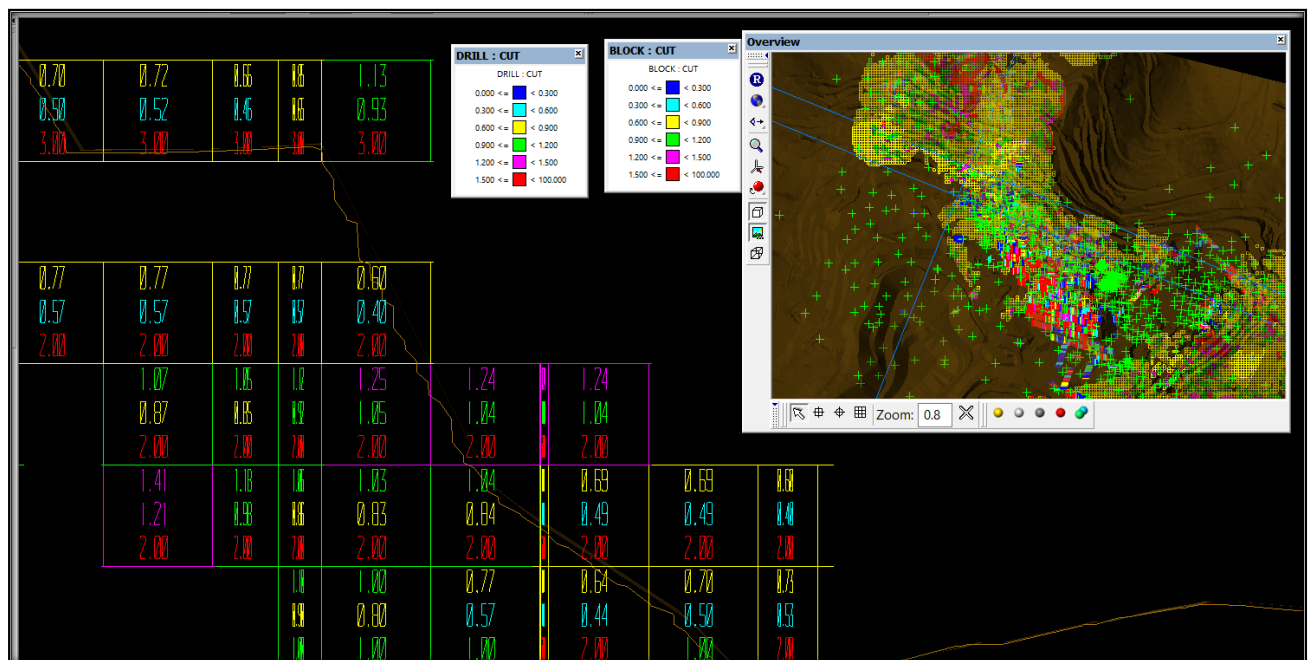
Para la realización del modelo se utiliza el software Vulcan 10, donde se muestra toda la información de Cerro Negro que se fue armando a medida que fue avanzando el proyecto, se han unido todas las bases de datos de todas las campañas de sondajes realizadas hasta marzo del año 2018, para así tener una visualización más clara de lo que se tiene (Fig.14,15).



**Figura 15:** Modelo representando yacimiento Cerro Negro. Se muestra leyenda correspondiente a bloques y sondajes



**Figura 16:** Sección transversal en vista SW-NE del modelo. Los sondajes que están sobre la topografía quieren decir que actualmente ese material del cerro fue extraído, los colores azules son material estéril mientras que hacia el color rojo son minerales de alta ley (como indica la leyenda).



**Figura 17:** Modelo de bloques del yacimiento Cerro Negro. Cada bloque contiene tres valores; primer valor corresponde a ley cobre total (CuT), segundo valor a ley cobre en soluble (CuS) y el tercer valor se le asigna a la categorización donde 1 es medido, 2 indicado y 3 inferido.

## 5.0 ACTIVIDADES Y TRABAJOS

Las labores realizadas años atrás, en los inicios de la faena corresponden a las actividades desarrolladas en las etapas de exploración, perfil, prefactibilidad y factibilidad, dentro de las cuales se realizaron estudios geofísicos TEM (sondeo electromagnético transitorio) efectuados por las empresas Geodatos S.A.I.C. y Subterra Geofísica E.I.R.L (consultoras geofísicas que actualmente continúan trabajando en el yacimiento).

Cerro Negro al cambiar varias veces de dueños y trabajadores, sin dejar de lado el tiempo que estuvo cerrada, gran parte de la información se acumuló en bodegas o simplemente se perdió (continuando hoy en día, mapas y metros de testigos abandonados en bodegas), por ende, durante los últimos años han ido recolectando la mayor cantidad posible de información y plasmándola en el modelo geológico actual, además de ir actualizándolo enfocándose también en temas operacionales que se van realizando como producción.

