



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



**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA GEOLOGÍA  
SOBRE LOS PARÁMETROS METALÚRGICOS BOND  
WORK INDEX Y RECUPERACIÓN ROUGHER, COMO  
APORTE A LA PLANIFICACIÓN EN EL YACIMIENTO  
LOS PELAMBRES, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE**



**Memoria para optar al Título de Geólogo**

**Sebastián Camilo Ignacio Echeverría Morales**

**Profesor Patrocinante:** Dr. Oscar Jerez Riveros

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

Dra. Ursula Kelm Schmidt

**Concepción, 2022**



# ÍNDICE

## RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.1.1 Objetivo general .....	1
1.1.2 Objetivos específicos.....	1
1.2 UBICACIÓN Y ACCESOS .....	1
1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	4
1.3.1 Etapa bibliográfica.....	4
1.3.2 Etapa de análisis e interpretación de datos .....	4
1.3.3 Etapa de Confección Informe Final.....	4
1.4 TRABAJOS ANTERIORES .....	5
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	7
2.1 GENERALIDADES.....	8
2.2 ROCAS ESTRATIFICADAS .....	8
2.2.1 Secuencias sedimentarias del Paleozoico superior.....	8
2.2.2 Grupo Choiyoi .....	8
2.2.3 Formación Rancho de Lata.....	9
2.2.4 Formación Viñita.....	9
2.2.5 Formación Salamanca .....	9
2.2.6 Estrato de Almendrillo.....	10
2.2.7 Formación Estero Cenicero .....	10
2.2.8 “Formación” Los Pelambres.....	11
2.2.9 Formación El Pachón .....	11
2.2.10 Estratos de Mondaca.....	12
2.2.11 Secuencia Volcánica Laguna del Pelado.....	12
2.2.12 Depósitos cuaternarios.....	13
2.3 ROCAS INTRUSIVAS .....	13

2.3.1 Batolito Pico Los Sapos.....	13
2.3.2 Granitoides del Campaniano-Maastrichtiano .....	14
2.3.3 Plutones Zapallar y Manque Bajo .....	14
2.3.4 Plutón Cuncumén .....	14
2.3.5 Complejo Intrusivo Chalinga .....	15
2.3.6 Stock Pelambres .....	15
2.3.7 Pórfidos El Pachón y Cerro Bayo del Cobre .....	16
3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO LOS PELAMBRES .....	17
3.1. GENERALIDADES .....	17
3.2. LITOLOGÍA.....	17
3.3. ALTERACIÓN.....	20
3.4. ZONA MINERAL.....	22
3.5. ESTRUCTURAS.....	23
4. CONTEXTO METALÚRGICO.....	26
4.1. GENERALIDADES .....	26
4.2. PROCESO DE CONCENTRACIÓN.....	28
4.2.1. Etapa de conminución .....	29
4.2.2. Etapa de flotación .....	31
4.3. GEOMETALURGIA.....	35
4.3.1. Bond <i>Work Index</i> .....	37
4.3.2. Recuperación <i>Rougher</i> .....	39
4.3.3. Variables mineralógicas que controlan la molienda.....	41
4.3.4. Variables mineralógicas que controlan la flotación .....	44
5. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS .....	47
5.1. GENERALIDADES .....	47
5.2. MEDIDAS DE CENTRALIZACIÓN.....	47
5.2.1. Media aritmética.....	47
5.2.2. Mediana .....	48
5.2.3. Moda.....	48



5.3. PARÁMETROS DE DISPERSIÓN.....	49
5.3.1. Varianza.....	49
5.3.2. Desviación estándar.....	50
5.3.3. Histograma.....	50
5.4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	51
5.4.1. Generalidades.....	51
5.4.2. Análisis de correlación simple.....	52
5.4.3. Análisis de correlación múltiple.....	53
5.4.4. Análisis de Boxplot.....	54
5.4.5. Loading Plot.....	55
5.4.6. Score Plot.....	58
6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	60
6.1. PRESENTACIÓN DE LOS DATOS.....	60
6.2 DATOS BOND <i>WORK INDEX</i> .....	64
6.3 DATOS RECUPERACIÓN ROUGHER.....	65
7. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES: BOND <i>WORK INDEX</i> .....	68
7.1. INFLUENCIA DE LA GEOLOGÍA.....	68
7.1.1. Litología.....	68
7.1.2. Alteración.....	70
7.1.3. Zona mineral.....	72
7.2. SCORE PLOT.....	73
7.3. LOADING PLOT.....	74
7.4. ANÁLISIS DE BOXPLOT: CONCENTRACIÓN DE CLORITA RESPECTO AL BOND <i>WORK INDEX</i> .....	76
7.4.1. Litología.....	76
7.4.3. Zona mineral.....	79
7.4.4. Continuidad espacial de la clorita respecto al Bond Work Index.....	81
8. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES: RECUPERACIÓN ROUGHER.....	83
8.1. INFLUENCIA DE LA GEOLOGÍA.....	83

8.1.1. Litología .....	83
8.1.2. Alteración .....	84
8.1.3. Zona mineral.....	85
8.2. SCORE PLOT .....	86
8.3. LOADING PLOT .....	87
8.4. ANÁLISIS DE BOXPLOT: CONCENTRACIÓN DE CLORITA .....	89
8.4.1. Litología .....	89
8.4.2. Alteración .....	91
8.4.3. Zona mineral.....	92
8.4.4. Continuidad espacial de la clorita respecto a la Recuperación Rougher .....	93
9. CONCLUSIONES.....	96

**REFERENCIAS**

**ANEXOS**



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1.1	Mapa de ubicación y acceso a Minera Los Pelambres, Región de Coquimbo, Chile.....	3
2.1	Mapa geológico regional del área de Los Pelambres. (a) Mapa geológico. (b) Perfil geológico p-p'. Mpodozis (2011).....	7
3.1	Vista en planta del modelo litológico de Minera Los Pelambres.....	19
3.2	Sección N-90.000 del modelo litológico de Minera Los Pelambres.....	20
3.3	Vista en planta del modelo de alteración de Minera Los Pelambres.....	21
3.4	Sección N-90.000 del modelo de alteración de Minera Los Pelambres.....	21
3.5	Esquematación de la sección N-90.000 del modelo de zonación mineral de Minera Los Pelambres. Modificado de Presentación Geología del yacimiento Los Pelambres (2016).....	23
3.6	Mapa geológico local de Minera Los Pelambres, destacando estructuras principales del yacimiento. (Perelló, 2012).....	25
4.1	Proceso productivo Minera Los Pelambres. (Extraído de Minera Los Pelambres).....	27
4.2	Diagrama de flujo del proceso de conminución.....	30

4.3	Flotación de un pórfido cuprífero enriquecido con Molibdeno.....	33
4.4	Representación esquemática del proceso de flotación (Vianna, 2004).....	34
4.5	Representación de continuidad espacial donde: a) escenario con baja continuidad. b) escenario con continuidad espacial irregular. c) escenario con alta continuidad espacial. (Fustos, 2017).....	35
4.6	Representación gráfica del concepto de recuperación metalúrgica. Las partículas cafés corresponden al mineral de interés, mientras que las verdes a la ganga. (Ruíz, 2017).....	40
4.7	Variación de la recuperación en función del tiempo. (Ruíz, 2017).....	40
4.8	Diagrama esquemático del mecanismo de blindaje de la clorita: a) Bolas del molino b) Paredes del molino (Zhao, 2016).....	42
4.9	Efecto del porcentaje de sólidos en los productos de molienda. (Kawatra, 2006).....	44
4.10	Ilustración del efecto slime coating. (Cortés, 2016).....	45
5.1	Visualización geométrica de la moda, mediana y media de una función arbitraria de densidad poblacional.....	49
5.2	Representación de los tipos de anomalías que ayudan a detectar los histogramas. (Peña, 2001).....	51
5.3	Ejemplo de Boxplot .....	55
5.4	Loading Plot. Correlación positiva entre V5 y V6 y V4 y V7. Extraído de González (2005).....	56



5.5	Loading Plot Correlación negativa entre V4 y V5 y V3 y V6. Sin correlación entre V5 y V6 y V3 y V4. Extraído de González (2005).....	57
5.6	Loading Plot Variables más determinantes. Extraído de González (2005).....	58
5.7	Score Plot Relación entre variables y componentes principales. Modificado de González (2005).....	59
6.1	Gráfico probabilístico de la variable BWI. Se muestra con una línea roja punteada en el límite de cada población de acuerdo con los rangos determinados. Los puntos azules representan cada una de las 1826 muestras.....	65
6.2	Gráfico probabilístico de la variable recuperación de cobre a 180 µm. Se muestra una línea roja punteada en el límite de cada población de acuerdo con los rangos determinados. Los puntos azules representan cada una de las 1819 muestras disponibles.....	66
7.1	Boxplot; Bond Work Index vs Litología. Minera Los Pelambres.....	70
7.2	Boxplot: Bond Work Index vs Alteración. Minera Los Pelambres.....	71
7.3	Boxplot: Bond Work Index vs Zona mineral. Minera Los Pelambres.....	73
7.4	Score Plot: Poblaciones de Bond Work Index.....	74
7.5	Loading Plot: Muestra la relación de las distintas mineralogías presentes en el yacimiento con las poblaciones de Bond Work Index previamente definidas.....	75

7.6	Boxplot: Concentración de clorita en función de las litologías que componen el yacimiento.....	77
7.7	Boxplot: Concentración de clorita en función de las alteraciones presentes en el yacimiento.....	79
7.8	Boxplot: Concentración de clorita en función de las zonas minerales establecidas en el yacimiento.....	80
7.9	Mapas geológicos de las zonas minerales (izquierda), litológico (centro) y de alteración (derecha) en el yacimiento Los Pelambres.....	81
7.10	Distribución espacial de los dominios de Bond Work Index (derecha) y concentración de clorita (izquierda) en el yacimiento Los Pelambres.....	82
8.1	Boxplot: Recuperación versus Litologías Minera Los Pelambres.....	84
8.2	Boxplot: Recuperación versus Alteraciones Minera Los Pelambres.....	85
8.3	Boxplot: Recuperación versus Zonas minerales Minera Los Pelambres.	86
8.4	Score Plot: Poblaciones de recuperación rougher.....	87
8.5	Loading Plot: Relación entre las distintas mineralogías y las poblaciones de recuperación previamente definidas.....	88
8.6	Boxplot: Concentración de clorita en función de las litologías que componen el yacimiento.....	90
8.7	Boxplot: Concentración de clorita en función de las alteraciones presentes en el yacimiento.....	92
8.8	Boxplot: Concentración de clorita en función de las zonas minerales establecidas en el yacimiento.....	93

8.9	Mapas geológicos de las zonas minerales (izquierda), litológico (centro) y de alteración (derecha) en el yacimiento Los Pelambres.....	94
8.10	Distribución espacial de los dominios de Recuperación (derecha) y concentración de clorita (izquierda) en el yacimiento Los Pelambres.....	95



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
4.1	Valores promedio BWI para rocas y minerales seleccionados (Olmos, 2018).....	38
6.1	Número de datos por cada tipo de variable geológica. a) Litología. b) Alteración. c) Zona mineral.....	62
6.2	Poblaciones de Bond Work Index definidas para la interpretación del ACP.....	64
6.3	Poblaciones de recuperación de cobre a 180 $\mu\text{m}$ .....	66
7.1	Matriz de correlación de Pearson. Variable de Bond Work Index.....	76
8.1	Matriz de correlación de Pearson. Variable de Recuperación.....	89

## ABREVIATURAS

**DIQ:** Diorita cuarcífera.

**BMH:** Brecha Magmática Hidrotermal.

**AND:** Andesitas

**BH:** Brecha Hidrotermal.

**PB:** Pórfido “B”.

**PA:** Pórfido “A”.

**PD:** Pórfido “D”.

**PQF:** Pórfido Cuarzo Feldespático.

**COL:** Coluvio.

**STMG:** Sistema Transporte Mineral Grueso.

**SAG:** Semiautógeno.



## RESUMEN

En una industria minera cada vez más exigente, toma suma importancia aumentar la confiabilidad sobre las estimaciones del rendimiento metalúrgico del mineral y su posterior consideración a la hora de construir los modelos geometalúrgicos. Respecto a lo anterior, esta memoria tiene la finalidad de identificar unidades de control mineralógico como complemento a la caracterización cualitativa de los modelos de molienda y recuperación de cobre. Para su desarrollo se consideran los resultados obtenidos desde muestras geometalúrgicos de recuperación *rougher* a distintos P80 y de índice de Bond.

Para facilitar el procesamiento de los datos, se emplearon técnicas multivariadas, tales como el Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Correlación Múltiple que permitieron acotar las variables utilizadas y orientar la investigación hacia aquellas más relevantes. Posteriormente, para cuantificar de manera global el efecto de los minerales sobre cada uno de estos procesos se realizó un análisis univariable a partir de diagramas de caja.

Finalmente, mediante estas técnicas se logró determinar que una alta cantidad de clorita es perjudicial tanto para el proceso de molienda como de flotación, pues una alta concentración de este filosilicato se relaciona con bajos rendimientos en ambos procesos. Lo anterior es consecuencia de su estructura laminar que facilita la formación de aglomerados de comportamiento plástico que se adhieren al molino, provocando una disminución en el trabajo efectivo de este. En el caso de la recuperación *rougher* su baja en el rendimiento es consecuencia de cambios en la reología, efecto *slime coating*, entre otras.

La distribución espacial de las poblaciones de recuperación e índice de trabajo en el rajo permite reconocer y relacionar zonas de bajo rendimiento metalúrgico con los parámetros geológicos tal como sucede con las andesitas y la alteración clorita-sericita. Estas variables en conjunto generan volúmenes de comportamiento similar para estos parámetros.



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo general

Analizar la correlación existente entre la mineralogía y las características intrínsecas del yacimiento Los Pelambres que influyen en las pruebas metalúrgicas de molienda (*Bond Work Index*) y flotación *rougher* (Recuperación), con la finalidad de identificar unidades de control mineralógicos para los modelos geometalúrgicos in situ.



### 1.1.2 Objetivos específicos

1. Revisión y validación de la base de datos geológica, análisis químicos y estudios mineralógicos.
2. Contrastar la caracterización mineralógica de laboratorio con los parámetros metalúrgicos y establecer tendencias espaciales dentro del yacimiento.
3. Identificar las variables mineralógicas que presenten alta correlación con el comportamiento metalúrgico en la etapa de molienda de bolas y flotación.
4. Deducir el sentido fenomenológico que explique las correlaciones y resultados obtenidos.

## 1.2 UBICACIÓN Y ACCESOS

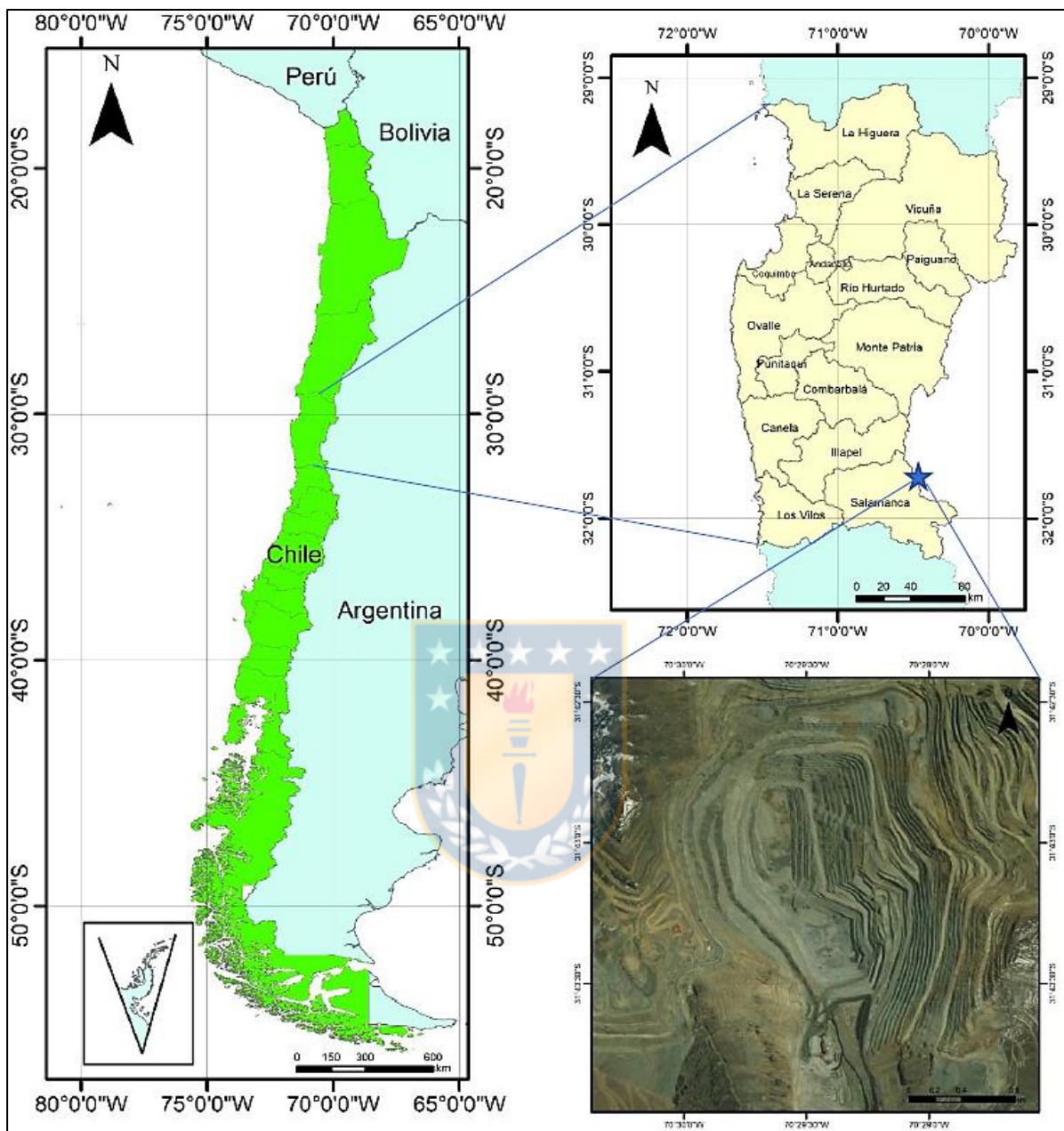
Minera los Pelambres se ubica en la Provincia de Choapa, al sur de la Región de Coquimbo, a 240 km al norte de la ciudad de Santiago y 45 km al este de Salamanca. El yacimiento se encuentra en



la Cordillera de Los Andes a una altitud que varía entre los 2.500 y 4.000 m s.n.m. Referencialmente sus coordenadas geográficas son  $31^{\circ} 42' S - 70^{\circ} 30' W$ .

El acceso a Minera Los Pelambres puede ser por tierra o por aire. Para acceder por tierra, se debe utilizar la ruta 5 norte y luego, en Los Vilos, tomar el desvío hacia el este por la ruta D-85 o bien, desde Huentelauquén la ruta D-75. Ambas rutas conectan con Salamanca, desde este punto, se debe tomar la ruta D-835 que comunica con la ruta D-871, la cual llega a Portones, lugar de acceso a las instalaciones de la faena. Para el caso de acceder por aire, Minera Los Pelambres cuenta con un aeródromo dentro de sus instalaciones.





**Figura 1.1:** Mapa de ubicación y acceso a Minera Los Pelambres, Región de Coquimbo, Chile.

Extraído de Saavedra, 2019.

## **1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO**

### **1.3.1 Etapa bibliográfica**

Comprende la recopilación y selección de informes geológicos y directrices operacionales asociadas a Minera Los Pelambres con la finalidad de comprender la metodología de funcionamiento de la mina, conocer características geológicas y filtrar información útil para el posterior análisis estadístico multivariado. Adicionalmente abarca la revisión y depuración de las bases de datos de pruebas metalúrgicas de sondajes del Caso Base 2021 y QEMSCAN® (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy).

### **1.3.2 Etapa de análisis e interpretación de datos**

Una vez lista la base de datos integrada se procede a la confección de gráficos mediante los cuales se identifican los dominios de estimación relacionados con los parámetros litológicos, de alteración y zonación mineral. Esta etapa contempla buscar la relación estadística entre los parámetros geológicos antes mencionados y las variables metalúrgicas *Bond Work Index* y *Recuperación rougher*.

### **1.3.3 Etapa de Confección Informe Final**

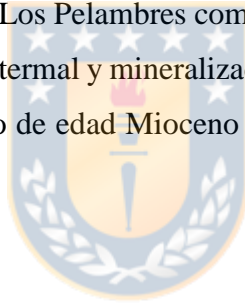
Esta etapa contempla la elaboración del informe de la Memoria de Título, en base a la información trabajada previamente y los objetivos establecidos. Paralelamente existe una constante retroalimentación y corrección de la Memoria de Título junto con los profesionales guías y profesor patrocinante.

## 1.4 TRABAJOS ANTERIORES

**Informe técnico N°21 “Los Pelambres” del programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (1971)** define y describe a este yacimiento como un pórfido de cobre emplazado en rocas del Cretácico Inferior y en rocas intrusivas del Terciario Superior.

**Sillitoe (1973)** describe la geología, alteración hidrotermal y mineralización. Realiza dataciones radiométricas del yacimiento, indicando que se trata de un pórfido cuprífero asociado a cuerpos intrusivos hospedados en rocas volcánicas del Cretácico Inferior.

**Acosta (1981)** define el yacimiento Los Pelambres como un pórfido cuprífero que sigue el modelo clásico respecto a la alteración hidrotermal y mineralización. Reconoce tres fases intrusivas, siendo la más importante un stock diorítico de edad Mioceno Superior, que intruye rocas volcánicas del Cretácico Superior.



**Skewes (1984)** realiza estudios a inclusiones fluidas apartadas de las diferentes vetillas del yacimiento Los Pelambres, las que posteriormente se asociaron a distintas fases de alteración y mineralización.

**Skewes y Atkinson (1985)** presentan un estudio petrográfico y de inclusiones fluidas en vetillas hidrotermales tempranas de la zona de alteración potásica del yacimiento Los Pelambres. Comparan los resultados con los depósitos de El Salvador (Chile) y Butte (EE. UU.).

**Rivano y Sepúlveda (1991)** confeccionan la Carta Geológica de la Hoja Illapel y definen una unidad volcánica de edad Cretácico Inferior como la roca caja del yacimiento Los Pelambres (“Formación” Los Pelambres). Se describen las rocas intrusivas del Mioceno Superior.

**Atkinson et al. (1996)** realizan una investigación que involucra la geología, petrografía, dataciones radiométricas, alteración hidrotermal, zonación mineral, distribución y reservas en los Pelambres.

**Díaz (2001)** estudia en detalle el enriquecimiento secundario del yacimiento Los Pelambres, determinando cuales son los controles geológicos y la mineralización hipógena que controla este enriquecimiento.

**Castelli (2006)** visualiza la geología regional, a partir de perfiles 1:25.000 entre Los Pelambres (Chile) y El Pachón (Argentina), trabajó para AMSA.

**Morell (2014)** destaca en su memoria de título la importancia de la granulometría del concentrado y su relación con los porcentajes de recuperación global obtenidos durante de proceso de flotación.

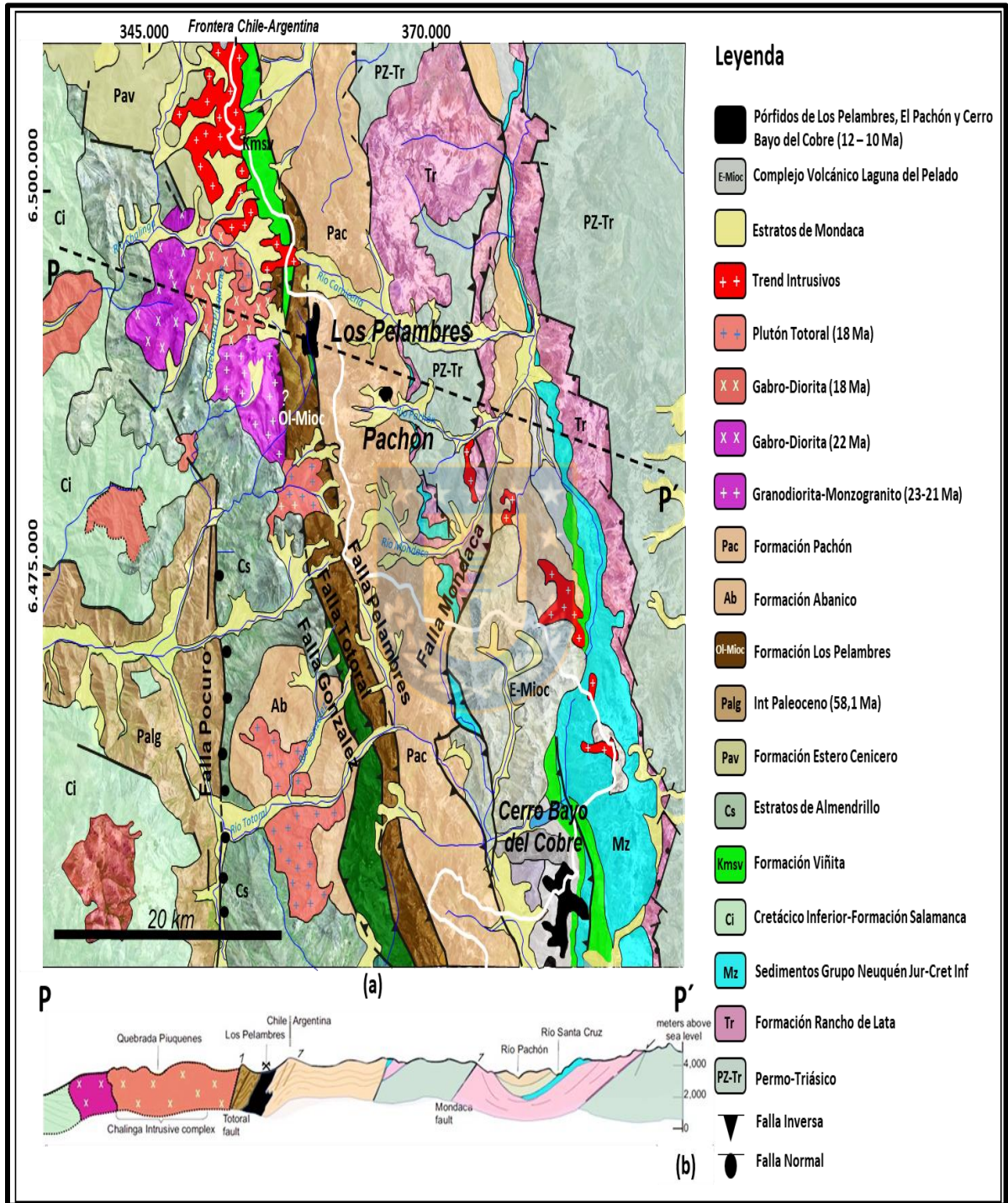
**Lobos (2015)** realiza un análisis por microscopía para identificar los minerales que no son flotados en la etapa de flotación *rougher*, y así reconocer causas de la presencia de sulfuros de cobre en los concentrados de Minera Los Pelambres. En este aspecto, se observó que las pérdidas de molibdenita son asociados a minerales asociados a gangas (8%), mientras que los sulfuros de cobre en los concentrados son atribuibles a flotación por arrastre en el proceso debido a su reducido tamaño.

**Mpodozis (2015)** confecciona un Mapa Geológico Regional actualizado del área de Los Pelambres (escala 1:75.000).

**Bergoeing (2016)** en su memoria de título menciona la evolución geoquímica del magmatismo en la región y sus implicancias para la evolución tectónica y metalogénica de los Andes de Chile Central durante el Cretácico Superior y el Mioceno Superior.



## 2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL



**Figura 2.1:** Mapa geológico regional del área de Los Pelambres. (a) Mapa geológico. (b) Perfil geológico p-p'.

Mpodosis (2011).

## **2.1 GENERALIDADES**

Minera Los Pelambres se ubica en el sector de valles transversales y en el segmento sur de la zona de subducción plana (*flat – slab*) del norte de Chile. La geología de la Cordillera de los Andes a esta latitud consiste en rocas del Basamento Paleozoico posteriormente intruídas por rocas cuyas edades oscilan desde el Jurásico hasta el Holoceno (Mpodozis, 2015).

## **2.2 ROCAS ESTRATIFICADAS**

### **2.2.1 Secuencias sedimentarias del Paleozoico superior**

Areniscas micáceas de grano fino a medio y lutitas de tonalidades verdosas que han sido afectadas por un metamorfismo regional de bajo grado. En cuanto a su relación espacial, estas secuencias no presentan base expuesta y están intruídas por granitoides pertenecientes al Batolito Pico Los Sapos (Pennsylvaniano tardío). Éstas son de común ocurrencia en la Cordillera Frontal donde se encuentran en contacto con discordancia angular al Grupo Choiyoi.

### **2.2.2 Grupo Choiyoi**

Sucesión de rocas volcánicas y piroclásticas de más de 2 kilómetros de espesor que alcanza gran desarrollo en la Cordillera de Santa Cruz (Álvarez, 2006). Comprende afloramientos de menor volumen al este de la Falla Mondaca cortados por granitoides del Batolito Pico Los Sapos.

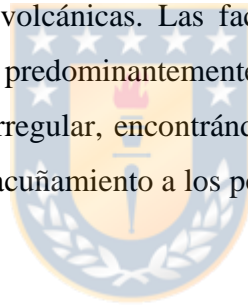
El grupo está conformado principalmente por brechas piroclásticas, tobas soldadas y de caída, cuya composición es riolítica con característicos ojos de cuarzo, además incluyen intercalaciones de

areniscas y conglomerados. Se le atribuye una edad permo-triásica, sin embargo, las relaciones espaciales observadas en la región indican que podría ser incluso más antigua.

### **2.2.3 Formación Rancho de Lata**

Conjunto de rocas epiclásticas y piroclásticas intercaladas sobreyaciendo a las riolitas del Grupo Choiyoi mientras que el límite superior está determinado por una discordancia erosiva de extensión regional, a partir de la cual, se depositaron rellenos sedimentarios de variada composición.

Las facies epiclásticas están constituidas principalmente por conglomerados y areniscas líticas, cuyos clastos provienen de rocas volcánicas. Las facies piroclásticas son sincrónicas y están formadas por brechas ignimbríticas predominantemente riolíticas, tobas de caída y tobas de flujo. La geometría de los depósitos es irregular, encontrándose bancos tabulares de gran extensión y otros en donde la capa presenta un acuñamiento a los pocos metros.



### **2.2.4 Formación Viñita**

Secuencia volcánica de composiciones basálticas y andesíticas con intercalaciones de tobas líticas, volcarenitas andesíticas y diques máficos (Mpodozis, 2015). En las nacientes del Estero Cenicero está cubierta en discordancia por los Estratos de Almendrillo (Campaniano – Maastrichtiano). Su posición stratigráfica permitiría considerar a esta formación, como un equivalente temporal a la Formación Salamanca, sin embargo, su edad es difícil de determinar pues no se cuenta con datos radiométricos que detallen su edad.

### **2.2.5 Formación Salamanca**



Secuencia volcánica continental bien estratificada de más de 1.000 m de espesor. Conformada por andesitas, andesitas basálticas porfídicas y afaníticas, brechas andesíticas, y en menor proporción intercalaciones sedimentarias afectadas por procesos metamórficos de bajo grado. Son rocas subhorizontales con una leve inclinación de 10-15° E.

La secuencia aflora al oeste mediante contacto por falla (Falla Pocuro) e infrayace en discordancia angular a la Formación Abanico, por el extremo sur. Se encuentra intruida por plutones y diques asociados a los intrusivos paleocenos. En la zona de Coirón su base corresponde a un nivel de tobas con abundantes líticos y pómez en las cuales se obtuvo una edad U-Pb en circones de  $90,6 \pm 1,3$  Ma (Mpodozis, 2015).

### **2.2.6 Estrato de Almendrillo**



Secuencia volcánica, piroclástica y sedimentaria de espesor variable, con más de 500 m de potencia. La secuencia cubre en discordancia angular a la Formación Salamanca entre los ríos Chalinga y Manque, hacia el sur, está en contacto con la misma formación por medio de la Falla Pocuro. Una datación U-Pb en circones indicó una edad de  $74,7 \pm 1,3$  Ma (Mpodozis, 2015).

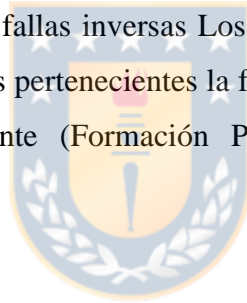
### **2.2.7 Formación Estero Cenicero**

Secuencia de hasta 400 m de espesor formada por una sucesión estratificada y subhorizontal de lavas máficas con intercalaciones de brechas volcánicas y areniscas volcano-detríticas. Esta secuencia aflora entre el río Carén, por el sur y el estero Cenicero, por el norte. Esta unidad sobreyace en discordancia angular a la Formación Salamanca y los Estratos de Almendrillo y es intruida por plutones del Eoceno Medio.

La datación U-Pb realizada a una muestra proveniente del valle del río Tres Quebradas indicó una edad  $63,6 \pm 1,4$  Ma (Paleoceno Inferior), consistente con sus relaciones estratigráficas de Mpodozis (2015).

### **2.2.8 “Formación” Los Pelambres**

Secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias conformada por andesitas basálticas de olivino y piroxeno, lavas andesíticas y traquíticas de piroxeno, brechas volcanoclásticas, tobas daciandesíticas a riolíticas soldadas, sills andesíticos a riolíticos y volcarenitas. Estas rocas se encuentran intensamente deformadas, con desarrollo de pliegues isoclinales y láminas internas de corrimiento. Su base y techo no están expuestos ya que sus afloramientos se encuentran limitados, tanto al este como al oeste por las fallas inversas Los Pelambres y Totoral respectivamente, las cuales ponen en contacto a las rocas pertenecientes la formación Los Pelambres con rocas mucho menos deformadas tanto al oriente (Formación Pachón) como al poniente (Estratos de Almendrillo).



Mpodozis et al. (2009) reinterpretan esta secuencia como una unidad tectónica que representa una región de sutura entre los bloques rígidos de la Cordillera de la Costa, al oeste, y la Cordillera Frontal, al este. Dataciones de U-Pb en circones arrojan edades entre  $33,4 \pm 0,5$  Ma a  $18,0 \pm 0,4$  Ma para esta secuencia (Mpodozis, 2015).

### **2.2.9 Formación El Pachón**

Secuencia de rocas volcánicas constituida por una alternancia de andesitas basálticas de olivino y piroxeno, en menor proporción, intercalaciones de tobas félsicas, areniscas y conglomerados que conforman un nivel continuo cerca de la base de la sucesión.

Expuesta como una faja continua de afloramientos de 5 a 10 km de ancho con rumbo NNW y manteo suave hacia el W. Los afloramientos ubicados en la zona norte, entre los ríos Piuquenes y Carnicería, están en contacto por una falla normal de alto ángulo con inclinación al oeste (Falla Pachón) y hacia el este con los intrusivos del Batolito Pico Los Sapos. Entre los ríos Carnicería y Mondaca, la Formación Pachón cubre en discordancia angular a las formaciones La Manga y Tordillo y más al sur aparece en contacto por falla inversa vergente al este (Falla Mondaquita) sobre los Estratos de Mondaca y la Secuencia de Laguna del Pelado. Perelló et al. (2012) y Mpodozis (2015) por dataciones U-Pb les asignan una edad comprendida entre los  $21,69 \pm 0,26$  y  $22,7 \pm 0,2$  Ma.

### **2.2.10 Estratos de Mondaca**

Secuencia de más de 200 metros de rocas sedimentarias y piroclásticas organizadas en dos niveles estratigráficos. El nivel basal comprende un nivel de conglomerados gruesos, areniscas y brechas con clastos volcánicos, mientras que en nivel superior está formado por una alternancia de tobas, brechas piroclásticas y aglomerados. Es la unidad más oriental y está limitada hacia el oeste por la falla inversa Mondaca, y al sur en torno a la Laguna del Pelado. Sobreyace con una leve discordancia angular sobre la Secuencia Volcánica de Laguna del Pelado. Dataciones de U-Pb en circones por Mpodozis (2015) arrojaron edades entre los  $22,1 \pm 0,4$  y  $21,6 \pm 0,4$  Ma.

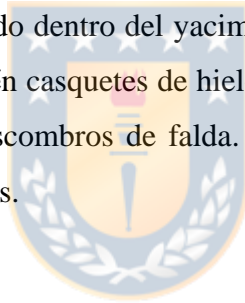
### **2.2.11 Secuencia Volcánica Laguna del Pelado**

Serie volcánica de más de 500 m de espesor que aflora en la zona de Laguna del Pelado y que fue anteriormente atribuida a la “Formación Farellones” por Munizaga y Vicente (1982), Rivano y Sepúlveda (1991) y Guitart (2007).

Está constituida por estratos suavemente inclinados al oeste que se apoyan en discordancia angular sobre los conglomerados y tobas de los Estratos de Mondaca. Al sur de Laguna del Pelado está intruida por pórfidos del Mioceno superior. La secuencia volcánica está constituida por gruesos niveles de aglomerados volcánicos y coladas cuya litología corresponde, principalmente a daciandesitas con oxihornblenda y dos piroxenos y algunas variedades de andesitas basálticas con olivino, piroxeno y hornblenda. Al norte de Laguna del Pelado se obtuvieron dos edades U-Pb en circones de  $18,3\pm 0,4$  y  $18,4\pm 0,4$  Ma.

### **2.2.12 Depósitos cuaternarios**

Corresponden a depósitos no consolidados provenientes de la meteorización de las rocas existentes. Sus orígenes son variados, existiendo dentro del yacimiento depósitos de terrazas fluviales y por remoción en masa, así como también casquetes de hielo, glaciares de roca, depósitos morrénicos, sedimentos aluviales, coluvios y escombros de falda. Su espesor no supera los 50 metros y se encuentran sobre las demás unidades.



## **2.3 ROCAS INTRUSIVAS**

### **2.3.1 Batolito Pico Los Sapos**

Extenso complejo plutónico de orientación NS de 40 km de largo y 5 km de ancho. Ubicado desde la quebrada Piuquenes al norte hasta el río Mondaca por el sur. Comprende intrusivos leucocráticos que intruyen a las secuencias sedimentarias neopaleozoicas y a las riolitas del Grupo Choiyoi. Hacia el este se pone en contacto por falla (falla inversa Mondaca) con los Estratos de Mondaca (Mioceno inferior). Por el lado occidental subyacen en discordancia a rocas piroclásticas y sedimentarias continentales triásicas.

Litológicamente está constituido por granodioritas y tonalitas de grano medio a grueso, además, incluye stocks graníticos y pórfidos riolíticos. Musso et al. (2012) asigna una edad de  $301,4 \pm 2,3$  Ma (Pennsylvaniano tardío) en granitos que afloran en la zona del río La Pantanosa.

### **2.3.2 Granitoides del Campaniano-Maastrichtiano**

Plutones de pequeña a mediana extensión que intruyen a la Formación Viñita y a la Formación Salamanca. La composición varía desde dioritas de piroxeno, monzodioritas cuarcíferas de dos piroxenos, monzogranitos y dioritas de biotita y piroxeno. Las rocas más diferenciadas corresponden al Plutón Tascadero, el cual está conformado por granodioritas y tonalitas de biotita y hornblenda. Mpodozis (2015) le asigna una edad U-Pb de  $74,7 \pm 1,3$  Ma.

### **2.3.3 Plutones Zapallar y Manque Bajo**



Granitoides que intruyen a la Formación Salamanca en la zona oeste de la región. El Plutón Manque Bajo se constituye por monzodioritas cuarcíferas con piroxeno, anfíbola y biotita. Por su parte, el Plutón Zapallar es un intrusivo conformado por monzogranitos de biotita y hornblenda. Presentan una edad U-Pb datada en circones de  $67,7 \pm 1,8$  Ma.

### **2.3.4 Plutón Cuncumén**

Cuerpo intrusivo de gran volumen emplazado en la Formación Salamanca y los Estratos de Almendrillo. Está conformado por rocas leucocráticas de grano medio a grueso. Gran parte de sus afloramientos están limitados por la Falla Pocuro, la que pone en contacto al Plutón con parte de los Estratos de Almendrillo. Dataciones U-Pb en circones indican edades entre  $60 \pm 0,9$  y  $58,1 \pm 1,2$  Ma (Mpodozis, 2015).

### 2.3.5 Complejo Intrusivo Chalinga

Cuerpo intrusivo constituido por un conjunto de plutones y pórfidos de forma tabular de orientación NNW de edad Mioceno Inferior. El complejo intruye a rocas volcánicas del Cretácico (Formación Salamanca), Paleoceno (Formación Estero Cenicero) y Oligoceno - Mioceno Inferior (Formación Los Pelambres). Dentro de este complejo se diferencian tres eventos magmáticos. Las fases iniciales contienen dioritas de piroxeno y granodioritas, seguido de fases de gabro de olivino y diorita, mientras que las fases más tardías son monzodioríticas con cuarzo. Mediante métodos radiométricos se obtienen edades para las fases tempranas de  $23,3 \pm 0,2$  y  $21,6 \pm 0,6$  Ma, para el segundo evento, edades de  $18,6 \pm 0,4$  y  $18,1 \pm 0,5$  Ma, y para la tercera fase una edad de  $16,5 \pm 0,2$  y  $15,1 \pm 0,6$  Ma (Perelló et al., 2012).



### 2.3.6 Stock Pelambres

El Stock Los Pelambres constituye la principal roca de caja de la mineralización del yacimiento Los Pelambres y ha sido interpretado como parte de los cuerpos precursores de la mineralización en el distrito (Perelló et al. 2012). Es un cuerpo intrusivo de 4,5 x 2,5 km, elongado en dirección NS, emplazado a lo largo de la traza de la Falla Los Pelambres, la que pone en contacto riolitas del Cretácico Superior, lavas y rocas sedimentarias de la formación Los Pelambres con la Formación Pachón. Este intrusivo está compuesto de dioritas cuarcíferas de hornblenda y biotita de grano fino a medio.

Se les asigna una edad U-Pb de  $15,4 \pm 0,4$  y  $15,4 \pm 0,3$  Ma (Perelló et al., 2012). Hacia el sector noroeste del stock Los Pelambres, posee una edad de  $13,92 \pm 0,15$  y  $12,51 \pm 0,17$  Ma (Bertens et al., 2003; Perelló et al., 2012).

### 2.3.7 Pórfidos El Pachón y Cerro Bayo del Cobre

Intrusivos hipabisales completamente alterados, portadores de mineralización cuprífera, que forman un clúster de cuerpos porfídicos que intruyen al Stock Pelambres y que, en el yacimiento Los Pelambres están asociados a brechas magmáticas e hidrotermales. Según Perelló et al. (2012) los intrusivos mineralizados abarcan varias fases que se pueden agrupar en dos familias de pórfidos dacíticos de hornblenda, biotita y cuarzo y pórfidos andesíticos de biotita. Ambos están acompañados de diques microdioríticos tardíos. Las edades U-Pb en circones se ubican entre los  $12,3 \pm 0,3$  y  $10,53 \pm 0,14$  Ma.

Cerro Bayo del Cobre corresponde a un conjunto de stocks de mediano volumen, diques y sills que intruyen al Complejo Volcánico Laguna del Pelado, Formación Pachón y Estratos de Mondaca en las nacientes del río Teatinos. Están formados por rocas porfídicas de grano medio a grueso, con grandes cristales de anfíbola y fenocristales de plagioclasa, hornblenda, biotita y pequeños cristales de cuarzo. Tres dataciones U-Pb en circones indican edades de  $11,8 \pm 0,3$ ;  $10,73 \pm 0,25$  y  $10,02 \pm 0,28$  Ma.

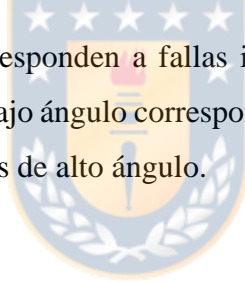
### 3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO LOS PELAMBRES

#### 3.1. GENERALIDADES

Los Pelambres es un yacimiento de tipo pórfido cuprífero adakítico, cuya mineralización corresponde principalmente a sulfuros de cobre, con porcentajes de molibdeno y valores subordinados de oro y plata. El yacimiento se encuentra actualmente en explotación mediante un rajo abierto.

En el área de estudio se reconocen rocas volcánicas con una fuerte componente de alteración hidrotermal con cuerpos intrusivos de composición diorítica, pórfidos dacíticos y pórfidos andesíticos, los cuales se habrían dado lugar durante el Mioceno superior – Plioceno.

Las estructuras predominantes corresponden a fallas inversas de bajo y alto ángulo, orientadas hacia el NE. Las fallas inversas de bajo ángulo corresponderían a estructuras secundarias asociadas a la imbricación de secuencias de las de alto ángulo.



#### 3.2. LITOLOGÍA

En el capítulo anterior se detalla la litología presente en la región aledaña al yacimiento, incluyendo las formaciones sedimentarias y rocas intrusivas que componen la geología local. No obstante, Minera Los Pelambres utiliza una descripción litológica propia (Figura 3.1) derivada de las principales unidades litológicas que constituyen el sector. Los nombres asignados a estas unidades son principalmente en referencia a su composición y textura, obteniendo así una nomenclatura que puede ser utilizada por las diferentes áreas de la mina:

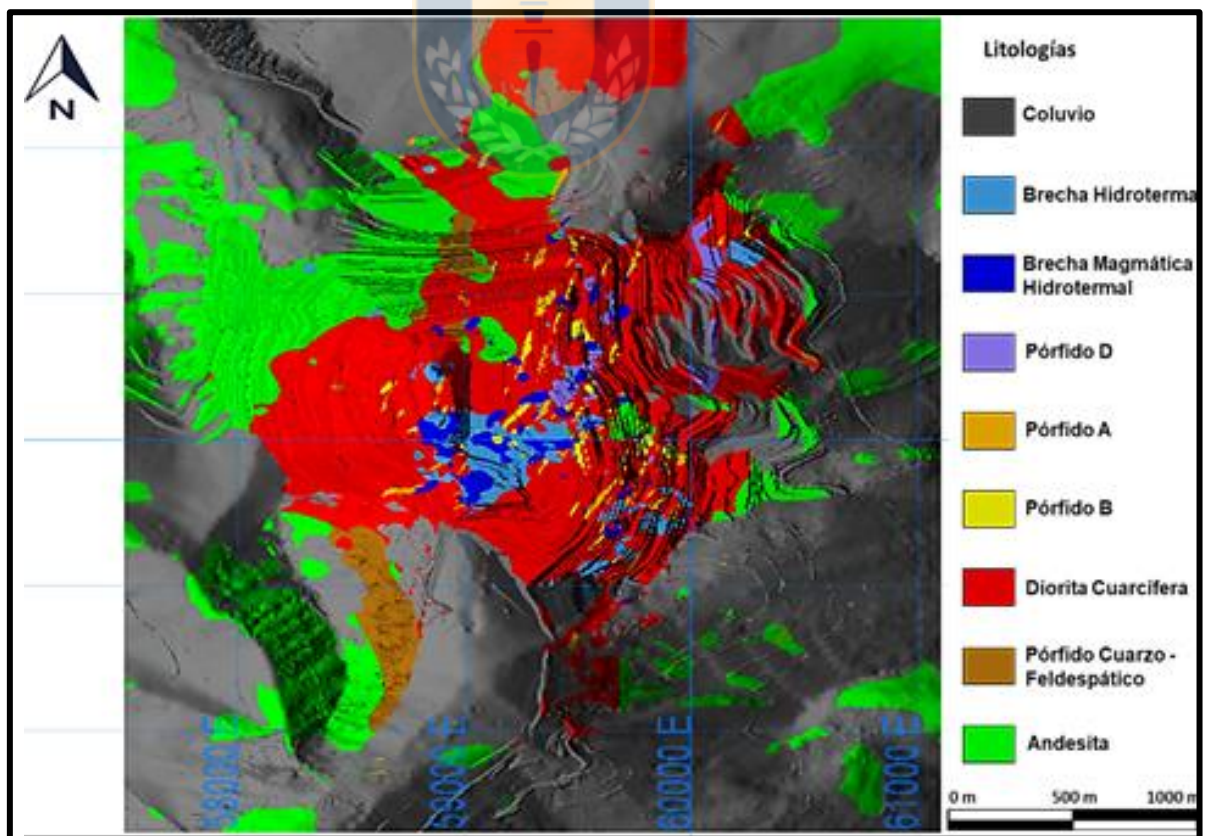
- **Diorita Cuarcifera (DIQ):** Roca de textura principalmente fanerítica y localmente porfídica, inequigranular de grano medio.