Los diferentes trabajos realizados actualmente están enfocados principalmente en la etapa de exploración en búsqueda de óxidos, ya que la faena esta crítica en esta área, quedando como máximo 5 años, también sin dejar de considerar la complementación de información en la faena. Estos trabajos se basan en tres grandes metodologías:

### 5.0.1 Reconocimiento inicial

Se realiza un reconocimiento en áreas cercanas a la faena, identificando minerales en superficie con el objetivo de lograr descubrir zonas con potencial de óxidos. Actualmente se está cotizando el uso de una nueva tecnología, un equipo similar al Drone el cual sirve para identificar levantamientos topográficos y cambios litológicos.

### 5.0.2 Campaña de terreno

Consta de días de terreno recorriendo la zona en camioneta y a pie, realizando un mapeo geológico y estructural del área del actual rajo, con el objetivo de complementar la información de la geología, registrando en un cuaderno de campo los distintos tipos litológicos, alteraciones y direcciones de estructuras y estratificación. Lo mismo se realiza en áreas cercanas a la faena principalmente con el objetivo de la exploración de óxidos.

También durante el terreno se define a donde se mandará el material, a que cancha de acopio, el mineral enviado se identifica con códigos y se rotula con la respectiva cancha.

### 5.0.3 Trabajo en gabinete

Se analiza la información obtenida realizando las siguientes actividades para identificar, definir y complementar la ubicación espacial de las litologías, estructuras presentes en la zona:

- Análisis de muestras mediante diferentes pruebas metalúrgicas.
- Actualización de mapa geológico distrital modificados de Elgueta 1990 obtenidos desde la biblioteca de servicio nacional de geología y minería
- Construcción y digitalización de perfiles geológicos nuevos a partir del mapa geológico actualizado.
- Actualización del mapa geológico del rajo a partir de la nueva información recopilada de reconocimiento de terreno y el modelo litológico y estructural.
- Actualización y validación en tiempo real del modelo geometalúrgico.

Día a día se planifica el mes de acuerdo al modelo corregido y actualizado. En las canchas de acopio se caracteriza el mineral y sus leyes, la labor es asegurar la ley que exigen en el plan de negocio. Una vez que ya se tiene la categorización el mineral se deriva a la planta. Se controla todo el camino del mineral, tomando leyes en tres ocasiones, ley in situ conocida como ley extraída, ley en cancha y finalmente la ley del proceso.



## Capítulo 5

# DISCUSIÓN

## 5.1 VALIDACIÓN DE CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA

En general, la validación y revisión de la información es una actividad que se desarrolla en forma permanente en todas las etapas, antes y después de su ingreso a los sistemas computacionales y respectivas bases de datos. La validación de la información recopilada no puede dejar de realizarse, es esencial una revisión exhaustiva de la consistencia de la información de: collares y trayectorias de los sondajes, tramos desde hasta en las unidades geológicas y leyes, razón CuS/CuT mayor que uno, muestras con coordenadas idénticas deben ser detectadas y corregidas, entre otras.

Las pruebas metalúrgicas en el yacimiento Cerro Negro son efectuadas en forma simultánea en la fase de exploración, de manera que la caracterización de cada muestra incluya también aspectos como: flotabilidad del mineral, rendimiento a la disolución con solventes, consumo de reactivos de proceso, etc. Estas pruebas se realizan de manera anticipada a fin de prever contingencias ante posibles fluctuaciones del precio del metal y anticipar el comportamiento metalúrgico del mineral.

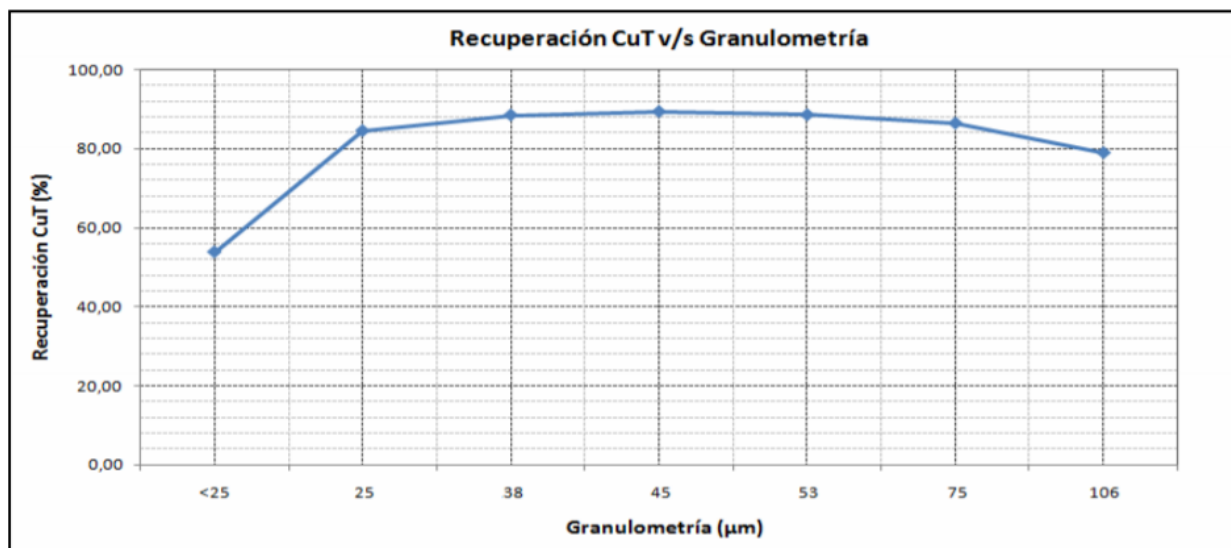
A partir de las unidades geológicas de la faena es importante notar las diferencias que existen en la granulometría de las distintas litologías. La denominada Brecha Diablo y las lutitas tienen alto contenido de sílice que presenta una dureza sobre 6 en la escala de Mohs, sin embargo, las muestras de brecha son más grandes que las muestras de lutitas, por lo que al momento de realizar la mecánica de chancado las muestras de brecha tienen que pasar más de una vez por el chancador.