- **Brecha Magmática Hidrotermal (BMH):** Roca de matriz ígnea (PA y PB) con clastos de composición andesítica. Además, contiene clastos con presencia de vetillas de tipo A y D de bordes rectos.
- **Andesitas (AND):** Rocas de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa y biotita. Contiene matriz de textura intergranular con presencia de microlitos de plagioclasa, escaso cuarzo intersticial y abundante biotita diseminada.
- **Brecha Hidrotermal (BH):** Brechas mayoritariamente clasto-soportadas y en menor grado matriz-soportadas. Los clastos son angulosos a subredondeados e incluyen litologías como diorita cuarcífera, pórfido A, B y D y andesitas. Las brechas están cementadas con turmalina, anhidrita y biotita. La principal alteración presente es la potásica y hacia zonas superiores aparecen zonas de alteración sericítica.
- **Pórfido B (PB):** Conjunto de pequeños stocks y diques irregulares de rumbo NS-NE y manteo SSE. Cortan principalmente a la diorita cuarcífera en el centro del yacimiento y hacia el sureste a las andesitas asociadas a la Formación El Pachón (Perelló et al., 2012). Corresponde a un intrusivo de composición dacítica, textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, presencia de máficos y escasos ojos de cuarzo. La masa fundamental está constituida por microcristales de cuarzo, feldespato y biotita secundaria.
- **Pórfido A (PA):** Conjunto de stocks y diques de rumbo NS-NE y manteos subverticales SSE al igual que el Pórfido B. Ambas litologías son contemporáneas, encontrando zonas en las que PA corta a PB y otras en donde PB corta a PA (Perelló et al., 2012). El Pórfido A es un intrusivo de composición andesítica, textura porfídica con cristales de plagioclasa, biotita y anfíboles comúnmente reemplazados por biotita secundaria.
- **Pórfido D (PD):** Intrusivos de composición diorítica, microdiorítica y dacítica. Contiene aproximadamente un 70% de fenocristales, siendo en su mayoría plagioclasa, mientras que

el 30% restante corresponde a una matriz de biotita, plagioclasa y en menor abundancia anfíboles.

- **Pórfido Cuarzo Feldespático (PQF):** Pórfido de carácter granítico. Presenta textura porfídica de grano medio, compuesto por fenocristales de plagioclasa y ojos de cuarzo con ocasionales embahiamientos. Normalmente los máficos presentes se encuentran totalmente alterados a sericita o cuarzo-sericita.
- **Coluvio (COL):** Material estéril correspondiente a sedimentos no consolidados que cubren gran parte de la superficie del área, tiene un espesor promedio de 15 metros, sin embargo el espesor máximo alcanza los 60 metros. Está constituido por material polimíctico de mala selección y clasificación. El tamaño de la fracción gruesa varía desde unos centímetros hasta fragmentos cercano al metro, mientras que la fracción fina está constituida por arenas y arcillas.



**Figura 3.1:** Vista en planta del modelo litológico de Minera Los Pelambres. Extraído de Caso Base 2021.

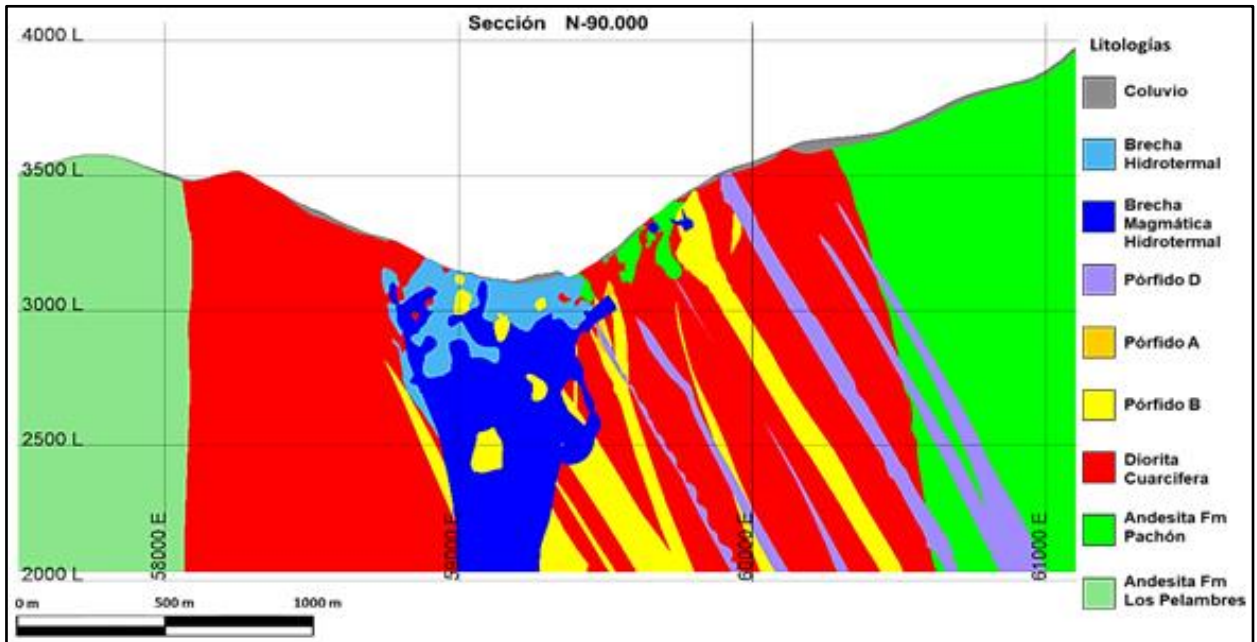


Figura 3.2: Sección N-90.000 del modelo litológico de Minera Los Pelambres. Extraído de Caso Base 2021.

### 3.3. ALTERACIÓN

En general, la alteración hidrotermal hipógena es bastante homogénea en el yacimiento, pues casi la totalidad del depósito corresponde a alteración potásica, dentro de la cual es posible distinguir dos subtipos: La primera con una intensa biotización de los anfíboles y feldespato potásico subordinado y la segunda caracterizada por la predominancia de feldespato potásico, tanto en vetillas como en los halos.

Las rocas andesíticas que rodean al yacimiento (Formación Pelambres y Formación Pachón) se encuentran intensamente propilitizadas, reflejándose en la asociación clorita, yeso, arcillas y epidota localmente. También en ciertos sectores y de manear local, existe alteración sericítica, donde la plagioclasa y el feldespato se han alterados a sericita con zonas de intensa silicificación con cuarzo diseminado y en vetillas.

Estas características de alteración se adecuan bastante bien al modelo clásico de Lowell y Gilbert (1970) con zonas concéntricas de alteración. Por su parte, la alteración supérgena, ocurre en gran medida por la exposición de la mineralización primaria en un ambiente oxidante. Estos procesos

se ven catalizados por la alta concentración de pirita y la acción de aguas meteóricas que producen oxidación y lixiviación de los sulfuros de hierro. Esta zona está caracterizada principalmente por los minerales: jarosita, hematita y limonita que son alojados en fracturas y estructuras de las rocas y también como pseudomorfos de los sulfuros primarios (pirita, calcopirita y bornita).

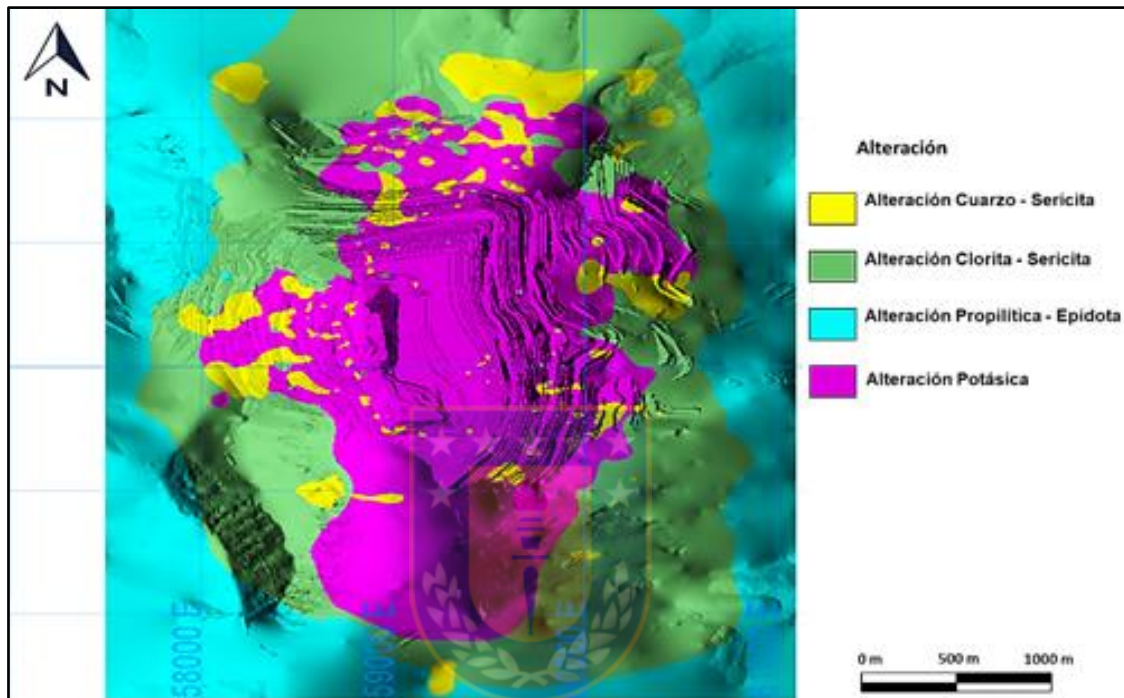


Figura 3.3: Vista en planta del modelo de alteración de Minera Los Pelambres. Extraído de Caso Base 2021.

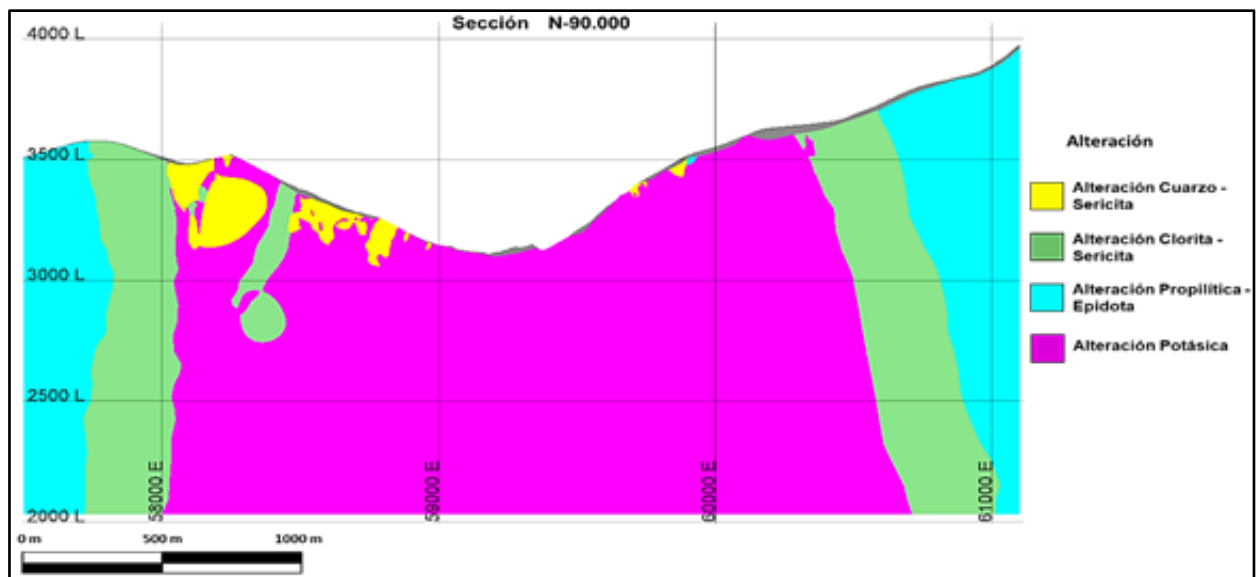


Figura 3.4: Sección N-90.000 del modelo de alteración de Minera Los Pelambres. Extraído de Caso Base 2021.

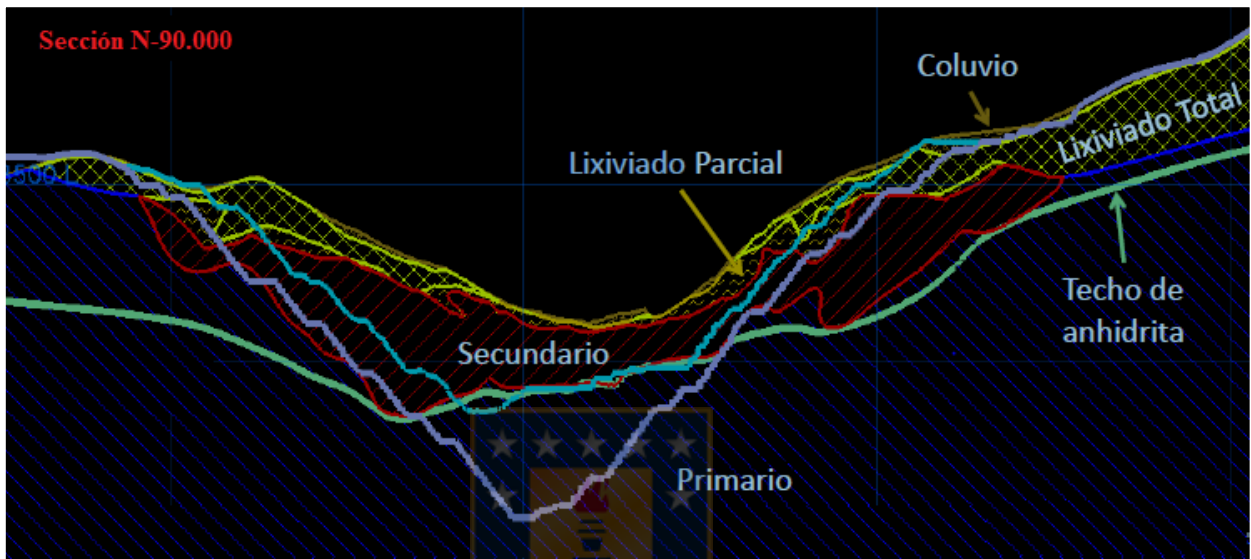
### 3.4. ZONA MINERAL

Al igual que con la litología y alteración del yacimiento, existe un modelo de zonas minerales correspondiente a envoltantes según mineralización, los cuales corresponden a (Figura 3.5):

- **Coluvio:** Material estéril correspondiente a sedimentos no consolidados, que cubren gran parte del área. Está constituido por material polimíctico de mala selección y clasificación. El espesor varía entre 20 y 60 metros y el tamaño de la fracción gruesa varía de centimétrica a decimétrica, mientras que la fracción fina no supera el tamaño arena.
- **Lixiviado Total:** Esta unidad incluye todos los tipos litológicos, se ubica inmediatamente bajo la zona de coluvio en forma subparalela a ésta. Tiene un espesor variable, con una media de 40 metros y ocasionalmente alcanza los 100 metros. Corresponde a la zona donde los contenidos de fases de apariencia limoníticas alcanzan el 10% de los minerales de la roca, resultado de la lixiviación y reemplazo de los sulfuros por hidróxidos de hierro. En general es material estéril, con una ley media de cobre de 0,1%.
- **Lixiviado Parcial:** Incluye todos los tipos litológicos y se encuentra bajo la unidad de lixiviado total. Tiene una disposición subparalela alcanzando un espesor máximo de 120 metros. Corresponde a una zona con techo definido por la presencia de sulfuros de cobre y una base limitada por la desaparición de las limonitas. La mineralización de la roca ha sido parcialmente removida, no obstante, la presencia de sulfuros secundarios (calcosina-covelina) constituyen una característica importante.
- **Secundario:** Principalmente dioritas que subyacen a las zonas lixiviadas previamente descritas. La potencia varía entre los 20 y 350 metros. Su característica principal es la presencia de calcosina con cantidades menores de covelina y digenita intercrecida. El techo corresponde a la aparición de limonitas y el piso está determinado por la desaparición de la calcosina-covelina.



- **Primario:** Es la continuidad del secundario en profundidad con un espesor reconocido de más de medio kilómetro y su límite inferior no definido. Corresponde a la zona de sulfuros de cobre exclusivamente hipógenos, tales como la calcopirita, bornita, pirita y molibdenita. El techo de esta unidad es la desaparición total de la calcosina-covelina.



**Figura 3.5:** Esquematización de la sección N-90.000 del modelo de zonación mineral de Minera Los Pelambres.

Modificado de Presentación Geología del yacimiento Los Pelambres (2016).

### 3.5. ESTRUCTURAS

Las formaciones sedimentarias, volcano-sedimentarias y volcánicas presentan un rumbo generalizado NNW con manteo hacia el W, formando un gran sinclinal.

En la zona norte del yacimiento existen fallas normales subverticales de rumbo N a NNW, las cuales son parte del graben Estero Cenicero. En éste, se ponen en contacto la Formación Estero Cenicero con la formación Los Pelambres y la Formación Salamanca, hacia el E y W respectivamente. Esta estructura es la continuación de la Megafalla Pocuro descrita por Rivano y Sepúlveda (1991).

La Megafalla Pocuro se extiende hacia el sur del área y consiste en un conjunto de fallas normales que conforman una zona de rocas miloníticas y cataclásticas con un alineamiento de fuentes

termales que tuvieron su actividad principal durante el Mioceno Inferior con reactivamientos posteriores (Moscoso et al., 1982).

Durante el Plioceno-Pleistoceno se desarrolló un episodio de plegamiento que afectó a las secuencias estratificadas, siendo la última etapa de deformación reconocida en la zona (Charrier, 1981). Adicionalmente, existen fallas normales que evidencian los actuales rasgos morfoestructurales de la Cordillera de los Andes en este sector.

En el distrito, se han reconocido en superficies, dos conjuntos principales de fallas inversas, de rumbos aproximados NE y NW con una vergencia predominante al este y manteos que oscilan entre los 25° y 60°. Ambos sistemas se intersectan en el sector central del distrito, constituyendo zonas de deformación de entre 200 a 500 m de espesor. El carácter inverso de las fallas se evidencia a partir de observaciones de desplazamiento de vetillas y planos de fallas.



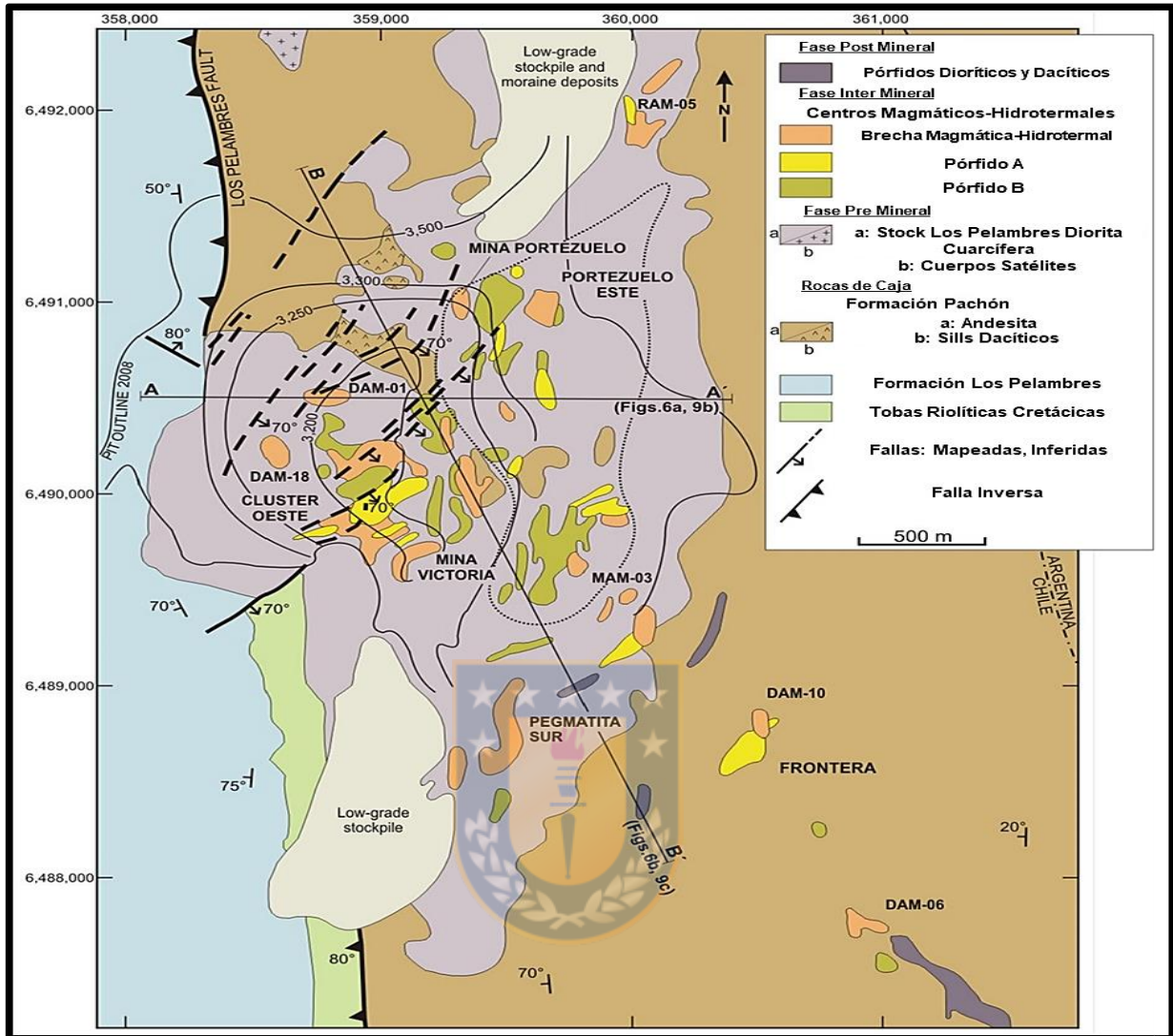


Figura 3.6: Mapa geológico local de Minera Los Pelambres, destacando estructuras principales del yacimiento. (Perelló et al., 2012).



## 4. CONTEXTO METALÚRGICO

### 4.1. GENERALIDADES

Minera Los Pelambres corresponde a un yacimiento del tipo pórfido de cobre y molibdeno en el cual se explotan principalmente sulfuros. Las reservas del yacimiento Los Pelambres alcanzan los 1.488 millones de toneladas, con una ley media de 0,66% de cobre. En tanto, los recursos (incluyendo reservas) se estiman que llegan a los 5.604 millones de toneladas de mineral con una ley media de 0,52% de cobre (Guía Minera, 2018).

La extracción del mineral se realiza a través de una mina de rajo abierto y comienza con el proceso de tronadura y carguío. El mineral es trasladado mediante camiones de alto tonelaje (350 t) hasta el sector de chancado primario. Aquí el material es reducido por chancadores de 60" x 113" para posteriormente ser acumulado en un acopio de mineral grueso. A continuación, es enviado hacia el área de procesamiento a través de un sistema de correas transportadoras (STMG) que recorren 13 kilómetros hasta llegar a la planta acumulándolo en *stock pile*.

Ya en la planta, el material es transportado a 3 líneas de molienda SAG y seguidamente a 6 molinos de bola, estas instalaciones trituran el mineral hasta alcanzar el tamaño ideal o P80 para favorecer la liberación de las partículas de cobre y molibdeno. Las partículas que permanezcan sobre el tamaño de los harneros son enviadas a 4 chancadores de *Pebbles*. Luego, dependiendo de la granulometría y condición que exija el proceso, el material chancado es retornado a la alimentación de los molinos SAG o avanzados a la molienda secundaria.

Una vez alcanzado el tamaño necesario, el mineral pasa al proceso de flotación, donde al mineral de cobre y molibdeno sulfurado se le agrega agua, reactivos e inyecciones de aire, y es agitado para

hacerlo burbujear, consiguiendo arrastrar la mayor cantidad de partículas mineralizadas a la superficie.

Finalmente, en la planta concentradora se separa el concentrado de cobre y molibdeno, para ser enviado a través de un concentraducto al puerto Punta Chungo, en Los Vilos. En este lugar el concentrado pasa por un proceso de secado con la finalidad de lograr la humedad adecuada para ser embarcado en los buques que lo conducirán a su destino final.

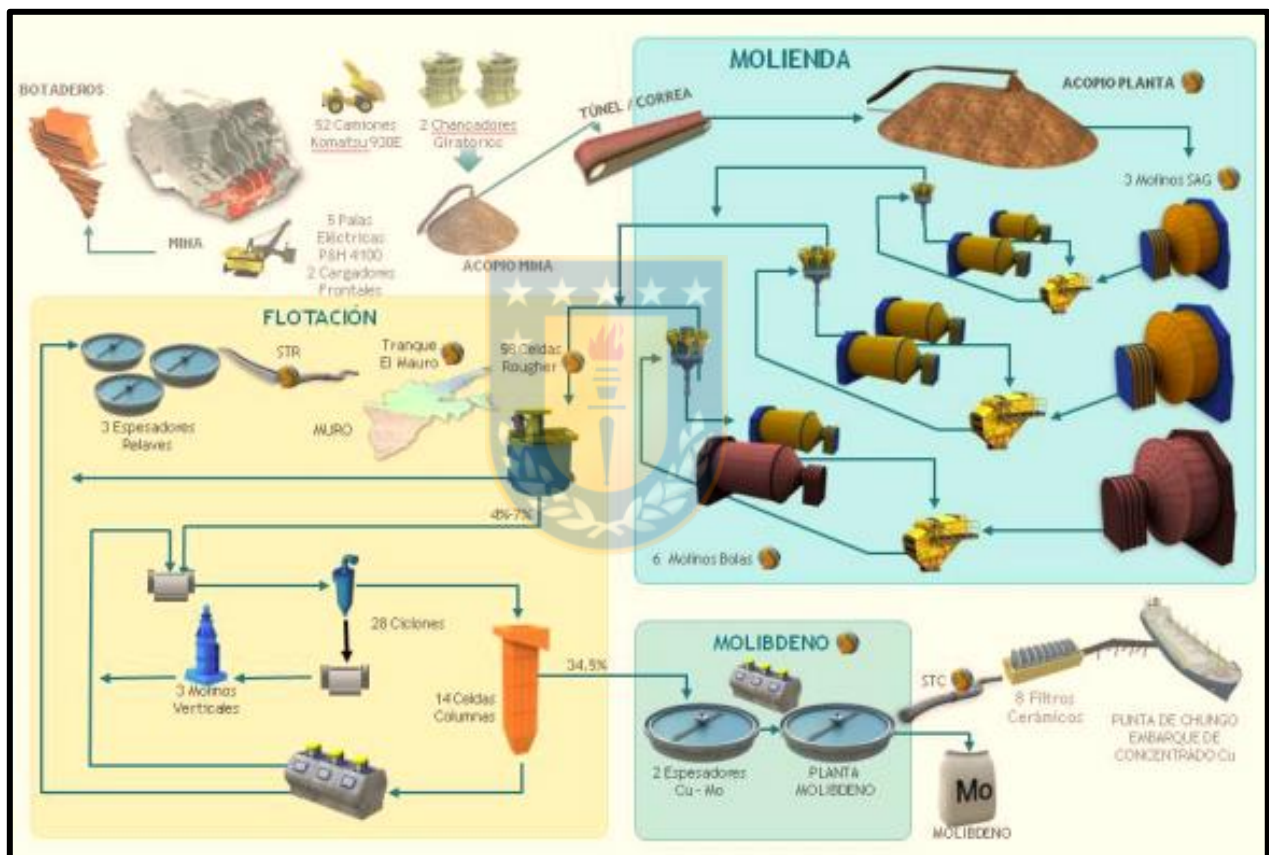


Figura 4.1: Proceso productivo Minera Los Pelambres. (Pasten, 2018).

## 4.2. PROCESO DE CONCENTRACIÓN

El proceso de concentración es la etapa siguiente a la explotación y su objetivo es preparar granulométricamente el mineral proveniente de la mina y separar las especies mineralógicas económicamente útiles (mena) de los componentes estériles (ganga). De manera complementaria a homogenizar el tamaño del mineral, el proceso de concentración reduce considerablemente la cantidad de material que debe ser manipulado en las plantas, reduce a si mismo la cantidad de energía y reactivos para producir una porción enriquecida o concentrado.

Durante este proceso se reduce el volumen y el peso del concentrado que debe ser enviado a fundición, por lo tanto, se disminuye el costo de transporte y manipulación. El propósito de cualquier proceso de concentración de minerales es producir la mayor recuperación de mineral con una ley lo más alta posible y al menor costo. De modo que todas las partes de la planta deben estar sincronizadas para lograr el máximo de retorno por tonelada de mineral tratado.

Las dos etapas principales del proceso de concentración corresponden a las etapas de molienda y flotación. La finalidad de la molienda es la reducción del tamaño de las partículas haciendo uso de sus propiedades hasta conseguir un tamaño que facilite la liberación de la especie de interés, mientras que en la flotación se busca recuperar estas partículas adhiriéndolas selectivamente a burbujas de aire; así, el agregado burbuja-partícula asciende y es separado en forma de pulpa. Finalmente, la pulpa obtenida en este proceso es tratada en espesadores para aumentar el porcentaje de sólidos del concentrado y recuperar el agua utilizada durante el proceso. De esta manera, la concentración de minerales genera un primer producto ya comercializable, pues este adquiere un valor de mercado y puede ser tranzado (Díaz, 2012).

Para el caso de Minera Los Pelambres, el producto final y principal de la compañía es el concentrado de cobre y el concentrado de molibdeno, del cual se exportaron aproximadamente

372.100 toneladas de cobre fino y 10.928 toneladas de molibdeno fino durante el año 2020 (Cochilco, 2021).

#### **4.2.1. Etapa de conminución**

Esta operación tiene por objetivo reducir el tamaño del mineral permitiendo producir partículas de un cierto tamaño y forma para facilitar la separación de los minerales de interés sobre la ganga y así posibilitar la concentración de minerales específicos e incrementar el área superficial disponible para alguna reacción química necesaria en operaciones futuras (Diaz, 2012).

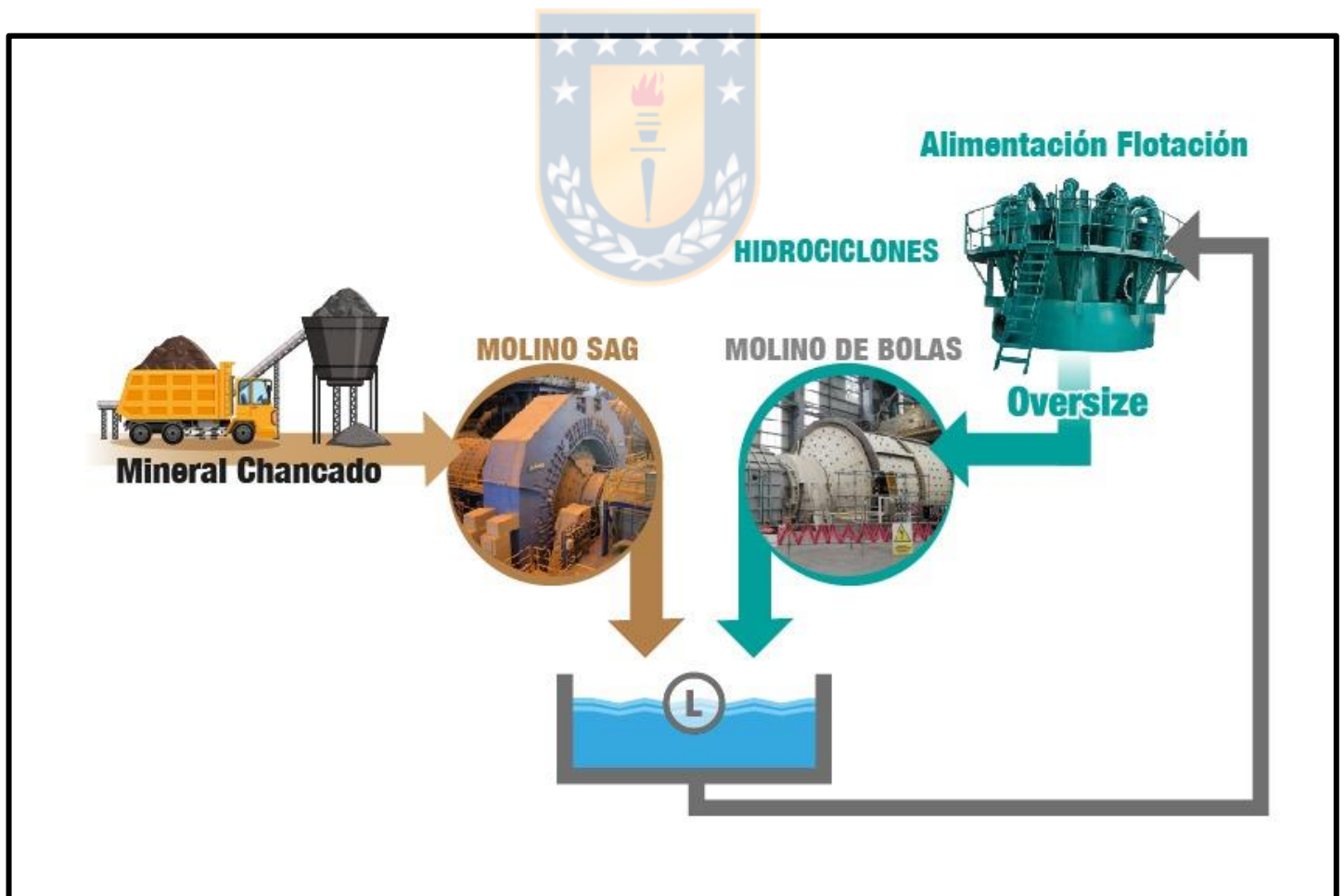
En la conminución se identifican dos grandes etapas: chancado y molienda. Como se mencionó anteriormente, el chancado es la primera parte del proceso de conminución cuyo objetivo es disminuir el tamaño de los fragmentos de roca a un diámetro de  $\frac{1}{2}$  pulgada ( $\sim 1,27$  cm). Generalmente es una operación en seco realizada en una, dos o tres etapas. El material proveniente de la mina puede alcanzar un tamaño de 1,5 metros de diámetro y el producto final requerido variará según la aplicación de que se trate. Las partículas gruesas que no alcancen el tamaño esperado son separadas por un harnero y retornadas al chancado (Diaz, 2012).

La molienda es una operación en húmedo y usualmente realizada en una o dos etapas en donde se continúa reduciendo el tamaño de los fragmentos hasta obtener una granulometría aproximada de  $180 \mu\text{m}$  ( $0,18$  mm), no obstante, el diámetro de la partícula variará según sea la liberación requerida para el mineral en cuestión.

Existe un tipo de molienda en particular, conocida como molienda SAG, utilizada cuando el material es lo suficientemente duro para llevar a cabo parte de la trituración. El mineral proveniente del chancado es mezclado con agua y cal y es ingresado a los molinos semi autógenos (SAG) que tienen como principal mecanismo de reducción de tamaño el impacto y la abrasión. El material se

reduce gracias a la acción de los mismos fragmentos (de aquí el término semi autógeno) y por el movimiento de numerosas bolas de acero que se desplazan en caída libre a medida que el molino gira (típicamente las bolas tienen un diámetro de 5 pulgadas y ocupan un 19% del volumen total del molino). A continuación, el mineral es alimentado a molinos de bolas que contienen un 34% del volumen total del molino con bolas de acero.

La molienda debe asegurar que las partículas finales sean lo suficientemente finas para una concentración eficiente, por lo que, si es necesario, las partículas gruesas que no alcanzan el tamaño adecuado deben ser nuevamente separadas (usualmente por hidrociclones) y recirculadas al sistema de conminución, mientras que la fracción fina es enviada directamente al proceso de flotación (Davenport et al., 2002).



**Figura 4.2:** Diagrama de flujo del proceso de conminución.

#### 4.2.2. Etapa de flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico que aprovecha las diferencias en las propiedades superficiales de las partículas sólidas para separar y concentrar el mineral de interés (Nguyen y Schulze, 2004).

La concentración por flotación se apoya en la diferencia de hidrofobicidad de las partículas minerales. En la naturaleza pocos minerales presentan una hidrofobicidad natural y por lo tanto flotan directamente. Al contrario, la mayoría de los minerales son hidrofílicos, de manera que es necesario añadir químicos para producir una superficie hidrófoba.

Los químicos anteriormente mencionados son llamados colectores y su principal rol es adherirse selectivamente sobre la superficie de un mineral y provocar hidrofobicidad en la superficie de las partículas que serán flotadas. Para lograrlo el colector debe ser heteropolar o contener al menos dos grupos funcionales: una cadena apolar (hidrocarburos) y una parte polar (o iónica) que se incorpore química o electrostáticamente a la superficie del mineral hidrofílico (Yianatos, 2005).

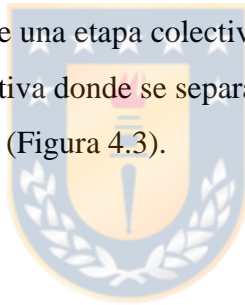
Un buen desempeño del proceso de flotación depende de la adsorción selectiva del colector, facilitando la adhesión de la partícula a la burbuja y el transporte del agregado hasta la superficie. Otros reactivos utilizados para mejorar la flotación son:

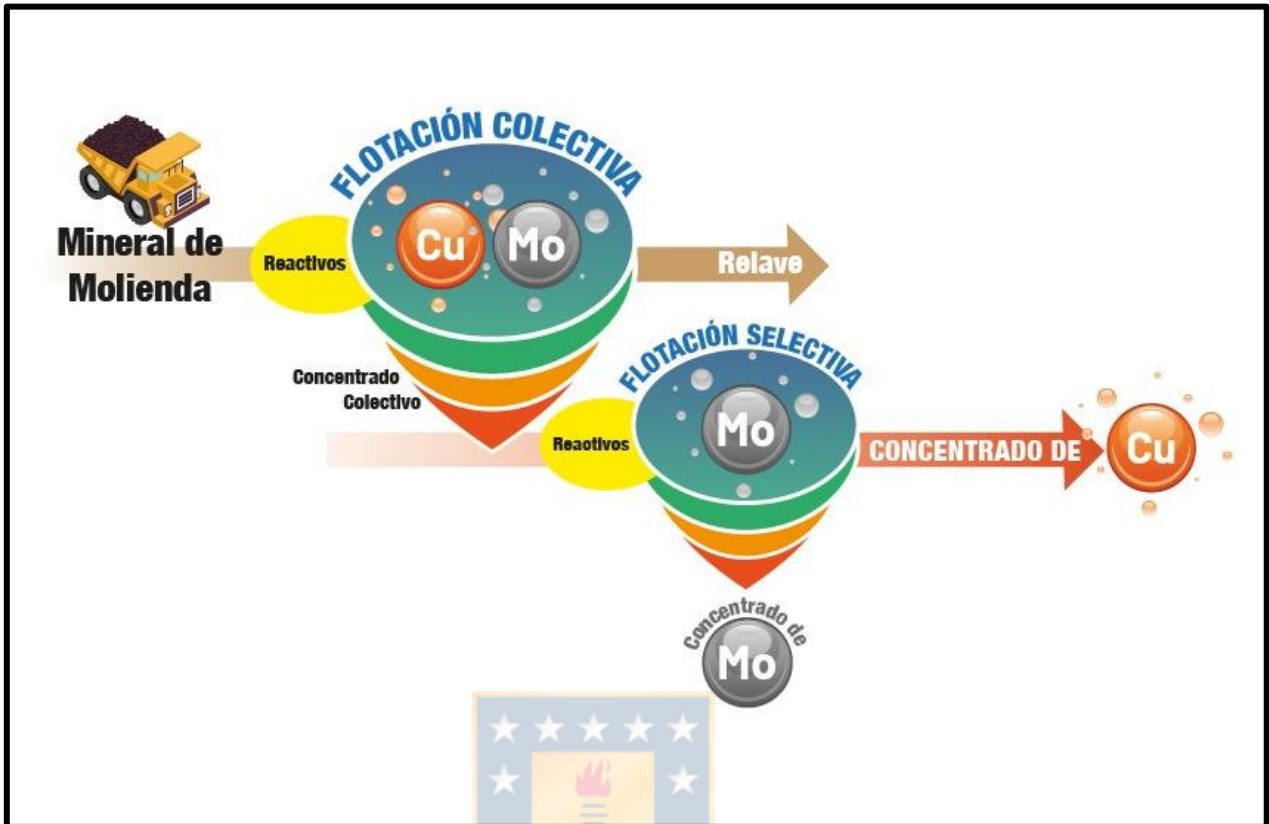
- Espumantes: Contribuyen a la formación de una espuma estable y burbujas de tamaño adecuado con la adición de aire disperso que contribuye a llevar los minerales hasta el concentrado (Davenport et al., 2002).
- Depresantes: Tienen como función inhibir la adsorción del colector en la superficie de aquellos minerales que no son valiosos para el proceso (ganga).

- Activadores: Su función es preparar y/o acondicionar la superficie del mineral a concentrar y así fortalecer la unión entre el colector y la superficie de los minerales (Yianatos, 2005).
- Modificadores: Estos compuestos regulan la química de la solución dispersando o aglomerando las partículas de la pulpa (Vianna, 2004).

En el caso de Minera Los Pelambres existe más de una especie mineralógica de interés, por lo tanto, es necesario introducir más de un circuito de flotación con la finalidad de realizar eficientemente la separación entre ellos.

De esta manera, el proceso general de flotación de un pórfido cuprífero enriquecido con sulfuros de molibdeno considera inicialmente una etapa colectiva donde se flotan los minerales de cobre y molibdeno; y luego, una etapa selectiva donde se separan ambas especies, flotando la molibdenita y deprimiendo los sulfuros de cobre (Figura 4.3).





**Figura 4.3:** Flotación de un pórfido cuprífero enriquecido con Molibdeno.

El proceso de flotación colectiva se inicia con la flotación primaria o *rougher*, donde la pulpa proveniente de la molienda es mezclada con agua, cal y espumantes favoreciendo la flotación de las partículas sulfuradas de interés. Desde el fondo de las celdas de flotación se inyecta aire al sistema, generando burbujas que capturan las partículas de mena que son arrastradas hacia la superficie concentrándose en forma de espuma (Figura 4.4). Posteriormente el aumento en el nivel de la espuma genera un rebase en el borde de la celda y el concentrado es capturado por canaletas que lo conducen hacia las etapas siguientes.



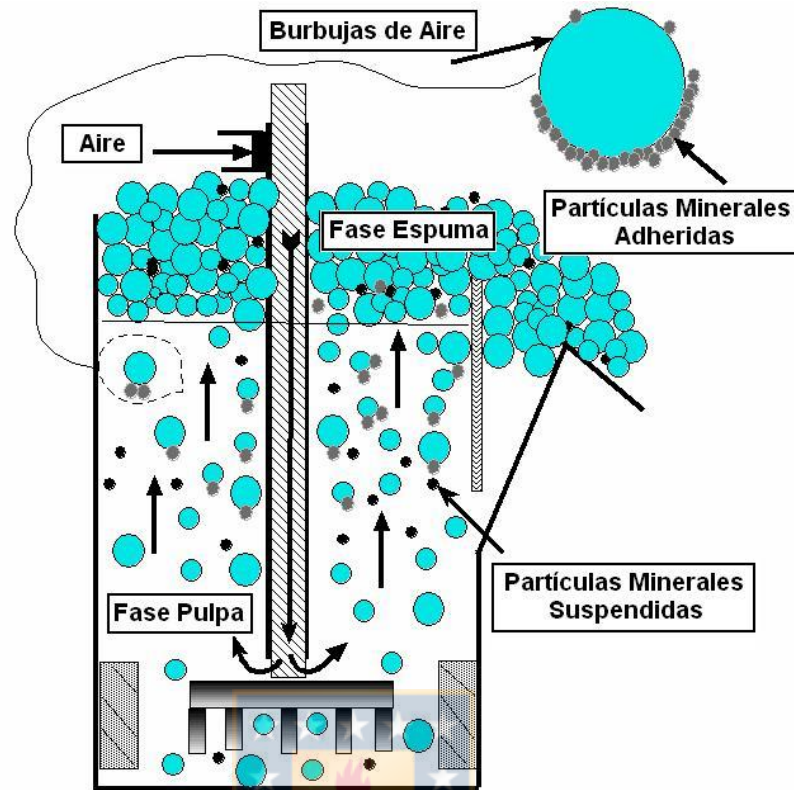


Figura 4.4: Representación esquemática del proceso de flotación (Vianna, 2004).

Luego, en la siguiente etapa llamada flotación *cleaner*, los minerales estériles (pirita, silicatos, etc.) provenientes de la etapa de concentrado *rougher*, son fuertemente deprimidos para dar un concentrado de Cu-Mo de alta calidad. La última y tercera etapa se conoce como flotación *scavenger* y tiene por misión hacer un repaso colectivo de las especies descartadas en etapas anteriores.

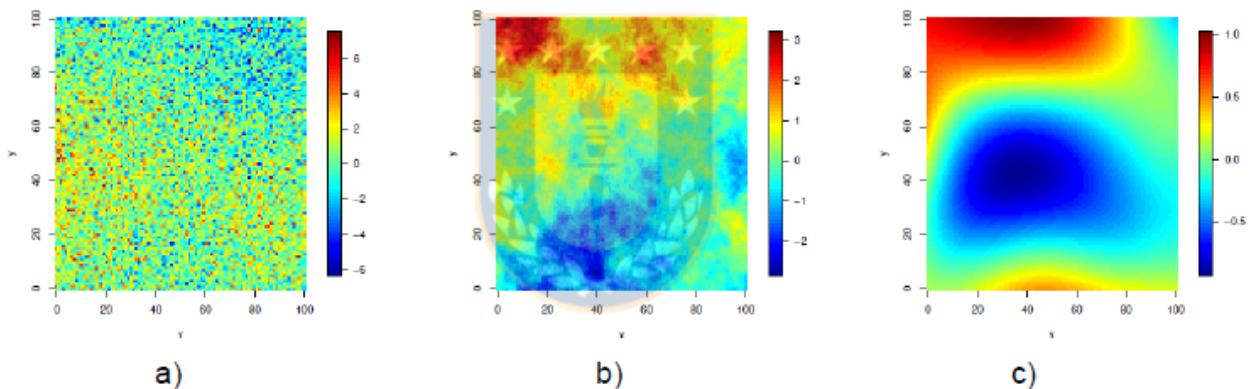
En la etapa de flotación selectiva, se produce un concentrado rico en molibdeno y otro en cobre. En este momento los sulfuros de cobre son deprimidos y retirados, en cambio, los sulfuros ricos en molibdeno son flotados.

Finalmente, las colas o relaves de la flotación selectiva se unen con el relave *rougher* constituyendo el relave final, este es enviado a los espesadores de relaves para recuperar el agua contenida en

ellos antes de ser llevado a los depósitos de relaves. Por su parte, el concentrado de cobre y molibdeno es bombeado a través del concentraducto hacia su terminal de embarque en el Puerto Punta Chungo.