El efecto tiempo es claro, pues a mayor tiempo de chancado se generan productos de granulometría más fina. Cuando existen partículas de mayor tamaño hay una alta probabilidad de encontrar microestructuras o planos de debilidad que favorezcan la rápida disminución del tamaño granulométrico. Por ende, es de suponer que a cortos tiempos de chancado la textura geológica podría tener un rol importante, pues el tamaño y disposición de los granos, junto con la microestructura que generan debilidad podrían

ser tal que la granulometría baje rápidamente con leves cantidades de energía aplicada. Esto no puede ser asegurado cuando el mineral ha alcanzado granulometrías más finas, ya que las características se pierden.

Hay que considerar la alteración de los minerales que también influye, el efecto de las arcillas, por ejemplo, en la lixiviación produce problemas de percolación y mayor consumo de ácido, y en la flotación provoca problemas de selectividad, de modo que el tamaño de las partículas afecta los procesos físicos de impacto, adhesión y separación entre las partículas y las burbujas. De esta manera la granulometría es una variable sobre la cual se debe poner más énfasis en su control, debido a su efecto en la recuperación metalúrgica y en la selectividad del concentrado final.

A continuación, en el siguiente gráfico se muestra la recuperación respecto a la granulometría en forma global. Se observa que hay una tendencia a obtener una mayor recuperación de partículas de cobre con tamaños entre 38 $\mu$ m y 68 $\mu$ m, representando alrededor del 89% de recuperación, lo que está dentro de los parámetros requeridos en Cerro Negro. La recuperación de cobre con tamaños entre 68 $\mu$ m y 106 $\mu$ m y entre 25 $\mu$ m y 38 $\mu$ m, es un poco menor, esto puede deberse a que a medida que aumenta la agitación, los agregados de burbujas-partículas más finos se vuelven inestables (Valdebenito, 2011).



**Figura 18:** Recuperación de cobre con respecto a la granulometría (Valdebenito, 2011).

Es vital validar el modelo geometalúrgico, ya que es una parte importante de la cadena que conlleva a la toma de decisiones del yacimiento. El modelo, incluyendo información topográfica, diversos mapeos realizados, litología, mineralización, alteraciones, sondajes y base de datos, requiere controles de aseguramiento y calidad (QA/QC) que repercutirán en la confianza que se tenga de los datos geológicos y por tanto influirá en las decisiones.

Dentro del modelo hay que considerar el cálculo de reservas que es una operación que se efectúa en todas las etapas de la vida de una propiedad minera desde su descubrimiento hasta las fases finales de la mina. Es uno de los elementos fundamentales de la evaluación y no tiene sustituto. La eficiencia en la extracción y productividad de una mina son imposibles de alcanzar sin un conocimiento preciso de las reservas. Cabe destacar que los recursos y reservas tienen que ser validados por personas competentes y calificadas por la comisión minera.

La revisión del modelo se hace en base a la visualización y ploteo de secciones y plantas de las leyes estimadas de bloques, la unidad geológica y leyes de sondajes, estadísticas por unidad geológica, construcción de curvas tonelaje/ley y comparación con modelos anteriores.

Es importante ampliar el término calidad aplicándolo a toda la cadena de muestreo, ya que no basta con garantizar los resultados de las pruebas, sino que también se debe garantizar el origen y la calidad de la muestra mineral obtenida para que el control sea eficaz y eficiente.

El modelo geometalúrgico, las reservas y los procesos metalúrgicos deben ser validados a lo largo de cada fase desde la exploración hasta la factibilidad.