### 4.3. GEOMETALURGIA

En la evaluación de yacimientos es importante identificar y conocer a cabalidad las cualidades geológicas, metalúrgicas y geoquímicas que controlan el yacimiento, así como también su continuidad espacial (Figura 4.5).

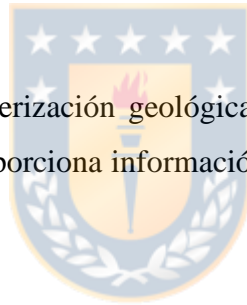


**Figura 4.5:** Representación de continuidad espacial donde: a) escenario con baja continuidad. b) escenario con continuidad espacial irregular. c) escenario con alta continuidad espacial. (Fustos, 2017).

Reconocer como se distribuyen las características de interés en una región determinada no es el único atributo fundamental durante el proceso minero, ya que existen otros factores que pueden condicionar la viabilidad económica y operacional de los proyectos. En ocasiones estos factores tienen estrecha relación con las características geológicas y metalúrgicas de los depósitos. La geometalurgia estudia la incorporación de estos aspectos en diversos modelos que relacionan propiedades intrínsecas de la roca con su respectiva respuesta metalúrgica.

La geometalurgia, durante el planteamiento minero, precisa las distintas propiedades de los minerales que contribuyen a establecer de manera cierta el valor de un recurso. Algunas de estas variables corresponden a:

- Ley económica de los elementos principales.
- Concentración elementos perjudiciales.
- Recuperación metalúrgica.
- Índice de dureza.
- Consumo de reactivos.



Por lo tanto, relacionar una caracterización geológica del depósito combinada con un modelo geometalúrgico del yacimiento proporciona información valiosa para establecer las directrices de funcionamiento de la planta.

Como se mencionó anteriormente, a pesar de existir una amplia gama de variables, el alcance de esta investigación se restringe netamente al proceso de concentración, en particular, a las etapas de molienda y flotación. El proceso de concentración dentro de toda la operación minera resulta ser una etapa fundamental, pues en la molienda se concentra la mayor parte de la energía invertida y, por otra parte, una molienda inadecuada gatillaría una flotación deficiente que repercutiría directamente en la calidad y ley del concentrado obtenido al final del proceso.

Para caracterizar ambas etapas se utilizará la información obtenida de los ensayos metalúrgicos de las muestras in situ. Las pruebas de molienda serán representadas a través de la variable *Bond Work Index*, la cual permite hacer una estimación de la energía necesaria utilizada a lo largo del proceso de molienda en los molinos de bola. Y por su parte, para las pruebas de flotación se utilizarán las

variables de recuperación de 150, 180 y 210  $\mu\text{m}$ . Ambos parámetros son determinantes en el modelamiento geometalúrgico y para la predicción de rendimiento durante los procesos de molienda y flotación respectivamente y, por lo tanto, se ajustan a las variables que se busca correlacionar con distintas características geológicas de la zona.

#### 4.3.1. Bond Work Index

La Teoría de la Conminución, también conocida como la Teoría de Bond, fue publicada por Fred Bond en 1961. Desde entonces el índice de Bond ha sido uno de los parámetros aplicados en la industria a nivel mundial para predecir el consumo energético en la molienda de minerales.

El Bond *Work Index* es el parámetro indicador de la resistencia que ofrece una determinada mena a la trituración y la molienda. Su valor es obtenido mediante un ensayo estándar de moliendabilidad a escala utilizando un molino de bolas de laboratorio de dimensiones internas de 12 pulgadas de diámetro por 12 pulgadas de largo, con esquinas redondeadas e interior liso.

Numéricamente representa los kilowatts-hora por tonelada corta requeridos para reducir un material desde un tamaño teóricamente infinito hasta un tamaño tal que cruce un 80% de este. El índice de Bond es obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$Wi = \frac{44.5}{P^{0.23} * G^{0.82}} * \left( \frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right)^{-1}$$

(Ecuación 1)

Siendo:

$W_i = \text{Work Index}$  o Índice de trabajo de Bond (kWh/tc)

$P =$  Dimensión malla de salida ( $\mu\text{m}$ ).

$G =$  Gramos del producto nuevo por revolución.

$\sqrt{P80} =$  Tamaño de matiz que da un pasante del 80% del producto ( $\mu\text{m}$ ).

$\sqrt{F80} =$  Tamaño de matiz que da un pasante del 80% de la alimentación ( $\mu\text{m}$ ).

El parámetro Bond *Work Index* depende tanto del material (resistencia a la conminución) como del equipo de conminución utilizado, debiendo ser determinado experimentalmente (a escala de laboratorio) para cada aplicación requerida (Olmos, 2018). Ya que, si el material se comportase de manera homogénea ante la reducción de tamaño, el valor de su índice de trabajo se mantendría constante en las sucesivas etapas de conminución, pero en la práctica los materiales frecuentemente son heterogéneos en su estructura.

La ecuación 1 es utilizada para determinar el índice trabajo operacional para un proceso de conminución existente, que puede servir para comparar la alimentación de tipos minerales o evaluar el rendimiento del chancado o molienda en términos relativos.

En la Tabla 4.1 se muestran algunos valores promedio del ensayo de Bond *Work Index* para algunas rocas y minerales seleccionados. El error asociado a un ensayo de moliendabilidad para un laboratorio, según el procedimiento estandarizado de Bond (1961), es del orden de un  $\pm 4 \%$  (Mosher y Tague, 2001).

**Tabla 4.1:** Valores promedio BWI para rocas y minerales seleccionados (Olmos, 2018).

<b>Material</b>	<b>Bond <i>Work Index</i> (kWh/tc)</b>
Barita	7,6

Arcilla	8,6
Dolomita	13,7
Carbón	13,8
Caliza	14,1
Feldespato	14,2
Cuarzo	15,5
Mineral de Cobre	15,9
Granito	17,4
Mineral de Hierro	18,7
Basalto	24,7

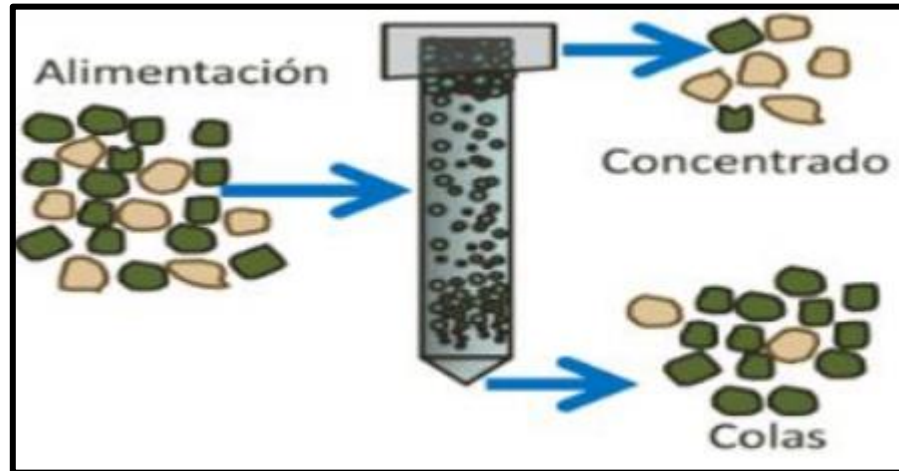
#### 4.3.2. Recuperación *Rougher*

La recuperación es un índice de eficiencia aplicada al proceso de flotación y se define como el cociente porcentual entre la masa del mineral de interés en el concentrado y la masa de este mismo mineral en la alimentación, tal como plantea la siguiente ecuación:

$$Recuperación = \frac{Masa\ concentrado\ (alimentación - cola)}{Masa\ alimentación\ (concentrado - cola)} \times 100 [\%]$$

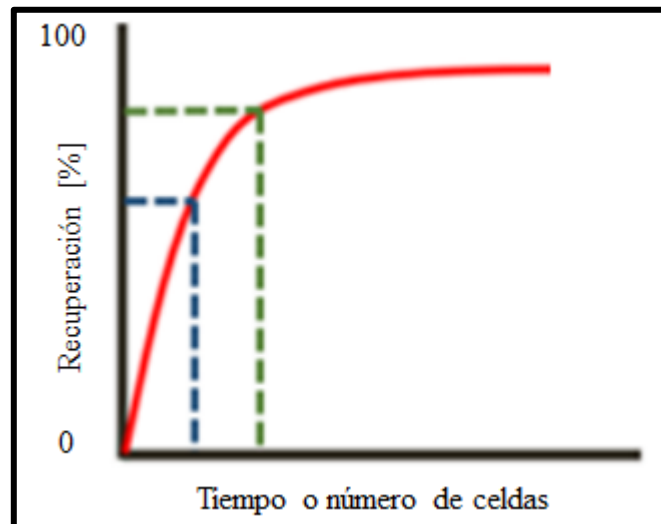
(Ecuación 2)

Mediante la relación anterior se entiende que la recuperación es mayor cuando la mena presente en el canal de alimentación es mayormente rescatada en el concentrado y en menor cantidad en la cola o relave (Figura 4.6).



**Figura 4.6:** Representación gráfica del concepto de recuperación metalúrgica. Las partículas cafés corresponden al mineral de interés, mientras que las verdes a la ganga. (Ruíz, 2017).

Complementando lo anterior, las celdas *rougher* buscan maximizar la recuperación metalúrgica, por tanto, a mayor número de bancos de celdas, la recuperación será mayor (Figura 4.7). Sin embargo, al momento de evaluar el desempeño metalúrgico del proceso de flotación, es ideal considerar simultáneamente la recuperación, ley y tiempo.



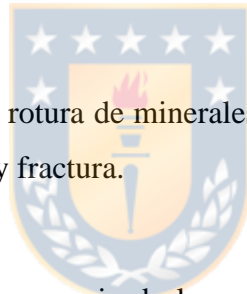
**Figura 4.7:** Variación de la recuperación en función del tiempo. (Ruíz, 2017).

### 4.3.3. Variables mineralógicas que controlan la molienda

El proceso de conminución normalmente implica reducir rocas de tamaño métrico hasta partículas de dimensiones menores a 180  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, cerca de un 85% de la energía utilizada a lo largo del proceso es empleada cuando se reduce el material desde aproximadamente 20 mm hasta 100  $\mu\text{m}$ .

En base a lo anterior, es notorio que algunas variables mineralógicas perjudican el rendimiento óptimo de la molienda, pues inciden directamente en el consumo energético, dificultan el alcance del P80 buscado, varían la capacidad de tratamiento entre otras. A continuación, se enseñan algunas de las variables que afectan el desempeño metalúrgico asociadas a la investigación:

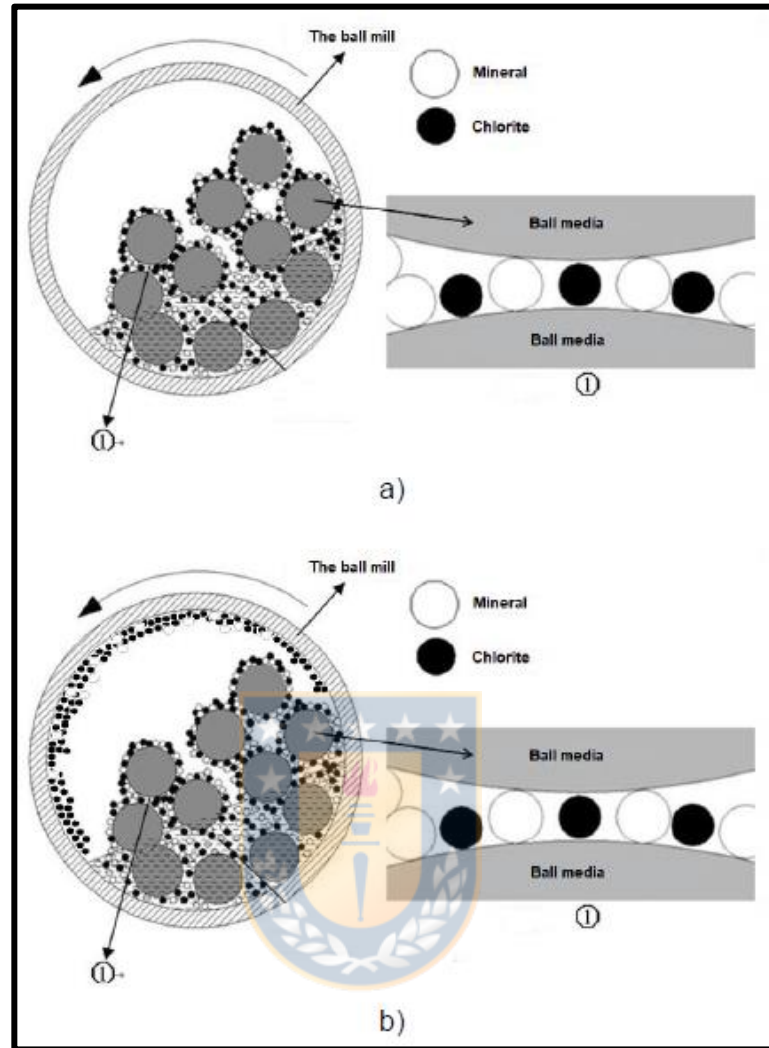
- Presencia de filosilicatos: la rotura de minerales laminares dentro de un molino ocurre de dos maneras: delaminación y fractura.



La delaminación ocurre como consecuencia de la separación a lo largo de los planos basales, rompiendo fuerzas iónicas y de Van der Waals, obteniendo como resultado la formación de láminas aún más delgadas. Este mecanismo de rotura es dominante durante los primeros minutos de molienda, posteriormente cuando las láminas ya se han vuelto lo suficientemente delgadas, el mecanismo de fractura toma protagonismo.

Los filosilicatos en general ofrecen una baja resistencia a la moliendabilidad, propiciando la formación de partículas finas y ligeras que arrastran consigo una ineficiencia en la capacidad efectiva de conminución a causa de la formación de aglomerados de comportamiento plástico que se adhieren a las paredes del molino o las mismas bolas que se encuentran dentro de dichos equipos. (Figura 4.8).





**Figura 4.8:** Diagrama esquemático del mecanismo de blindaje de la clorita: a) Bolas del molino b) Paredes del molino (Zhao, 2017).

- Texturas:

La configuración cristalina originada a partir de un fundido está controlada por la interacción de fenómenos químicos y físicos que van variando a través del tiempo. De manera global el tamaño de los cristales está estrechamente relacionado al grado de sobre-enfriamiento, mientras que la forma dependerá del grado de saturación.

En condiciones normales de saturación y enfriamiento, los primeros cristales formados tendrán el espacio para desarrollarse completamente y mostrarán una clara tendencia a la minimización de la energía en el sistema consiguiendo cristales con caras planas. Luego, cuando los cristales se han desarrollado lo suficiente según sus condiciones, tanto en tamaño como cantidad, la forma de los nuevos cristales estará condicionada por el espacio ocupado de los cristales preexistentes y de la energía residual dentro del sistema.

Particularmente el estudio de Oyarzún y Arévalo (2011) relaciona la petrografía con el índice de trabajo de Bond, de modo que establecieron rangos de valores en función de las texturas presentes en las rocas del yacimiento El Teniente. La investigación indica que las unidades caracterizadas que presentan bordes rectos entre sus cristales mostraban valores de Bond *Work Index* bajos (entre 10 y 13 kWh/t), en tanto las unidades cuyos cristales enseñan bordes sinuosos o con alta superficie de contacto exhiben mayores valores (sobre 15 kWh/t).

- Porcentaje de sólidos: El porcentaje de sólidos tiene directa influencia en el consumo específico de energía, así como también el tamaño granulométrico.

Estudios como el de Kawatra (2006) han demostrado que al aplicar una misma cantidad de energía a un material con mayor porcentaje de sólidos genera una menor granulometría a diferencia de otro material con un porcentaje menor de sólidos. Lo anterior estaría condicionado principalmente por el aumento en la probabilidad de impacto entre los medios de molienda y el mineral. (Figura 4.9)

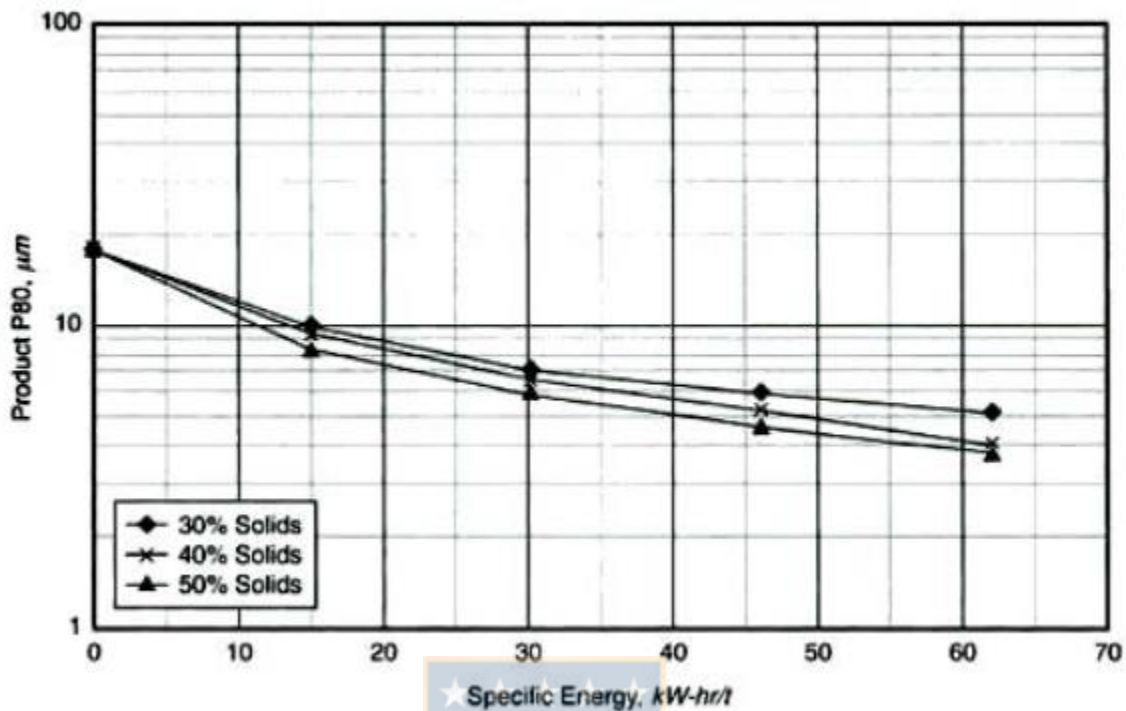


Figura 4.9: Efecto del porcentaje de sólidos en los productos de molienda. (Kawatra, 2006).

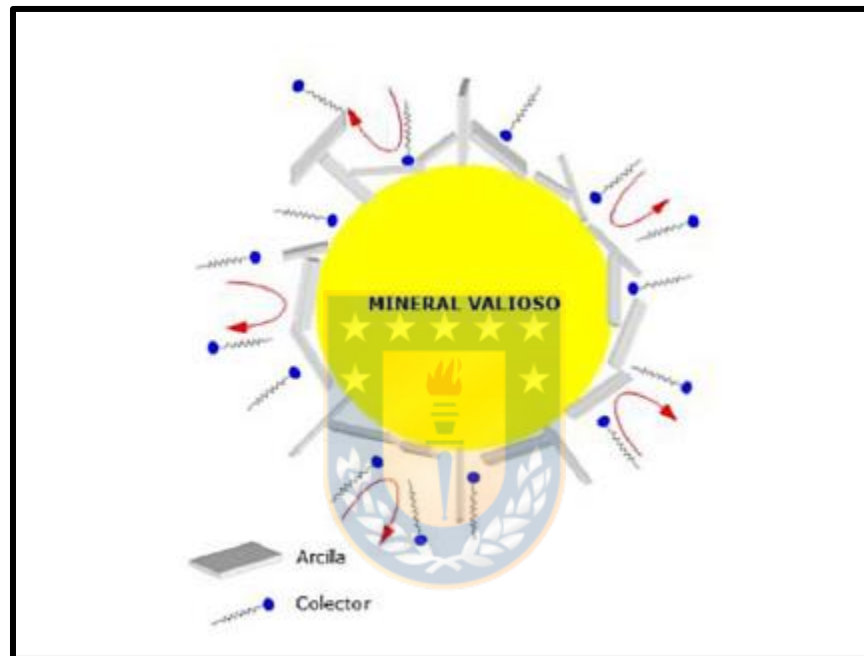
Como fue expuesto anteriormente, la molienda tiene un efecto beneficioso a lo largo del proceso pues al reducir la granulometría del mineral se favorece la liberación de las especies de interés y por consiguiente el proceso de concentración. No obstante, moler a tamaños ultrafinos tiene un efecto contraproducente para la flotación, ya que disminuye la recuperación durante la operación.

#### 4.3.4. Variables mineralógicas que controlan la flotación

La flotación es un método fisicoquímico de concentración de especies minerales que se basa en la diferencia entre las propiedades físicas superficiales de las especies de interés y la ganga. La mineralogía está fuertemente ligada al proceso productivo, de tal forma que determinar la presencia de algún mineral nocivo para el proceso, es indispensable para planificar de manera óptima el tratamiento del material. Alguna de las variables que afectan la recuperación de mena en torno a esta investigación:

- Efecto *slime coating*:

El efecto *slime coating* ocurre cuando las partículas valiosas gruesas se recubren total o parcialmente por una capa de arcillas hidrofílicas reduciendo la hidrofobicidad de la partícula e impidiendo la acción del colector (Figura 4.10).



**Figura 4.10:** Ilustración del efecto *slime coating*. (Cortés, 2016).

Este fenómeno es resultado principalmente por las fuerzas electrostáticas atractivas presentes entre las partículas de los metales y las de arcilla. Cabe destacar que las arcillas presentan un comportamiento anisotrópico, lo que implica que tienen planos claramente diferenciados. Adicionalmente se debe tener en cuenta la dependencia del pH, pues la carga superficial de la arcilla irá variando junto a él, tomando un rol fundamental en las interacciones de partículas de interés y arcillas (Zhao, 2017).

- Cambios en los comportamientos reológicos de suspensiones:

La presencia de partículas finas provoca variaciones en la viscosidad de la pulpa debido a la floculación de estas partículas. Un aumento en la viscosidad de la pulpa inhibe la posibilidad de colisión partícula-burbuja, pues el líquido que las separa dificulta su desplazamiento. Adicionalmente, un aumento en la viscosidad de la pulpa impide la movilidad de los agregados hacia la superficie de la celda, y, en consecuencia, disminuya la recuperación.

Estudios indican que los cambios reológicos de la pulpa generan problemas de magnitudes similares a la disminución en la recuperación generada por el efecto *slime coating*.

- Consumo de reactivos y efecto sobre la estabilidad de la espuma:

La acción de los reactivos sobre minerales arcillosos es uno de los factores principales que inciden sobre el proceso de flotación. La presencia de filosilicatos disminuye la concentración de los reactivos disponibles para captar partículas valiosas. En especial, si se identifican arcillas expansibles, como esmectitas, por ejemplo, parte de los reactivos (colectores) favorecerán la interacción de estas con las burbujas en ascenso dentro de la celda. Así mismo, si una partícula es hidrofóbica se espera que la burbuja se una al mineral, en cambio, si una partícula es hidrofílica se moverá sobre la burbuja sin lograr atravesar el film líquido que la rodea y, por tanto, no se adhiera. Adicionalmente, la presencia y uso de diferentes reactivos (espumantes especialmente) afectan las características de este film generando efectos sobre la interacción partícula – burbuja, pues el espesor del film podría afectar la probabilidad de formación del agregado partícula – burbuja. (Finch et al., 2006).

- Presencia de pirita:

La pirita posee una flotabilidad natural que se ve incrementada ante la presencia de colectores y activadores, ya que provoca una respuesta electroquímica que disminuye la adsorción partícula-burbuja. Igualmente, la presencia de pirita propicia la formación de una cubierta hidrofílica de hidróxido férrico en la superficie de la pirita y posteriormente ocurre la oxidación de esta, dificultando aún la adsorción del colector a mayores tiempos de residencia del material.

## **5. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS**

### **5.1. GENERALIDADES**

El desarrollo de esta investigación involucra una fuerte componente estadística, de manera que es necesario mencionar las técnicas y métodos estadísticos utilizados. En virtud del gran volumen de datos disponibles y las numerosas variables a analizar, se hace útil la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes que permitan procesar la información y contrastar el comportamiento de las diferentes variables en conjunto.

En base a lo mencionado en el párrafo anterior, el procedimiento escogido en esta memoria de título considera la aplicación de un Análisis de Componentes Principales (ACP), técnica utilizada para reducir la dimensionalidad de un gran conjunto de datos y orientar el estudio hacia aquellas variables más relevantes.



### **5.2. MEDIDAS DE CENTRALIZACIÓN**

Este tipo de medidas nos permite identificar y ubicar el punto (valor) alrededor del cual se tienden a “reunir” los datos (punto central). Estas medidas aplicadas a las características de las unidades se les denomina estimadores, mientras que aplicadas a poblaciones se les denomina parámetros estadísticos. Los principales métodos utilizados para ubicar los datos son la media, mediana y moda.

#### **5.2.1. Media aritmética**

La media aritmética o promedio de un conjunto de datos es el valor que se obtiene al sumar todas las observaciones disponibles y dividir el resultado entre el número total de datos. Su principal desventaja radica en su sensibilidad al cambio de uno de sus valores o a los valores extremos demasiado grandes o pequeños.

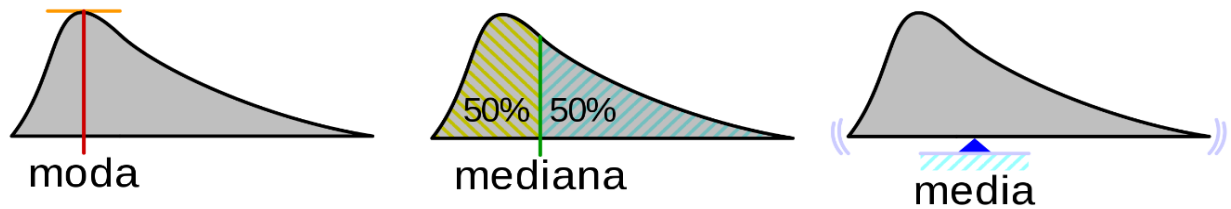
### **5.2.2. Mediana**

Con la mediana podemos identificar el valor en que se encuentra el centro de los datos, es decir, nos permite conocer el valor que se encuentra exactamente en la mitad del conjunto de datos y cuales se encuentran por debajo de este valor y por encima del mismo.

### **5.2.3. Moda**

La moda nos indica el valor que más veces se repite dentro de los datos, es decir, si tenemos la siguiente serie ordenada: (2, 2, 5 y 7), el valor que más veces se repite es el número (2), quien sería la moda de los datos.

Es posible que en algunas ocasiones se presente dos valores con la mayor frecuencia, en esos casos se denomina a la función bimodal o en otros casos cuando existen más de dos valores, se conoce como una función multimodal.



**Figura 5.1:** Visualización geométrica de la moda, mediana y media de una función arbitraria de densidad poblacional.

### 5.3. PARÁMETROS DE DISPERSIÓN

Así como las medidas de tendencia central nos permiten identificar el punto central de los datos, los parámetros de dispersión nos permiten reconocer que tanto se mueven los datos entorno al punto central, es decir, nos indica cuánto se desvían las observaciones alrededor de su media aritmética. Este tipo de medidas son parámetros informativos que nos permiten reconocer como los valores se reparten a través del eje X, mediante un valor numérico que representa el promedio de dispersión de los datos. Las medidas de dispersión más importantes y utilizadas son la varianza y la desviación estándar.

#### 5.3.1. Varianza

La varianza nos permite identificar la dispersión (diferencia promedio) dentro de un conjunto de datos. Este promedio es calculado, elevando cada una de las diferencias al cuadrado (con el fin de eliminar números negativos), y calculando su promedio o media, es decir, sumando todos los cuadrados de las diferencias de cada valor respecto a la media y dividiendo este resultado por el número de observaciones disponibles. Si el valor de la varianza es pequeño, significa que los valores del conjunto están bastante agrupados. Por el contrario, si el resultado de la varianza es mayor, quiere decir que los elementos dentro del conjunto que se analiza están dispersos.



### 5.3.2. Desviación estándar

La desviación estándar es la medida de dispersión más común y nos permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media. Esta medida nos da como resultado un valor numérico que representa el promedio que hay entre los datos y la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos. La variación aleatoria o natural de un proceso se conoce comúnmente como ruido.

### 5.3.3. Histograma

Un histograma es una representación gráfica de una variable o tabla de frecuencias en forma de barras que permite la comparación de los resultados de un proceso, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Generalmente en el eje vertical se representan las frecuencias y en el eje horizontal los valores de las variables.

Se utiliza cuando se estudia una variable continua, tal como la resistencia a la fractura o recuperación de una muestra, y, por comodidad, sus valores se agrupan en clases, es decir, valores continuos. En los casos en los que los datos son cualitativos (no numéricos), como la alteración o zonas minerales, es preferible un diagrama de sectores.

Adicionalmente, los histogramas ayudan a caracterizar muy bien la distribución, ayudado a detectar (Figura 5.2):

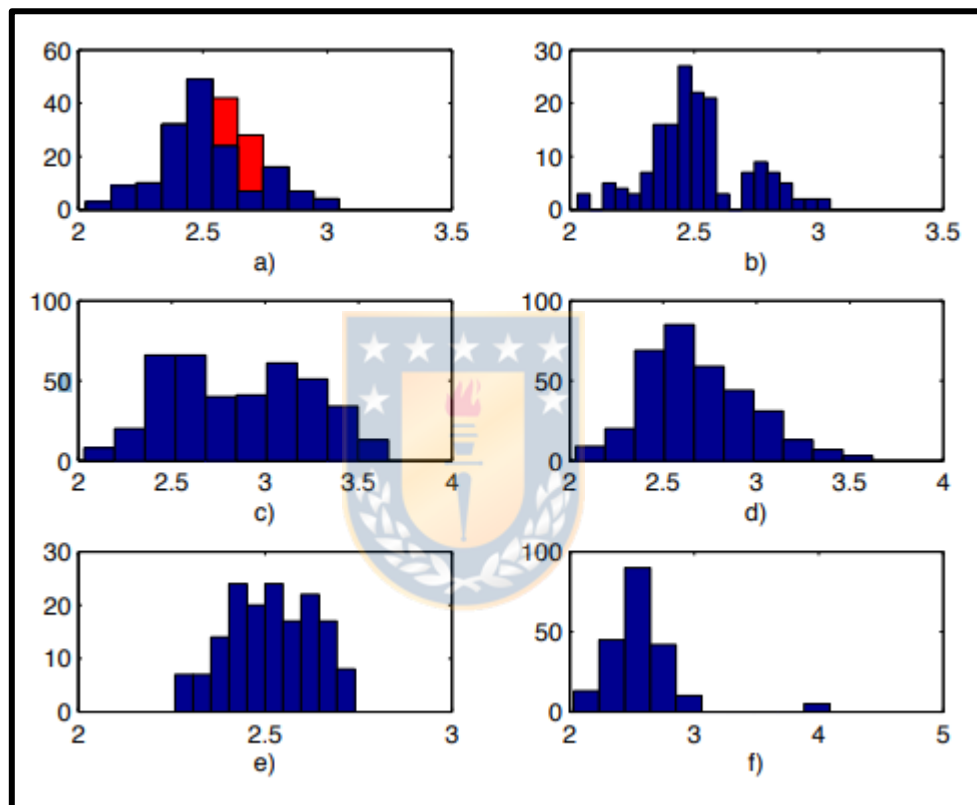
- a) Frecuencia anómala de un valor
- b) Medidas inconsistentes

c) Mezcla de poblaciones distintas

d) Asimetría

e) Datos modificados

f) Datos anómalos



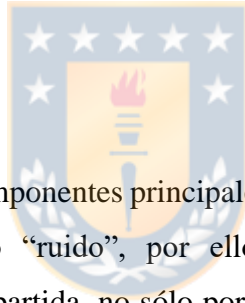
**Figura 5.2:** Representación de los tipos de anomalías que ayudan a detectar los histogramas. (Peña, 2002).

## 5.4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

### 5.4.1. Generalidades

El análisis de componentes principales (ACP) es un método estadístico multivariado de simplificación que permite transformar un conjunto de variables originales correlacionadas entre sí, en un conjunto sintético de variables no correlacionadas denominadas componentes principales. En esta transformación no se establecen jerarquías entre variables y se elimina la información repetida (Zapotitla, 2011). Las nuevas variables son combinaciones linealmente independientes de las variables originales, ordenadas de acuerdo con la representación de dispersión respecto al total de información.

La finalidad del ACP es reducir la dimensión de un conjunto de “p” variables a un conjunto “m” con un menor número de variables para mejorar la interpretación de los datos. Los Componentes Principales representan una combinación lineal de las variables originales, evidenciando el patrón de similitud de las observaciones y de los distintos parámetros en forma de puntos y vectores (Abdi y Williams, 2010).



Normalmente, sólo los primeros componentes principales contienen información útil, mientras que los últimos describen sobre todo “ruido”, por ello es conveniente estudiar los primeros componentes sobre el conjunto de partida, no sólo porque reduce la complejidad de la matriz de datos, sino también porque asegura que el “ruido” no sea confundido con información.

#### **5.4.2. Análisis de correlación simple**

Para estudiar la relación lineal existente entre dos variables continuas es necesario disponer de parámetros que permitan cuantificar dicha relación. Uno de estos parámetros es la covarianza, que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias.

La covarianza depende de las escalas en que se miden las variables estudiadas, por lo tanto, no es comparable entre distintos pares de variables. Para poder hacer comparaciones entre variables se

estandariza la covarianza, generando lo que se conoce como coeficientes de correlación. Existen diferentes tipos, entre los que destacan el coeficiente de Pearson, Rho de Spearman y Tau de Kendall.

Las principales diferencias entre estos coeficientes de asociación son:

- La correlación de Pearson funciona bien con variables cuantitativas que tienen una distribución normal. Es la más sensible a los valores extremos entre las tres alternativas.
- La correlación de Spearman se emplea cuando los datos son ordinales, de intervalo, o bien cuando no se satisface la condición de normalidad para variables continuas y los datos se pueden transformar en rangos. Es un método no paramétrico.
- La correlación de Kendall es otra alternativa no paramétrica para el estudio de la correlación que trabaja con rangos. Se emplea cuando se dispone de pocos datos y muchos de ellos ocupan la misma posición en el rango.

Cabe destacar que solo si la fuerza de asociación es significativa se puede concluir que existe una correlación real- Por muy cercano que sea el valor del coeficiente de correlación a +1 o -1, si no es significativo, se ha de interpretar que la correlación de ambas variables es 0, pues el valor obtenido puede deberse a simple aleatoriedad.

#### **5.4.3. Análisis de correlación múltiple**

El análisis de Correlación Múltiple tiene por finalidad cuantificar el grado de asociación lineal entre pares de variables, es nuestro caso, mediante el cálculo del coeficiente de Correlación de Pearson. Esta prueba mide la relación estadística entre dos variables continuas, si la asociación

entre los elementos no es lineal, entonces el coeficiente no se encuentra representado adecuadamente.

El coeficiente puede tomar un rango de valores del -1 a +1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor a 0 indica una asociación positiva, es decir, a medida que aumenta el valor de una de las variables, también lo hace el valor de la otra. Por su parte, un valor menor a 0 indica una asociación negativa, en otras palabras, a medida que aumenta el valor de una variable, el valor de la otra disminuye. En general, un coeficiente de correlación de  $\pm 0.7$  indica una asociación significativa entre dos variables, no obstante, esto varía según el número de muestras analizadas, pues la incrementar el número de muestras, los valores absolutos del coeficiente de Correlación de Pearson tienden a disminuir (Reimann et al., 2008).



#### 5.4.4. Análisis de Boxplot

Un *Boxplot* o diagrama de caja (Figura 5.3), es un gráfico representativo de las distribuciones de un conjunto de datos. En su construcción se usan cinco medidas descriptivas: mediana, primer cuartil, tercer cuartil, valor máximo y valor mínimo (Duncan, 1991). Esta presentación visual asocia las cinco medidas que suelen trabajarse de forma individual al mismo tiempo y permite identificar, con claridad y de forma particular los valores atípicos.

Por su facilidad de construcción e interpretación, también ayuda a comparar a la vez varios grupos de datos, sin perder información ni saturarse de ella.

La construcción de la caja implica el cálculo del primer cuartil (el máximo del 25% de los datos) y el tercer cuartil (máximo del 75% de los datos), así como de la mediana. El valor del límite inferior admisible se obtiene restando a la mediana el producto de 1,5 por el rango intercuartílico y, por otro lado, para conseguir el límite superior admisible se suma este mismo valor a la mediana.

Para dibujar los brazos o bigotes, se une el límite inferior con el primer cuartil y para el segundo, desde el tercer cuartil hasta el límite superior. Todos aquellos puntos que se encuentren fuera del límite admisible son valores extremos y pueden representar errores de medición o tabulación.

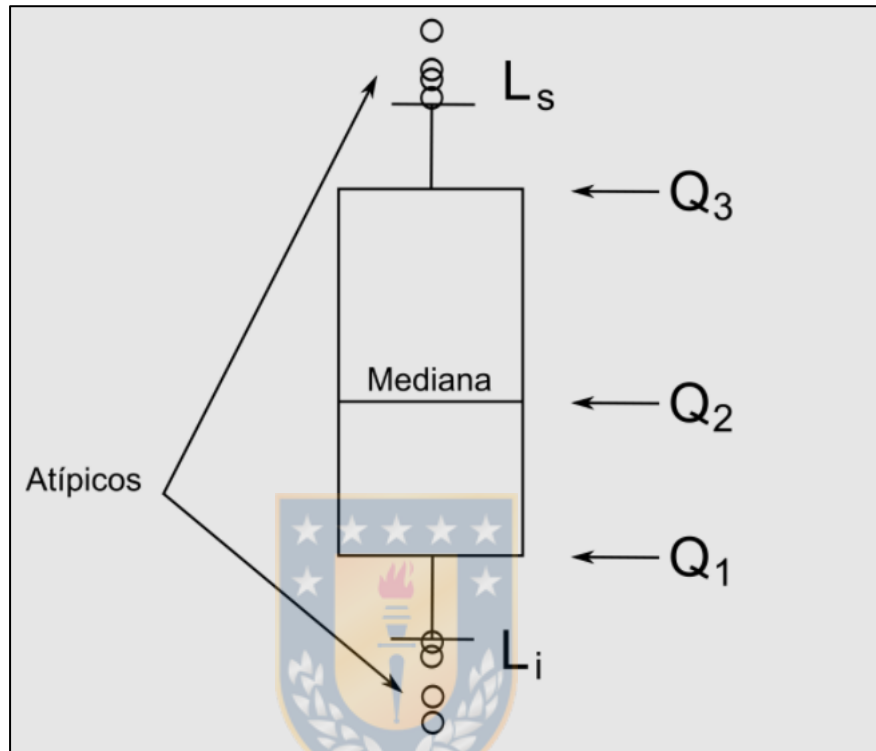
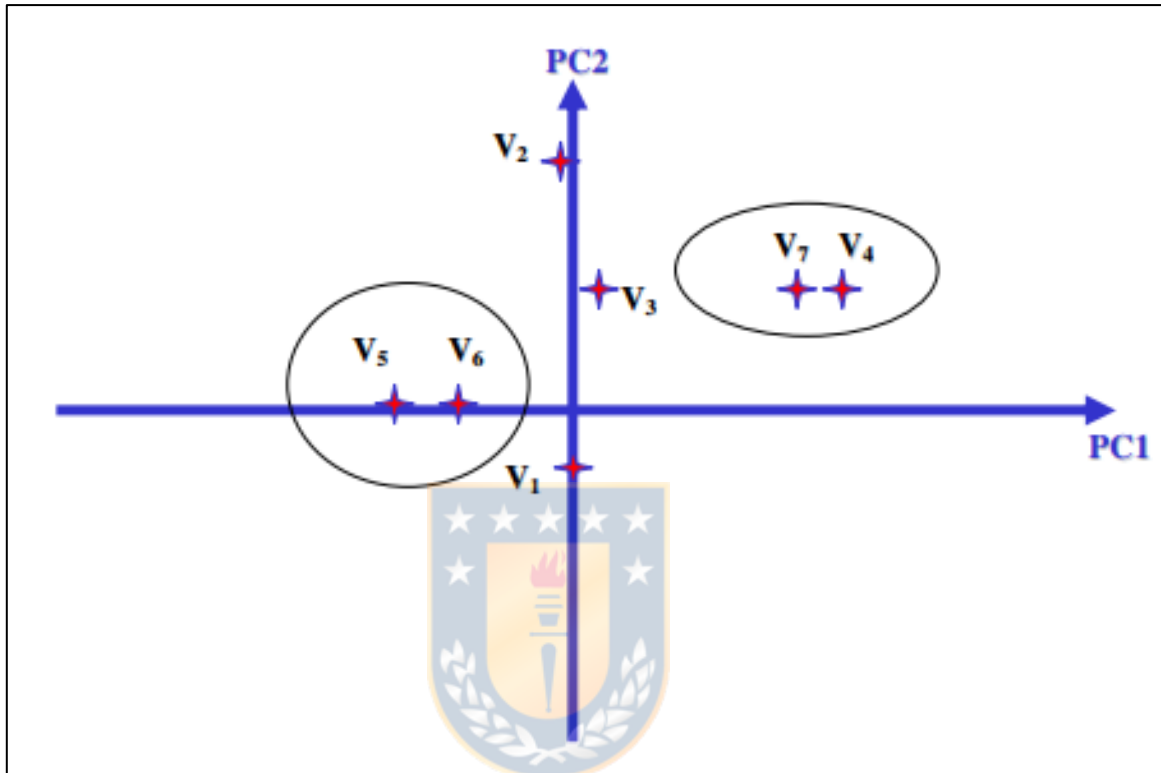


Figura 5.3: Ejemplo de *Boxplot*.

#### 5.4.5. Loading Plot

El *Loading Plot* es un gráfico que representa la trascendencia de las variables originales en cada uno de los componentes principales considerados en la modelación de ACP. Este tipo de gráfico permite indagar sobre la relación que existe entre las variables que componen el análisis, viendo si existen correlaciones positivas, negativas y además identificar cuáles son las variables que más influyen en los valores de cada componente principal.

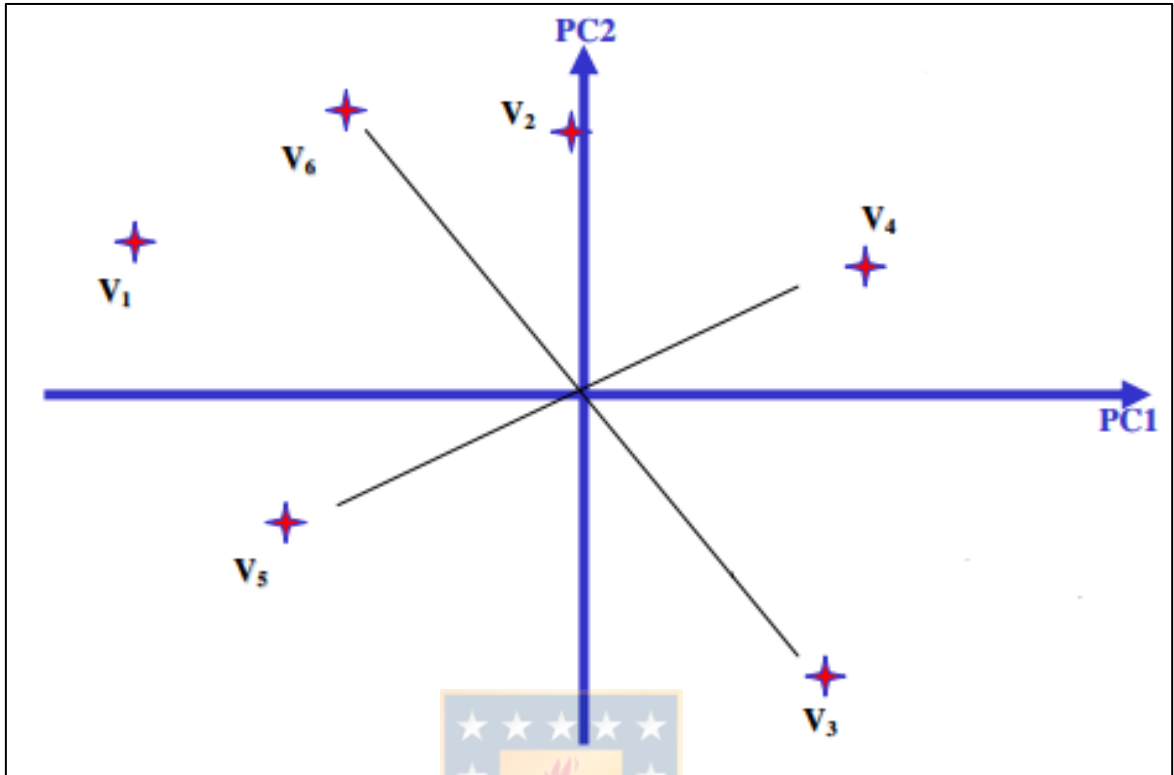
En los *Loading Plot*, cuando dos variables se encuentran cercanas significa que existe una correlación positiva entre ellas, como muestra la Figura 5.4, en este caso, V5 y V6 están correlacionadas positivamente, al igual que V4 y V7.



**Figura 5.4:** *Loading Plot*. Correlación positiva entre V5 y V6 y V4 y V7. Extraído de González, 2005.

Si dos variables se encuentran en lados opuestos con respecto al origen, como V4 y V5 y también V3 y V6 en el caso de la Figura 5.5, quiere decir que entre estos pares de variables existe una correlación negativa.

En cambio, cuando dos variables se encuentran en cuadrantes opuestos horizontal o verticalmente, como V5 y V6 o entre V1 y V4 quiere decir que entre estas variables no existe correlación.

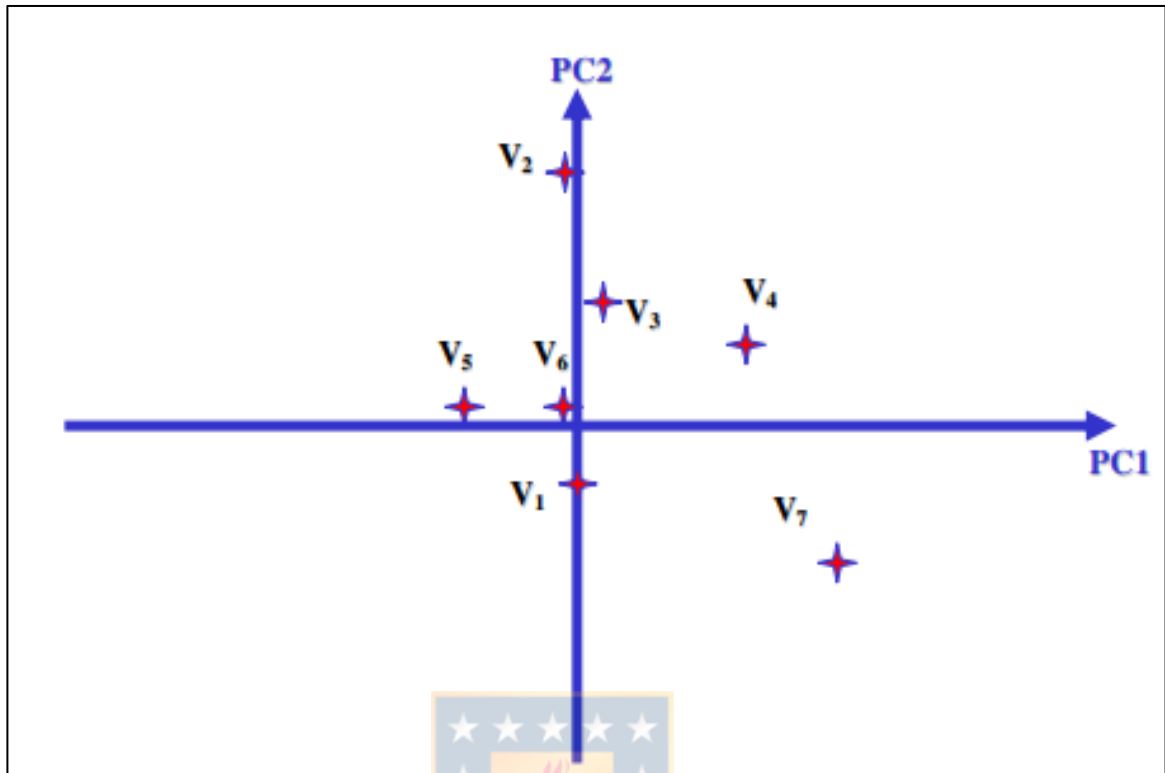


**Figura 5.5:** *Loading Plot* Correlación negativa entre V4 y V5 y V3 y V6. Sin correlación entre V5 y V6 y V3 y V4. Extraído de González, 2005.