## **5.2 EL MERCADO EN LA VALORIZACIÓN**

Es fundamental conocer la estimación del precio de los metales que se buscarán. Esto incide fuertemente en el precio de la acción de la empresa. Asimismo, la fortaleza y perspectivas de la moneda del país donde se explora también es una variable a considerar para evitar el riesgo de una devaluación, afectando el valor de los activos de la compañía.

En Chile la minería tiene una importante presencia en la actividad económica del país. El año 2017 la participación de la minería en el PIB (producto interno bruto) alcanzó un 11%, y en ella la participación del cobre fue un 9%. El país, como mayor productor y exportador de cobre en el mundo, produjo 5,50 millones de toneladas métricas durante el año, lo que equivale al 27.9% de la producción mundial, además de ocupar el primer lugar en el ranking mundial (Consejo Minero, 2017).

El beneficio para Chile y el atractivo para la inversión minera depende de la diferencia entre el precio del cobre y sus costos de producción. Chile no controla el precio del cobre ni la ley de su mineral, pero sí puede controlar su productividad y así sus costos.

El precio del cobre es una variable desconocida por ende causa incertidumbre en la mayoría de los grandes negocios mineros, sin embargo, en la faena Cerro Negro el estudio de la demanda de cobre carece de importancia debido a que ENAMI en la práctica tiene el poder comprador ilimitado para la mediana minería.

### **5.3 RELACIÓN FASES, INCERTIDUMBRES Y VALORIZACIÓN**

Las propiedades mineras pueden ser compradas y vendidas sobre la base de su potencial percibido para la existencia y el descubrimiento de un yacimiento mineral viable, cuyo valor dependerá de dicho potencial. El potencial se va formando desde las primeras etapas y se caracteriza por sus atributos geológicos, mineralización asociada a una recuperación, resultados de exploración, entre otras.

Las etapas iniciales son las responsables de generar la dirección para obtener el mejor resultado económico, transformando los recursos en una promesa de producción y en la estrategia productiva que lleva a maximizar el valor del negocio para la compañía. Estas fases se caracterizan por el predominio de las actividades geocientíficas ya sea geología, geoquímica, geofísica, entre otras. La primera actividad geocientífica del desarrollo minero, la exploración, además de ser parte de la base del proyecto, es un proceso que opera en dos fases (exploración básica y avanzada), donde cada una está diseñada para llegar al siguiente punto de decisión en el cual se decide si continuar o no la exploración en una propiedad, basándose en los resultados de la etapa anterior. Esta actividad es esencial en la vida de las empresas, deberán estar permanentemente ligadas al tema de la búsqueda y delineamiento de nuevos yacimientos que reemplacen a los

que ya están en producción o aumenten el volumen de los actuales, por lo general buscando en sectores vecinos. Las compañías deberán estar constantemente explorando de manera de garantizar su continuidad, potenciar sus operaciones y esforzarse en su crecimiento, tal y como lo está realizando la faena en estudio.

Las tres fases que le siguen a la exploración son las etapas que completan la base del proyecto minero (Fig.19), estos estudios definen si se debe continuar o no con el proyecto. Algunos de los puntos de mayor importancia de estos estudios son la definición de reservas, recuperación metalúrgica, tasa de producción, modelos, pruebas, validaciones y precio futuro del elemento de interés. Toda la información recopilada en estas etapas y que se transmite de fase a fase, es fundamental a futuro ya que permite estimar el comportamiento del medio en el que se va a trabajar, así como el posible rendimiento económico del mineral. La información debe ser clara, específica y anunciada por un profesional del área geometalúrgica calificado como persona competente.

El objetivo final de las primeras etapas es descubrir, desarrollar y consolidar una base minera de recursos y reservas, para los planes mineros asegurando la continuidad del negocio.

Dentro de las etapas iniciales siempre hay que considerar, ya que es fundamental, tener un modelo de recursos geológicos y algunos parámetros claves para realizar la valorización económica del yacimiento como son: precio, tipo de mineral, recuperaciones, etc. El modelo es consecuencia de los factores geometalúrgicos que incluyen la interpretación, análisis, evaluación y validación de todos los aspectos que respaldan los resultados obtenidos en cada una de las actividades asociadas con la cadena del valor del negocio minero de acuerdo a como progresa la información a través de las fases de conversión de recursos y reservas. El modelo debe presentar altos niveles de confianza para que los otros actores en la cadena de valor, como ingenieros de minas, ingenieros comerciales, ingenieros industriales, entre otros, integren los datos técnicos y se logre generar un plan de acción en beneficio del aumento del valor del activo. Este modelo debe sustentarse en pruebas metalúrgicas obtenidas de muestreos representativos con la intención de inferir características del área, por lo tanto, la calidad del modelo resulta fundamental para la ejecución de futuros planes mineros.