Así mismo, mediante el gráfico de *Loading Plot* se puede establecer cuáles son las variables más influyentes, en tanto más alejadas se encuentren del centro mayor será su influencia en el ACP y mientras más cercano al origen estén menos influencia provocarán.

En la Figura 5.6 se puede apreciar que V2 es altamente influyente en la Componente Principal 2 de manera positiva, de igual manera V7 es la más influyente en la Componente Principal 1 positivamente y en la Componente Principal 2 de forma negativa.



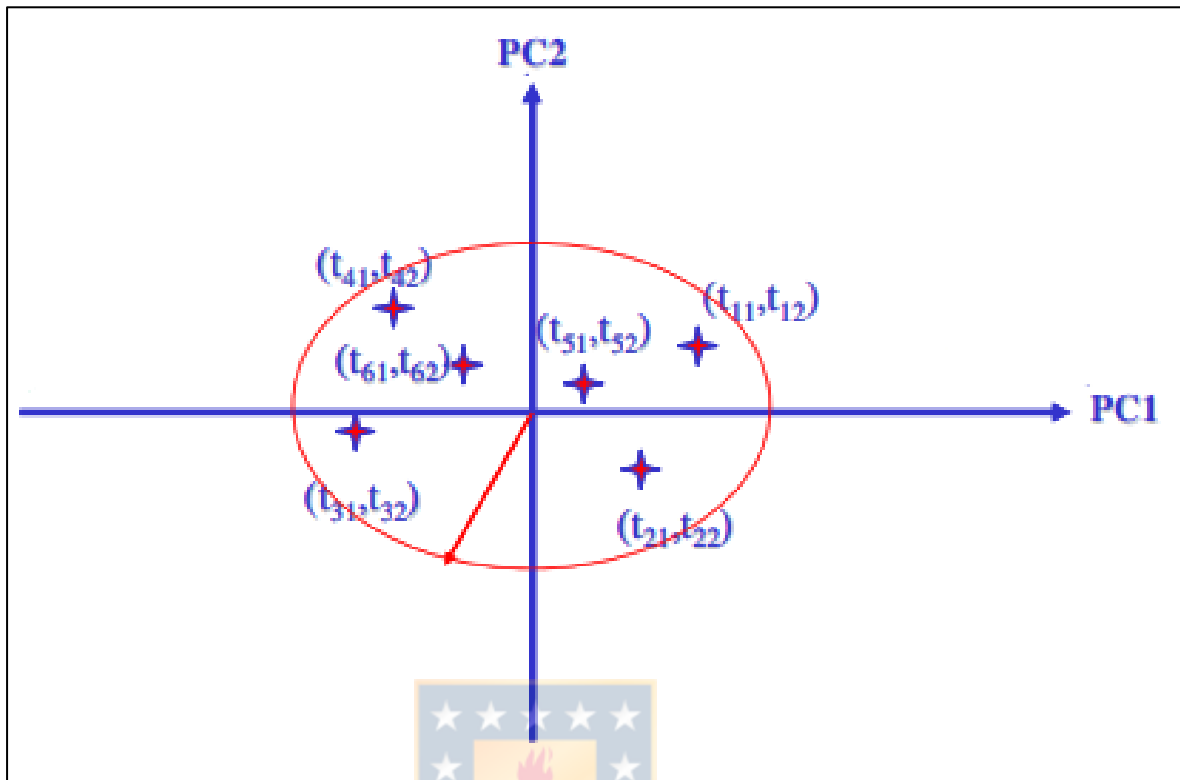


**Figura 5.6:** *Loading Plot* Variables más determinantes. Extraído de González, 2005.

#### 5.4.6. Score Plot

Un *Score Plot* (o gráfico de puntuaciones) es un gráfico que muestra la proyección de los datos en un subespacio. Típicamente se utiliza para interpretar las relaciones entre las observaciones y los componentes principales para determinar cuáles son los de mayor relevancia para la situación.

En la Figura 5.7 se observa un ejemplo de *Score Plot*, en ella se muestra la relación o “distancia estadística” que existe entre las observaciones y los Componentes Principales. Es útil para detectar “*outliers*” fuertes. Generalmente es un gráfico complementario al de *Loading Plot*.



**Figura 5.7:** *Score Plot* Relación entre variables y componentes principales. Modificado de González, 2005.



## 6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 6.1. PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

Para el desarrollo de esta investigación se utilizará una base de datos integrada facilitada por Minera Los Pelambres. En esta se incluyen datos geoquímicos, geológicos, metalúrgicos y la posición espacial de cada muestra.

Los datos geológicos incluyen litología, alteración y zonación mineral de cada muestra, mientras que los datos geoquímicos abarcan principalmente las leyes y mineralogía, por último, los datos metalúrgicos contienen valores de recuperación a distintos P80 (150, 180 y 210  $\mu\text{m}$ ) y valores de *Bond Work Index* obtenidos a partir de ensayos de laboratorio.

Los minerales incorporados en la base de datos son: cuarzo, biotita, clorita, arcillas, feldespato potásico, muscovita-sericita, anhidrita, calcita, anortita, apatita, calcopirita, covelina, bornita, calcosina, molibdeno, pirita, enargita e ilmenita.

La base considera 2.216 datos obtenidos a partir de muestras de testigos diamantino, cada uno de ellos georreferenciados según el tramo de sondaje del cual fue obtenido. Cabe destacar que la distribución de sondajes no es homogénea, sino que es orientada deliberadamente a ciertos blancos.

En ocasiones, por errores en medición o falta de masa, el valor obtenido no es representativo con sus respectivas características y se les asigna un valor arbitrario según sea el caso (ej.: -1 y -9). Aquellas muestras que contengan valores anómalos son apartadas para evitar ser considerados, quedando disponibles para el análisis de recuperación y molienda un total de 1.826 muestras.

Para realizar un estudio adecuado de los datos se requiere relacionar la recuperación y Bond *Work Index* con sus respectivas asociaciones geológicas. Por lo tanto, los datos contemplados en la base de datos integrada son:

- Identificación:
  - *Dhid*: Identificador único del sondaje.
- Posición:
  - *From*: Posición <desde> del sondaje. En metros.
  - *To*: Posición <hasta> del sondaje. En metros.
  - *Length*: Largo del sondaje. En metros.
  - *Bot*: Límite inferior del sondaje. En metros
  - *Mid*: Zona media del sondaje. En metros.
  - *Top*: Límite superior del sondaje. En metros.
- Geología:
  - *Lito*: Litología.
  - *Zonapy*: Zona de pirita.
  - *Alte*: Alteración.
  - *Minzon*: Zona mineral.
  - *Anhidr*: Ausencia/Presencia de anhidrita
  - *Mxl*: Mineralización.
- Recuperación:
  - *Rcu150*: Recuperación durante flotación *rougher* bajo un P80 de 150  $\mu\text{m}$ . En porcentaje.

- *Rcu180*: Recuperación durante flotación *rougher* bajo un P80 de 180  $\mu\text{m}$ . En porcentaje.
- *Rcu210*: Recuperación en flotación *rougher* bajo un P80 de 210  $\mu\text{m}$ . En porcentaje.
- *Bond Work Index*:
  - *Wi*: Valor del índice de trabajo. En kWh/t.
- *Leyes*:
  - Ley de cobre, molibdeno y hierro. En porcentaje.
  - Briquetas: Abundancia de sulfuros.

El número de datos por cada variable geológica se encuentra detallado en la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1:** Número de datos por cada tipo de variable geológica. a) Litología. b) Alteración. c) Zona mineral.

a) Litología	Código Texto	Número de datos (%)
Coluvio	COB	0 (0)
Pórfido Cuarzo Feldespático	PQF	36 (1,9)
Diorita Cuarcífera	DIQ	1302 (69,5)
Pórfido B	PB	60 (3,0)
Brecha magmática hidrotermal	BMH	182 (10,0)
Brecha hidrotermal	BH	99 (5,0)
Pórfido A	PA	37 (2,0)
Pórfido D	PD	35 (1,8)

Andesita	AND	129 (6,8)
Brecha Portezuelo	POR	0 (0)
<b>b) Alteración</b>		
Potásico Biotita	K-Bt	1622 (86,2)
Clorita Sericita	CS	48 (2,3)
Cuarzo Sericita	QS	208 (11,4)
Propilítica	EP	2 (0,1)
<b>c) Zona mineral</b>		
Coluvio	COB	0 (0)
Lixiviado Total	LT	2 (0,1)
Lixiviado Parcial	LP	66 (3,5)
Secundario	SEC	1071 (57,2)
Primario sin anhidrita	PSA	741 (39,2)

Respecto a las litologías que constituyen el yacimiento, Coluvio y la Brecha Portezuelo no tienen datos registrados, por lo tanto, serán omitidas. En cuanto a las alteraciones, la Propilítica contiene una baja cantidad de datos y será igualmente omitida. Con relación a la zona mineral, el Coluvio no presenta datos registrados y por consiguiente será omitido junto con la zona de Lixiviado Total.

En este estudio, para facilitar el análisis multivariado aplicado a la recuperación de cobre, solo se considerará la recuperación de 180  $\mu\text{m}$ , pues es la que tiene la correlación más alta entre ella y representaría la totalidad del proceso.

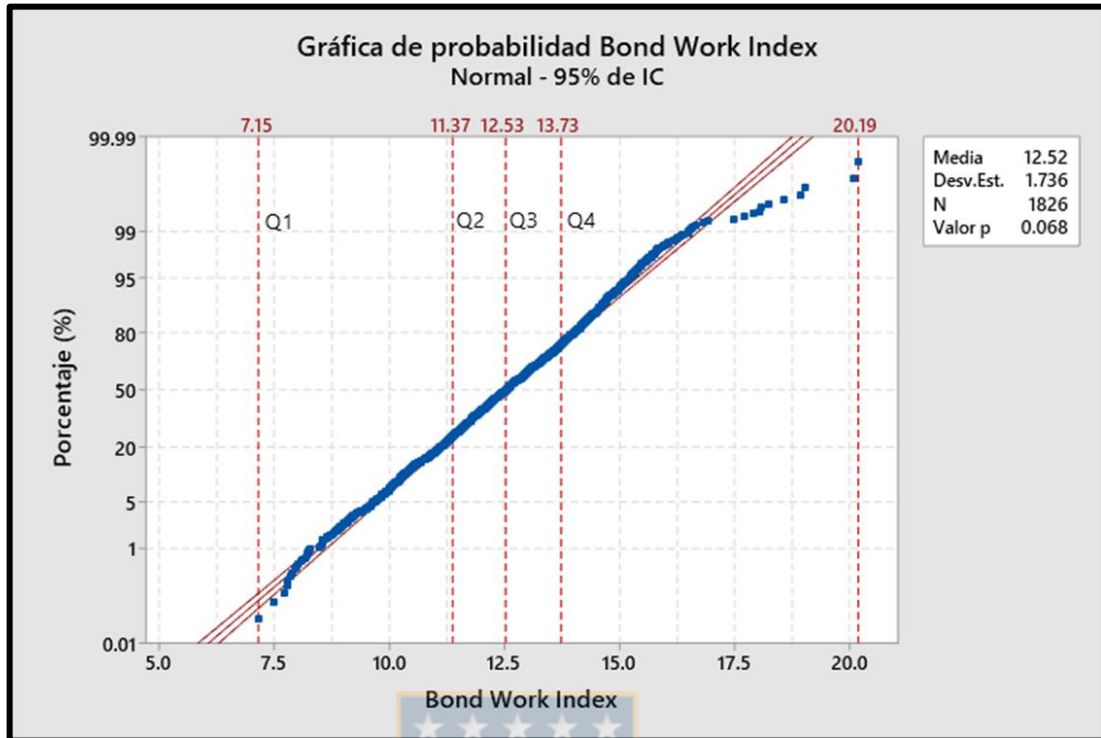
## 6.2 DATOS BOND WORK INDEX

Para definir e interpretar las herramientas entregadas por el Análisis de Componentes Principales, se procede a definir cuatro dominios de dureza a partir de las 1826 muestras disponibles. Mediante el gráfico probabilístico generado para la variable *Bond Work Index* (Figura 6.1), se puede apreciar que los datos presentan una distribución normal, ya que posee un nivel de significancia (p) menor a 0,05, haciendo posible realizar el análisis.

Se determinó separar las poblaciones en cuartiles, pues no existen quiebres importantes para destacar alguna población en específico. Según sus valores se separan en poblaciones de muy baja, baja, moderada y alta dureza. Los rangos de este índice se especifican en la Tabla 6.2:

**Tabla 6.2:** Poblaciones de *Bond Work Index* definidas para la interpretación del ACP.

<b>Población</b>	<b>ID</b>	<b>Rango BWI</b>	<b>Diferencia</b>
Muy baja	Q1	[7,15 , 11,37[	4,22
Baja	Q2	[11,37 , 12,53[	1,16
Moderada	Q3	[12,53 , 13,73[	1,2
Alta	Q4	[13,73 , 20,19]	6,46



**Figura 6.1:** Gráfico probabilístico de la variable BWI. Se muestra con una línea roja punteada en el límite de cada población de acuerdo con los rangos determinados. Los puntos azules representan cada una de las 1.826 muestras.

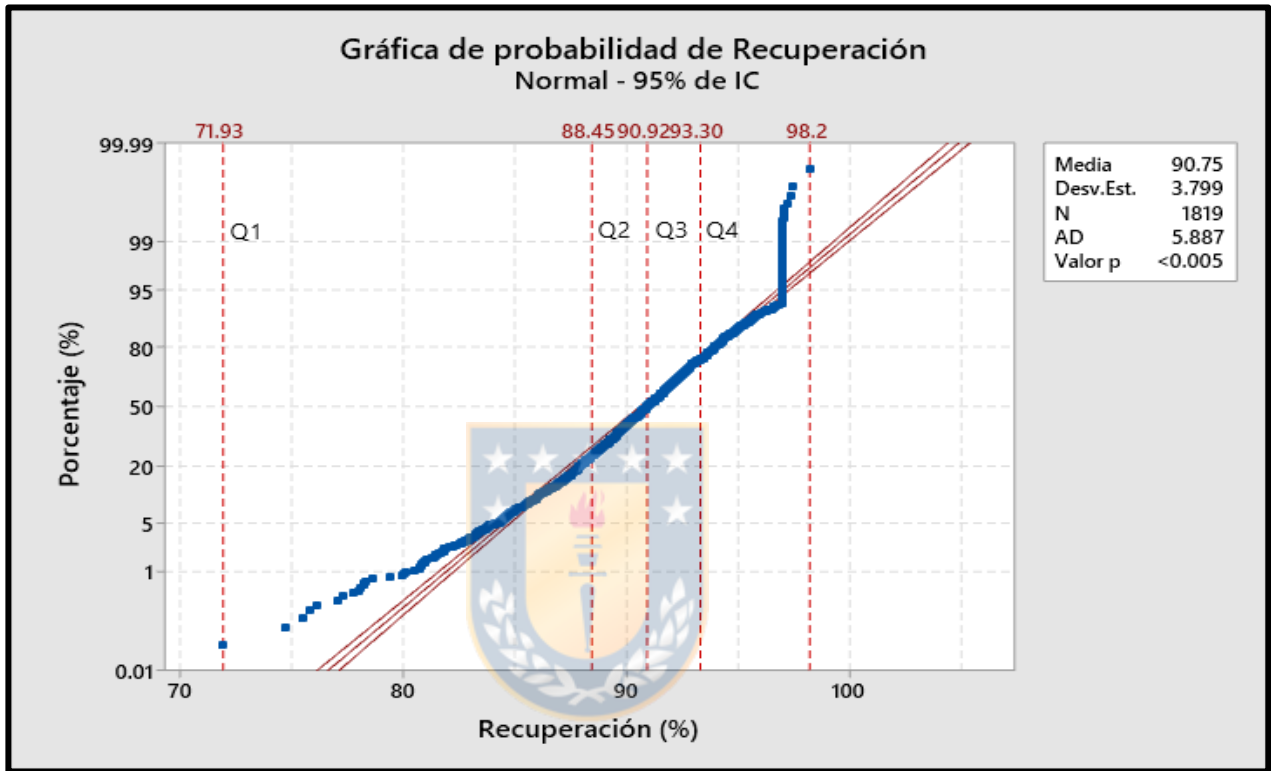
Una vez definidas las poblaciones de BWI, se procede a realizar el ACP, cuyos resultados son interpretados mediante los gráficos de *Score Plot* y *Loading Plot*.

### 6.3 DATOS RECUPERACIÓN ROUGHER

Para facilitar la interpretación de las herramientas gráficas del ACP, se definen 4 poblaciones de recuperación a partir de los 1.819 datos disponibles que presentan una recuperación de cobre mayor a 70%. Este set de datos muestra una distribución normal, ya que posee un nivel de significancia menor a 0,05.



Las poblaciones quedan definidas en cuartiles según sus rangos porcentuales de recuperación, pues no existen quiebres evidentes en el gráfico probabilístico para destacar alguna población en particular (Figura 6.2). Las poblaciones seleccionadas se especifican en la Tabla 6.3:



**Figura 6.2:** Gráfico probabilístico de la variable recuperación de cobre a 180  $\mu\text{m}$ . Se muestra una línea roja punteada en el límite de cada población de acuerdo con los rangos determinados. Los puntos azules representan cada una de las 1.819 muestras disponibles.

**Tabla 6.3:** Poblaciones de recuperación de cobre a 180  $\mu\text{m}$ .

Población	ID	Rango Recuperación (%)	Diferencia (%)
Muy Baja	Q1	[71,93 , 88,45[	16,52
Baja	Q2	[88,45 , 90,92[	2,47
Moderada	Q3	[90,92 , 93,30[	2,38

Alta	Q4	[93,30 , 98,20]	4,90
------	----	-----------------	------

A partir de la Figura 6.2 se observa que aproximadamente el 80% de las muestras disponibles manifiestan una recuperación mayor al 88%, exhibiendo una baja variabilidad. Una vez definidas las poblaciones de recuperación, se procede a realizar el ACP, cuyos resultados son interpretados mediante los gráficos de *Score* y *Loading Plot*.



## 7. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES: BOND *WORK INDEX*

### 7.1. INFLUENCIA DE LA GEOLOGÍA

En esta investigación es importante destacar la representatividad de las muestras, pues el resultado debe ser extrapolable a centenas de miles de toneladas de mineral. Por lo tanto, es fundamental reconocer la relación existente entre las variables metalúrgicas y los parámetros geológicos. Estudios como el de Preece (2016) y Rojas (2018) afirman que tanto la recuperación como el índice de trabajo tienen directa relación con la naturaleza geológica del material que ingresa a la planta concentradora.

Por otra parte, la distribución de los valores de *Work Index* respecto a la profundidad en general presenta un comportamiento creciente, es decir que a mayor profundidad los valores de *Work Index* aumentan y en los casos en los cuales hay una disminución se puede relacionar a la presencia de zonas de falla o cambios litológicos.

En particular, la zona mineral y la alteración dominante de donde proviene la muestra han sido reconocidos como los factores geológicos más determinantes a lo largo del proceso metalúrgico.

#### 7.1.1. Litología

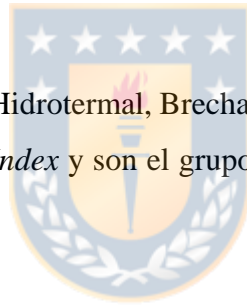
La Figura 7.1 enseña las principales litologías que componen el yacimiento, las cuales fueron obtenidas a partir del modelo geológico de Minera Los Pelambres, frente a sus valores de Bond *Work Index* respectivos extraídos de la base de datos geometalúrgica. Cuando las rocas que alimentan los molinos de bolas son en su mayoría “rocas duras” o de alto índice de trabajo, es

altamente probable que el molino disminuya su rendimiento y, en consecuencia, disminuya finalmente el tonelaje procesable por la planta.

En general los pórfidos muestran una tendencia hacia valores bajos de *Bond Work Index*, tal como es el caso del Pórfido A, B y D que evidencian un buen rendimiento durante el proceso de molienda, sin embargo, este grupo solo representa un 9% del total del yacimiento.

Asimismo, el Pórfido Cuarzo Feldespático tiene una mediana sustancialmente más baja que el resto de las litologías, lo cual podría deberse al contenido de cuarzo presente en esta litología, este mineral tiende a formar cristales bien desarrollados y facilitar el trabajo de los elementos de molienda, pues a mayor contenido de cristales bien formados existirán más superficies de contacto y en consecuencia posibles planos de fractura ocasionando un menor consumo de energía.

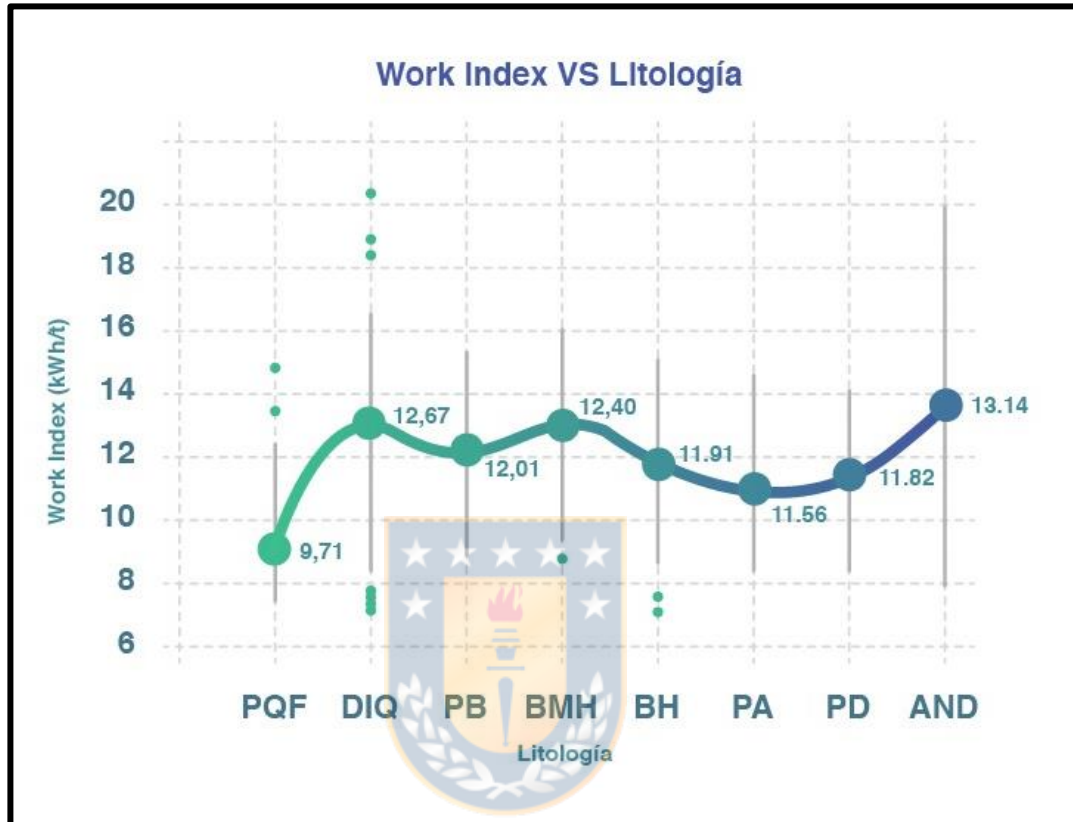
Por su parte, la Brecha Magmática Hidrotermal, Brecha Hidrotermal y la Diorita Cuarcifera tienen valores moderados de *Bond Work Index* y son el grupo más abundante del yacimiento abarcando cerca del 85% del total.