La obtención de muestras representativas, testigos de sondajes y la captura de información en las etapas iniciales deben ser muy bien almacenadas ya que será requerida la recuperación física de estas a futuro influyendo en la representatividad del modelo. La faena Cerro Negro presenta un gran modelo, bastante completo, pero, aun así, no han logrado recuperar el 100% de estudios realizados antiguamente.

La valorización de recursos y reservas está fuertemente asociada con los riesgos, no existe ningún proyecto que no tenga riesgos y sufra incertidumbres sin embargo, a medida que se avanza en el estudio del yacimiento, se adquieren nuevos conocimientos producto de la captura de nueva información geológica y la interpretación de esta información, lo que permite ir corrigiendo y validando los modelos para disminuir los riesgos e incertidumbres del negocio que le hacen perder competitividad, de manera que un activo minero ganara valor cuando se reduce el riesgo y se avanza en la certeza de las cualidades mineras, por ende la respuesta estratégica para una adecuada acotación de incertidumbres y riesgos es el desarrollo correcto de las fases de exploración, perfil, prefactibilidad y factibilidad, en la cuales la captura de información es secuencial, siendo una actividad constante e interactiva.

Dentro de las incertidumbres consideradas más importantes se encuentra la geológica ya que, por ejemplo, hay minerales en el que los granos mineralizados están mejor definidos que en otros o su textura es diferente. La liberación de los granos puede hacer que su recuperación sea muy fácil o mucho más difícil dependiendo de su granulometría causando más consumo de energía y mayores costos de explotación. Es vital que las compañías mineras realicen diversos análisis como granulometría, análisis químicos y litológicos en detalle, ya que, por ejemplo, los minerales oxidados de cobre con altos contenidos de carbonato incrementan el consumo de ácido y el costo del proceso por lo que, la cantidad de reservas disminuyen si se compara con un proyecto sin impactos de carbonato, en consecuencia, el valor del activo decrece. Por ende, se requieren minerales oxidados con bajos contenidos de carbonato para generar mezcla y consumir menor cantidad de ácido consiguiendo que el valor del activo aumente. Para llevar a cabo lo anterior es de gran importancia que las faenas tengan protocolos claros.

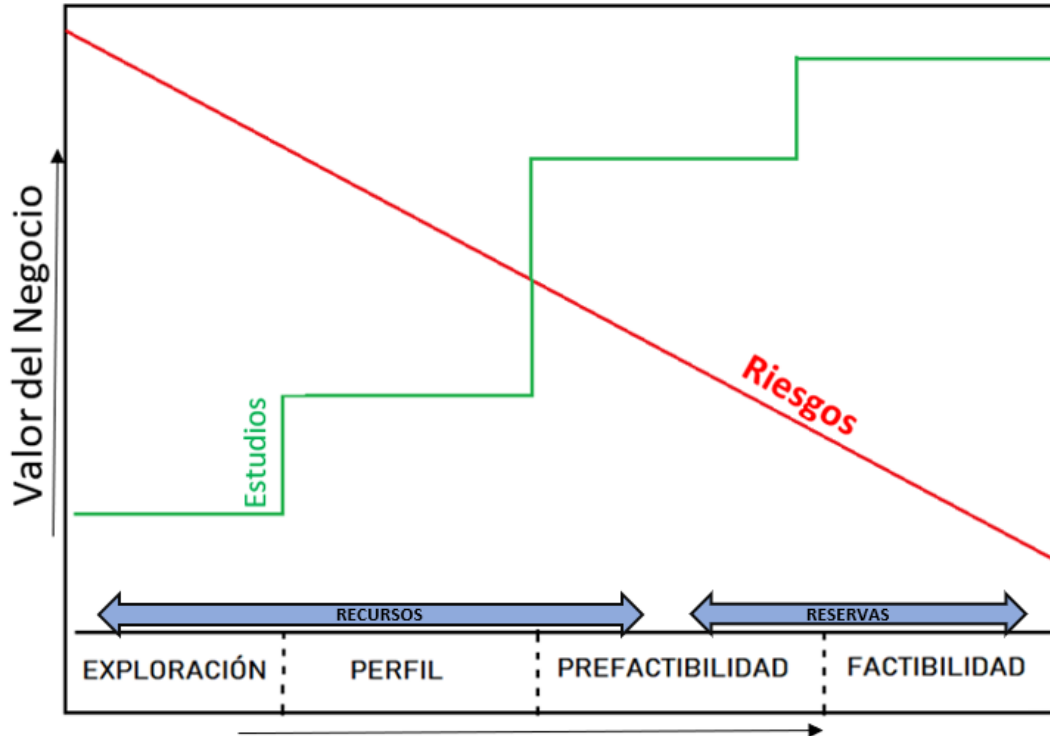
La concentradora del yacimiento Cerro Negro exige parámetros que debe cumplir el material al llegar a la planta, la cual también, debe adecuarse debido a los problemas

que presenta con materiales solubles y carbonosos como las lutitas, estas son ricas en carbón, presentan alto contenido de materia orgánica y de calcita, incrementando el consumo de ácido. También presenta dificultades con las brechas en el área de chancado, estas rocas tienen alta dureza lo que requiere mayor consumo de electricidad.

Al igual que el ácido y la electricidad, el capital humano es uno de los insumos críticos dentro de la estructura de una operación minera y es responsable del 79% de los riesgos dentro de la empresa. Para disminuir y controlar los riesgos es esencial cumplir con protocolos de seguridad además de participar en las diversas capacitaciones, charlas y asesorías que otorga la faena.

En cuanto a la ubicación y topografía del yacimiento, este tiene que estar en un lugar amplio con espacio suficiente para que el proyecto se desarrolle adecuadamente con sitios de canchas de acopio, plantas, botaderos, etc. Al no haber espacio físico para localizar, por ejemplo, las canchas de acopio de minerales marginales se pierden o son tratados como estériles. Esto implica una pérdida en las reservas, por lo que el valor del activo disminuirá.

Siempre hay y habrá incertidumbre geológica y se debe tener especial cuidado en minimizarla para valorizar activos adecuadamente. Es fundamental que desde un principio se hagan las claridades y precisiones de la información producto de los trabajos realizados en cada una de las etapas.



**Figura 19:** Fases de desarrollo de un proyecto minero de acuerdo a la información y sus riesgos (Modificado de Tulcanaza, 2011).

## 5.4 GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOCIENTÍFICA.

Las etapas del proceso productivo son comunes para cada proyecto minero, pero cada mina es distinta a otra, por lo que puede haber algunas modificaciones en sus etapas de tal manera de hacer más eficiente el proceso productivo y mejorar la forma de extraer el mineral de interés.

Se sabe que cada faena utiliza diferentes metodologías de trabajo ya que cada yacimiento es diferente, es decir, tiene su propia distribución espacial de leyes, patrón de correlación espacial, distribución estadística de leyes y, por supuesto, sus propios controles geológicos de la mineralización.

Las diferentes actividades y trabajos realizados actualmente en el yacimiento Cerro Negro están asociadas a las diferentes etapas de un proyecto minero. La fase de exploración se representa con la actividad de reconocimiento inicial, mientras que las actividades de campaña de terreno y trabajo en gabinete se vinculan a la etapa de desarrollo (fase perfil, prefactibilidad y factibilidad).



De igual manera, para evitar y disminuir riesgos e incertidumbres realizan planes de trabajo adecuados con un sistema de reportes diarios y copia de cada informe. Además de generar una base de datos digital con toda la información recopilada en las distintas fases, la cual se va actualizando constantemente conjunto al modelo del yacimiento.

En la tabla 3 se realiza un recuento de toda la información asociada a la geometalúrgia, relevante en esta investigación relacionada con las etapas de un proyecto minero.

Tabla 3: Recuento de información geometalúrgica.

Información	Relevancia	
Ubicación	Permite identificar necesidades relativas a la situación del proyecto, condiciones climáticas, logística, etc	EXPLORACIÓN
Topografía	Identifica la situación de la propiedad y del terreno superficialmente	
Geología Regional	Permite realizar un análisis de oportunidades y amenazas con respecto a las características del yacimiento	
Geología del yacimiento	Permite identificar las distintas litologías y estructuras del yacimiento. Es la base de la estimación de recursos minerales	
Historia	Permite establecer un contexto histórico del yacimiento.	
Sondajes	Permiten realizar un seguimiento a la inversión ya realizada y precisar la información con la que se cuenta	
Caracterización del mineral	Permite identificar el proceso adecuado para la producción del cobre e identifica riesgos asociados al mineral.	
Estimación de recursos minerales	Permite generar el modelo de estimación de reservas mineras	
Reservas mineras	Indica la producción total de cobre del yacimiento y permite establecer el periodo de operación	
Recuperación	Permite relacionar la producción de cobre con el del mineral extraído de la mina	
Ley de corte	Define proporción mínima de cobre sobre mineral	
Base de datos	Permite conocer las condiciones de almacenamiento de la información geológica	

(Elaboración propia)

## Capítulo 6

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el concepto de geometalúrgia se hace referencia a la geología y la metalurgia integradas para optimizar los proyectos mineros. Ambas especialidades tienen su punto de encuentro en el estudio de los minerales; el geólogo estudia y caracteriza los minerales para ubicarlos con la creencia de su utilidad económica; el metalurgista los vuelve a estudiar y caracterizar para procesarlos y concretar el beneficio económico esperado.

La minería puede visualizarse como un proceso de suministro por el cual los minerales se convierten desde recursos geológicos hasta productos vendibles, consecuentemente una existencia geológica de minerales que constituye el recurso, fluye a través de una serie de actividades del sector minero que involucran diversas etapas. Estas etapas son comunes para cada proyecto minero, pero es importante dejar claro que cada mina es distinta a otra, por lo que puede haber algunas modificaciones en sus etapas de tal manera de hacer más eficiente el proceso productivo y mejorar la forma de extraer el mineral de interés (distintos minerales y leyes, distintas condiciones de roca y geografía y distintas condiciones de entorno).

La información geometalúrgica tiene un rol importante en cada una de las etapas iniciales del desarrollo minero:

\*Fase de exploración se realizan un reconocimiento general y un levantamiento geológico identificando tipos de litologías y minerales, además de estudios geofísicos, análisis de imágenes satelitales, pruebas metalúrgicas a baja escala, como la lixiviación en botellas para determinar pH y temperatura.

\*Fase de perfil se determina la oportunidad para el desarrollo del proyecto, se estudia la composición de estructuras que contienen mineral. Es en esta fase donde tenemos recursos medidos, inferidos e indicados y posibles reservas. También se realizan las pruebas granulométricas para determinar el tamaño óptimo requerido en el proceso.

\*Fase de prefactibilidad se validan alteraciones, litologías y toda la información de etapas anteriores. Se realizan pruebas metalúrgicas a escala de pequeño laboratorio para determinar el tratamiento más adecuado para el mineral a extraer, se estiman reservas minerales y se escoge y analiza método de explotación.

\*Fase de factibilidad se determinan las reservas, la rentabilidad y se aprueba el método a explotar.

A medida que se avanza en las etapas la captura de información aumenta y como consecuencia disminuye la incertidumbre y se acota el riesgo, por lo que el activo minero va creando valor.

Hay que considerar el proceso al que está sometida la información y la calidad de los recursos que se tiene, sin dejar de lado la importancia del control y la calidad de la toma de muestras y diversas pruebas metalúrgicas ya que también le dan valor al negocio.

Hay que tener en cuenta las pérdidas por no asegurar los parámetros exigidos, ya que cualquier material por debajo de lo requerido, es decir, que no cumpla con lo obtenido en las pruebas metalúrgicas, será rechazado implicando pérdidas. A mayor tamaño exigible y mayor fragilidad del producto que se está tratando, mayores serán también las pérdidas. A modo de prevenir, la faena Cerro Negro realiza pruebas metalúrgicas de manera anticipada para determinar el comportamiento metalúrgico del mineral, de manera de optimizar y dimensionar el proceso para diseñar instalaciones y estimar costos.

Es fundamental tener un modelo de recursos geológicos, que se va creando desde la primera fase del desarrollo minero, y algunos parámetros claves para realizar la valorización del yacimiento como son: precio, tipo de mineral, recuperaciones, costos de mina y planta. El modelo se utiliza como guía para entender el impacto de los factores geometalúrgicos al determinar el valor.

Para lograr que el mineral sea comercializable se recurre a distintos métodos de beneficio de minerales, los cuales no solo dependen del tipo de mineral, sino que también del yacimiento, ya que cada yacimiento tiene características propias, por ejemplo, para el caso de Cerro Negro, que presenta minerales metálicos, es necesario concentrarlos, aprovechando técnicas como flotación, electroobtención, entre otras.

Los riesgos son inevitables, sin embargo, es importante notar elementos como disponibilidad de agua, energía eléctrica y ácido sulfúrico que son de uso intensivo y cuya situación de abastecimiento podría ser crucial para un proyecto.

Actualmente el yacimiento Cerro Negro se encuentra activo, explotando mineral, pero además efectuando exploración y labores de desarrollo, con el fin de asegurar la continuidad futura de la alimentación de planta.

Se recomienda a la Compañía Cerro Negro realizar convenios universitarios para recopilar y sistematizar toda la información abandonada en bodegas, de manera de aumentar la información de la faena y el valor de esta.

A modo de complemento en esta investigación se recomienda abordar temas de geomecánica, encaminados a definir geometrías de las excavaciones y estudios de impacto ambiental para evaluar la magnitud de las alteraciones que producen las actividades, ya que podrían llegar a ser gastos adicionales.

# REFERENCIAS

- Arévalo, C. (1992). Facies ambientes de depositación y paleogeografía del miembro Pitipeumo (Formación Las Chilcas) V Región. Memoria. de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- ASATCH (2017) Valorización de concesiones mineras de potenciales yacimientos. Ley Chile, Código de minería.
- Atlas de Faenas Mineras, Minas y Plantas de las Regiones V y Metropolitana, 2013. SERNAGEOMIN.
- Barton JR., P.B.(1993). "Problems and Opportunities for Mineral Deposits Models", en R. V. Kirkham, W. D. Sinclair, R. I. Thorpe y J. M. Duke, eds.: Mineral Deposit Modelling, GAC, Special Paper 40 :7-14.
- Biblioteca Congreso Nacional de Chile/BCN (2007). Ministerio de Minería. Ley n°20.235.
- Cochilco. (2007). Oportunidades de Negocios para Proveedores de Bienes, Insumos y Servicios Mineros en Chile. Obtenido de: [https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Analisis%20Mercado%20de%20los%20Insumos%20Cr%C3%ADticos%202017%20\(empresas\).pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Analisis%20Mercado%20de%20los%20Insumos%20Cr%C3%ADticos%202017%20(empresas).pdf)
- Cochilco (2016). Informe del mercado chileno del ácido sulfúrico.
- Codelco (2017). Recursos y reservas minerales. Memoria anual. Obtenido de: [https://www.codelco.com/memoria2017/site/artic/20180408/asocfile/20180408172438/mem\\_codelco\\_2017\\_recursos\\_y\\_reservas\\_minerales.pdf](https://www.codelco.com/memoria2017/site/artic/20180408/asocfile/20180408172438/mem_codelco_2017_recursos_y_reservas_minerales.pdf)
- Compañía Cerro Negro S.A, (2010). CERRO NEGRO. Sitio web: <http://www.cerronegro.cl/conocenos/conocenos.html>
- Compañía Minera Cerro Negro S.A (2018). Procesos productivos.
- Consejo minero (2017). Cifras actualizadas de la minería. Mercado mundial de minerales y participación de Chile. Santiago de Chile
- Corporación Nacional del Cobre de Chile (2010). Normas Corporativas Codelco NCC 31. Documento interno.
- Cox, D.P y Singer, D.A (EDS) (1986). Mineral deposit models. US. Geological Survey Bulletin 1693,379 p.
- CRIRSCO (2003). Committee for Mineral reserves international reporting standards. Obtenido de: <http://www.crirSCO.com/welcome.asp>
- Espinoza, W. (1969). Geología del distrito cuprífero de Cerro Negro. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 148 p.
- Ernst & Young. (2018). Metodologías de valorización de activos mineros y sensibilizaciones. Comisión calificadora de competencias en recursos y reservas mineras. Seminario 19 junio.Chile
- Farías, M. (2007). Tectónica y erosión en la evolución del relieve de Los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis de Doctorado, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- Gana, P., Wall, R., Gutiérrez, A. (1996). Geología del área Valparaíso-Curacaví: Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa geológico N°1 (escala 1:100.000). Santiago.
- Gonzales (2017). Principios de la Valorización de propiedades mineras. SRK consulting S.A. Santiago de Chile. Obtenido de: <file:///Downloads/1%20-%20Principios%20de%20Valorizaci%C3%B3n%20-%20JP%20Gonzalez%20-%20SRK.pdf>

Manríquez, F. (2015). "Evaluación de la incertidumbre geológica y operacional en planes mineros de corto plazo en faenas a cielo abierto". Tesis de Magíster en Minería. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

Maksaev, V.; Townley, B.; Palacios, C.; Camus, F. 2007. "Metallic ore deposits". En: Moreno, T.; Gibbons, W. (ed.). The Geology of Chile. London: The Geological Society. p. 179-199.

MINERIA CHILENA (2011). La importancia de la mediana minera. Obtenido de: <http://www.mch.cl/reportajes/la-importancia-de-la-mediana-mineria/>

Mun J. (2006). "Modelling risk, applying monte carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques". John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

McCallun, T. (2011). Valuation of a business, chartered general accountants.

Olca L. 1979. Geología, alteración hidrotermal y mineralización cuprífera del yacimiento estratiforme de Diablo Sur, Distrito Minero de Cerro Negro. Revista Comunicaciones, No. 27, p. 1-18.

Pérez, V.M. (1985). Estudio Geológico de los cuerpos intrusivos y su relación con la mineralización cuprífera del sector noreste del distrito minero de Cerro Negro, Quinta Región. Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, 110 p.

Ruiz, C.; Aguirre, L.; Corvalán, J.; Klohn, C.; Klohn, E.; Levi, B. (1965). Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, 305 p.

Rivano, S.; Sepulveda, P.; Boric, R.; Hervé, M.; Puig, A. (1986). Antecedentes radiométricos para una edad cretácica inferior de la Formación Las Chilcas. Revista Geológica de Chile, No. 27, p. 27-32.

Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Boric, R.; Espiñeira, D. (1993). Hojas Quillota y Portillo. V Región. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, No. 73. Escala 1:250.000.

Srivastava, R.M (2005). Probabilistic Modeling of ore lens geometry: An alternative to deterministic wireframes. Mathematical Geology Vo. 37.

Tulcanaza, J.E. (2011). Requerimientos técnicos para Negocios Mineros en bolsa. Comisión calificadora de competencias en recursos y reservas mineras. CRIRSCO. Chile.

Valdebenito F. (2011). Análisis de estrategia operacional en flotación columnar. Anglo American. Santiago de Chile.