Por último, la Andesita muestra las mayores durezas y también presenta la mayor variabilidad. Para esta zona y las mencionadas en el párrafo anterior, el aumento en los valores de *Work Index* se podría deber a una mayor presencia de filosilicatos. Algunos minerales presentes pertenecen al grupo de las esmectitas, las cuales muestran un comportamiento plástico y poseen propiedades expansivas que modifican las propiedades reológicas de la pulpa provocando una disminución en el rendimiento metalúrgico del proceso.

Cabe destacar que Rojas (2018) menciona que el contenido de cuarzo, feldespato o arcillas, independiente de la cantidad en la que se presenten, no influye en el rendimiento de las pruebas de dureza como respuesta metalúrgica. Aquello se condice con los resultados de este estudio pues se

han encontrado casos en los cuales para la misma cantidad de feldespato, cuarzo o arcilla se han registrado diferentes valores de *Work Index* independiente de la litología, alteración o zona mineral.



**Figura 7.1:** *Boxplot*; Bond *Work Index* vs Litología. Minera Los Pelambres.

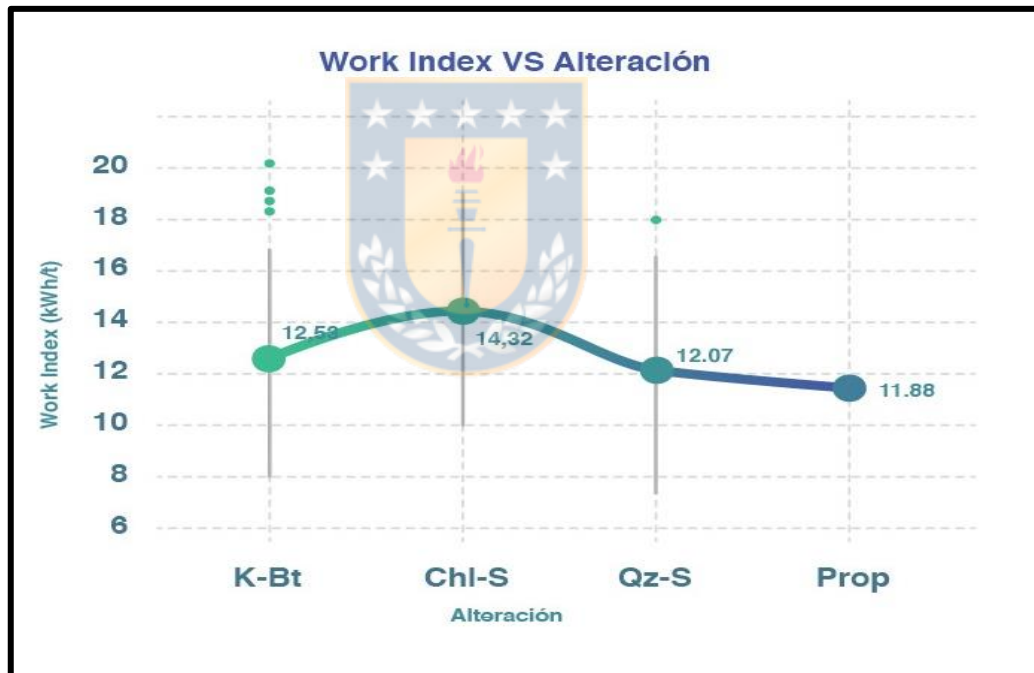
### 7.1.2. Alteración

En la Figura 7.2 se presentan las alteraciones que constituyen el yacimiento Los Pelambres, obtenidas a partir del modelo geológico de Minera Los Pelambres, frente a los valores de Bond *Work Index* extraídos de la base de datos geometalúrgicas.

Si bien la alteración propilítica tiene el menor valor de Bond *Work Index*, este no es representativo pues contiene solo 2 muestras en todo el yacimiento. Mientras tanto, las alteraciones Potásica y

Cuarzo Sericita tienen un promedio cercano a los 12,3 kWh/tc, y representan un 98% del total del yacimiento.

Por su lado, la alteración Clorita Sericita abarca un índice de trabajo significativamente más alto, sin embargo, la distribución de la alteración es discontinua y marginal a lo largo del yacimiento. En general, las muestras pertenecientes a las zonas de alteración clorítica presentan gran abundancia de filosilicatos, los cuales dificultan la adhesión del mineral a las correas y harneros pues se quedan en las paredes y bolas de los molinos.



**Figura 7.2:** *Boxplot:* Bond Work Index vs Alteración. Minera Los Pelambres.

### 7.1.3. Zona mineral

En la Figura 7.3 se observa un *Boxplot* con las distintas zonas minerales que componen el yacimiento, frente a los valores de *Bond Work Index* extraídos de la base de datos geometalúrgicas.

Al igual como ocurrió con la alteración propilítica en el caso anterior, la zona de Lixiviación Total contiene solo 2 muestras, por ende, es poco representativa y no se tomará en cuenta. Por su parte, la zona de Lixiviado Parcial tiene los valores más bajos de dureza. Esto se debe a que el grado de alteración afecta la competencia mecánica del material y no se necesita consumir demasiada energía para generar fracturas a pesar de que el contenido de alimentación esté aumentando.

Mientras la zona primaria y secundaria presentan los valores más altos de *Bond Work Index*, los cuales están estrechamente relacionados con la presencia de anhidrita, cuarzo y metales en estas zonas. Este mineral tiende a desarrollar cristales bien formados al igual que el cuarzo facilitando la generación de posibles planos de fractura. Cabe destacar que las zonas con mineralización Primaria y Secundaria abarcan aproximadamente un 96% del total de las muestras del yacimiento.

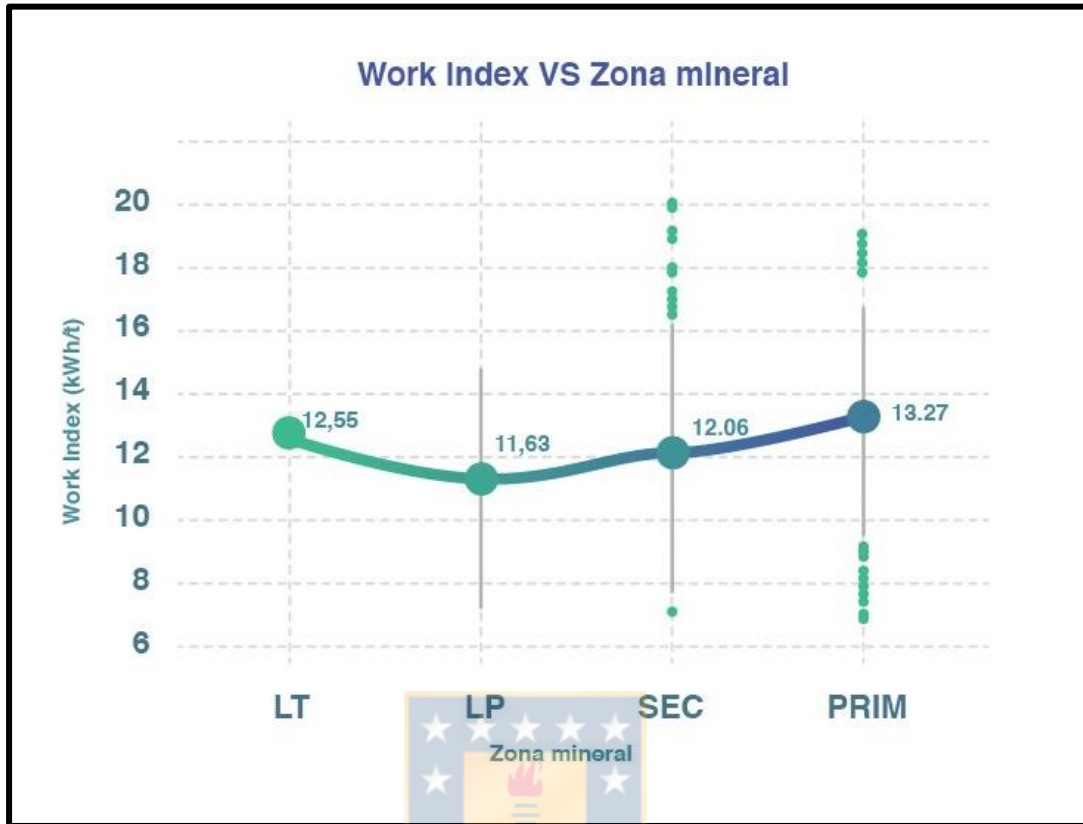
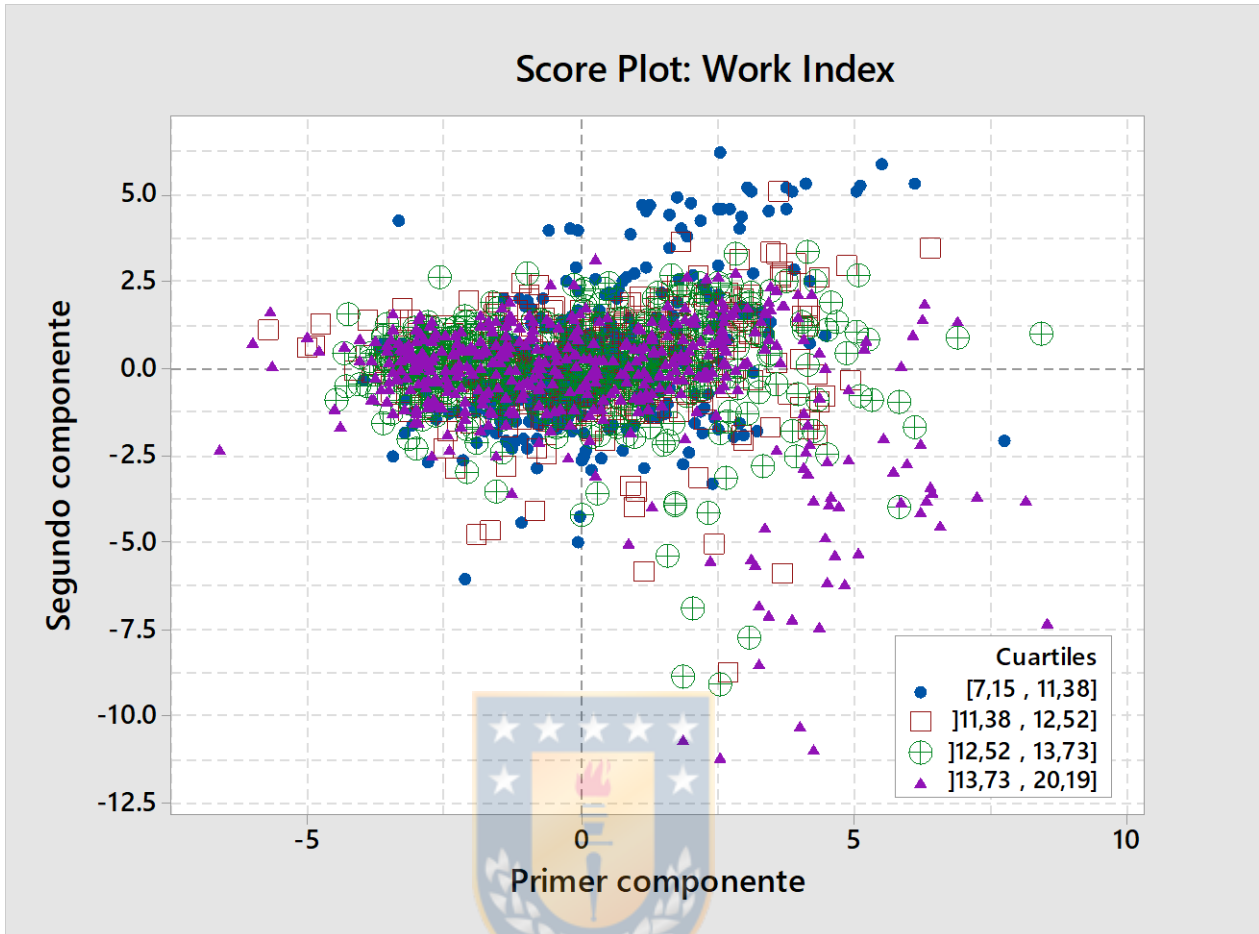


Figura 7.3: *Boxplot*: Bond Work Index vs Zona mineral. Minera Los Pelambres.

## 7.2. SCORE PLOT

El *Score Plot* es generado mediante el Análisis de Componentes Principales en Minitab 19. En primer lugar, se diferenciaron las poblaciones de Bond Work Index que fueron detalladas en el apartado anterior. Adicionalmente se destacan las poblaciones de mayor y menor Bond Work Index para obtener una mejor visualización del contraste entre un grupo y otro.





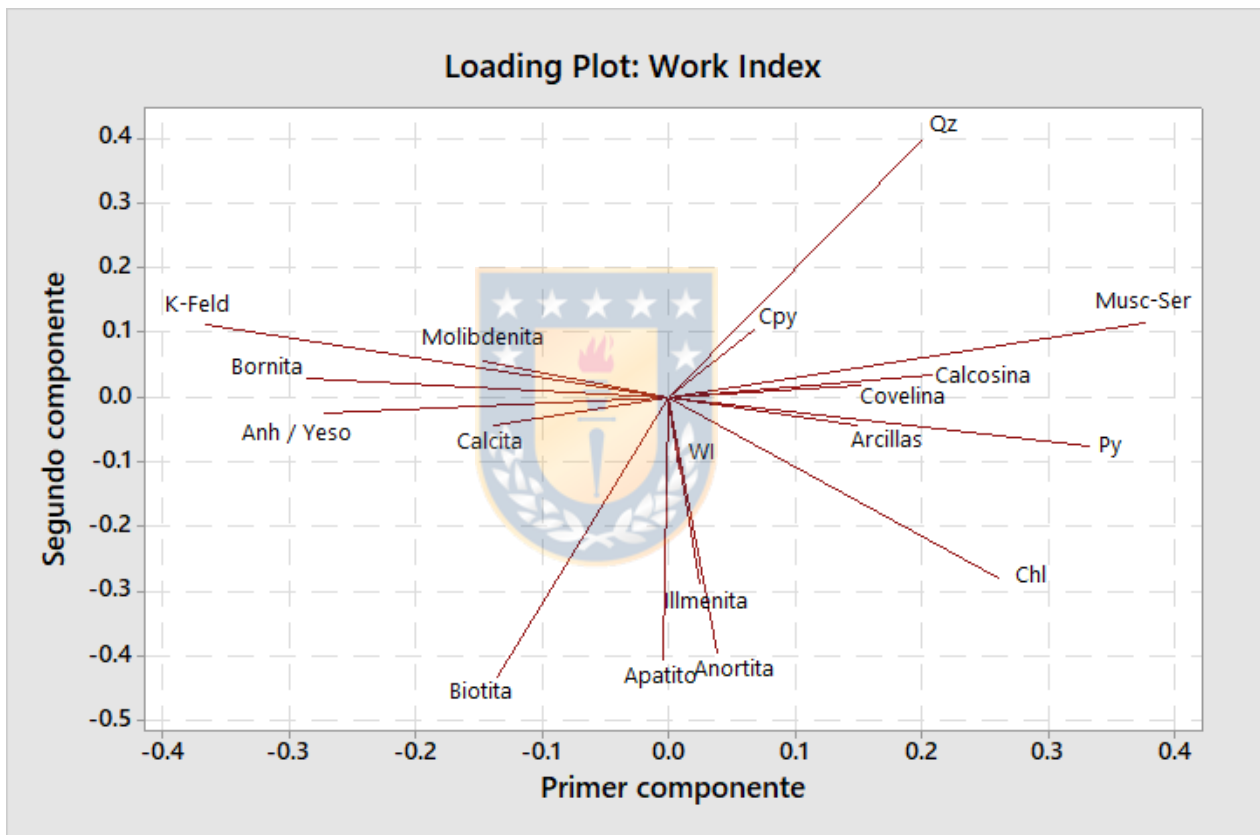
**Figura 7.4:** *Score Plot:* Poblaciones de Bond *Work Index*.

La Figura 7.4 enseña un fuerte traslape de todas las poblaciones en la zona central de la gráfica, sin embargo, se observa una tendencia en las poblaciones de muy bajo y alto Bond *Work Index* a distribuirse por lados opuestos del segundo componente. Por su parte, la población de muy baja dureza se inclina hacia la zona positiva del segundo componente, mientras que la población alta lo hace por el lado negativo de éste.

### 7.3. LOADING PLOT

La Figura 7.5 enseña el *Loading Plot* originado a partir del Análisis de Componentes Principales en Minitab 19, donde se especifican las mineralogías asociadas a los valores muy bajos, bajos,

moderados y altos de *Bond Work Index*. Al relacionar el gráfico de cargas del apartado anterior en conjunto con el gráfico de puntos, se observa que tanto la clorita como las arcillas son indicadas como minerales perjudiciales a lo largo del proceso de molienda, puesto que la distribución de ambos se condice con las poblaciones que contienen los valores más altos de *Work Index*. Por el contrario, el cuarzo y en menor medida la muscovita-sericita son asociados a los valores bajos de *Bond Work Index*.



**Figura 7.5:** *Loading Plot*: Muestra la relación de las distintas mineralogías presentes en el yacimiento con las poblaciones de *Bond Work Index* previamente definidas.

A continuación, se procede a calcular los coeficientes de correlación de cada uno de los minerales que evidencian una mayor afinidad con la variable *Bond Work Index*, para determinar aquel o aquellos que presenten una mayor correlación con el índice de trabajo (Tabla 7.1)

**Tabla 7.1:** Matriz de correlación de Pearson. Variable de Bond *Work Index*.

	<i>Work Index</i>	Clorita	Arcillas	Cuarzo	Musc-Ser
<i>Work Index</i>	<b>1</b>				
Clorita	<b>0,2518</b>	<b>1</b>			
Arcillas	-0,045	0,2403	<b>1</b>		
Cuarzo	-0,003	-0,044	0,1339	<b>1</b>	
Musc-Ser	0,081	0,3782	0,1111	0,4778	<b>1</b>

En la Tabla 7.1 se observa que todos los coeficientes de correlación calculados son valores menores a 0,5, evidenciando una correlación débil y estadísticamente poco significativa. No obstante, la clorita muestra la mayor correlación respecto a los índices de molienda y por lo tanto es escogida para el análisis de concentración versus rendimiento, pues indica un comportamiento pernicioso en la operación.



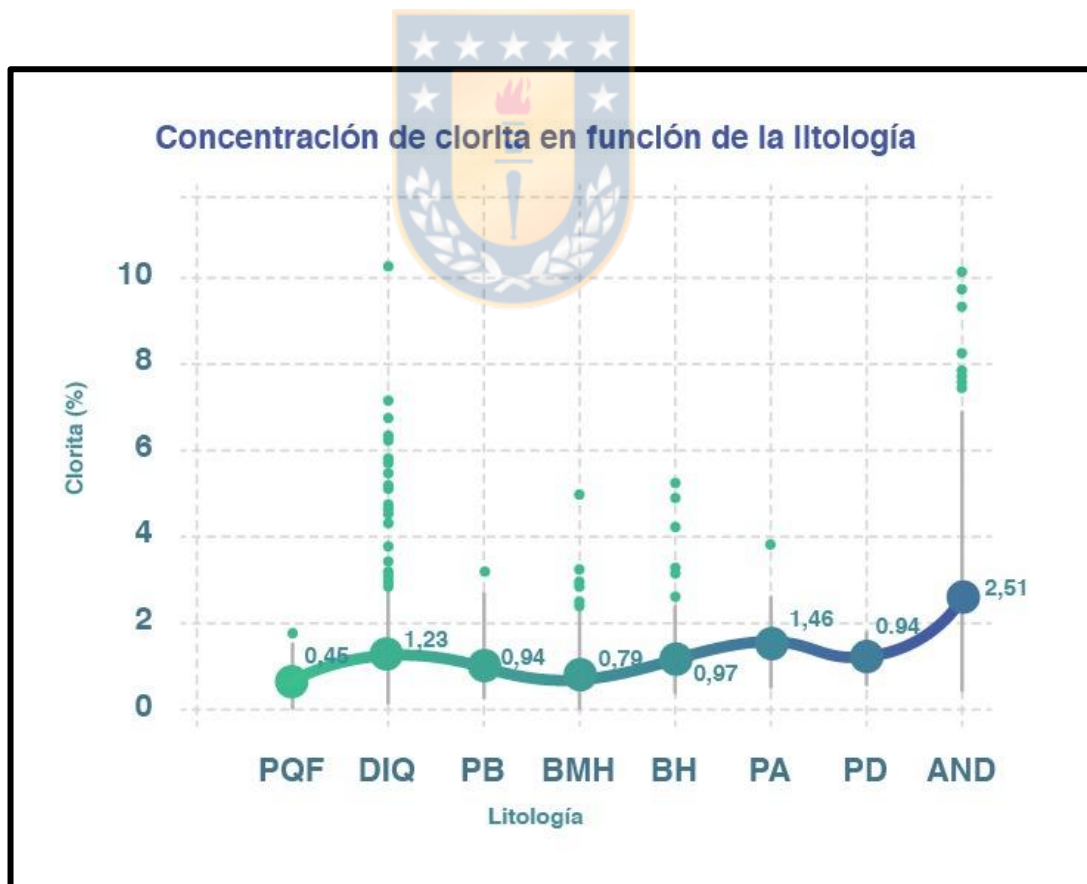
#### **7.4. ANÁLISIS DE BOXPLOT: CONCENTRACIÓN DE CLORITA RESPECTO AL BOND WORK INDEX**

##### **7.4.1. Litología**

En la Figura 7.6 podemos observar el porcentaje de clorita contenidos para cada una de las litologías que componen el yacimiento. Al relacionarlo con el gráfico previamente interpretado (Figura: 7.1) podemos observar que a mayor contenido de clorita presente en la muestra ocurre un efecto negativo sobre el rendimiento geometalúrgico respecto del *Work Index*. En general, una alta concentración de clorita se relaciona con rocas de mayores durezas, mientras que las muestras con bajas cantidades de clorita se asocian positivamente a rocas de menor dureza. Lo anterior está relacionado a las propiedades físicas de la clorita, pues pertenece al grupo de filosilicatos

originados a partir de la alteración hidrotermal de minerales ferromagnesianos primarios como anfíboles y micas. Su baja dureza y hábito laminar propicia la formación de partículas ligeras y pequeñas durante el proceso de molienda, favoreciendo la formación de “lodo” que se adhiere a las paredes del molino de Bond, disminuyendo su capacidad de conminución de una manera significativa tal como se menciona en uno de los capítulos anteriores.

De modo general se observa que la litología Andesita contiene una concentración de clorita significativamente más alta que el resto de las litologías. El Pórfido Cuarzo Feldespático, al contrario, es la litología que contiene la menor concentración de clorita seguida por el Brecha Magmática Hidrotermal. El resto de las litologías presentes en el yacimiento muestran una diferencia de concentración muy baja entre ellas, al igual que en su rendimiento metalúrgico.



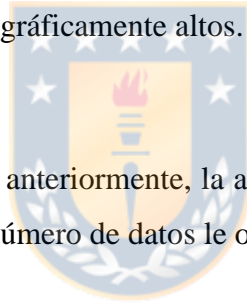
**Figura 7.6:** *Boxplot:* Concentración de clorita en función de las litologías que componen el yacimiento.

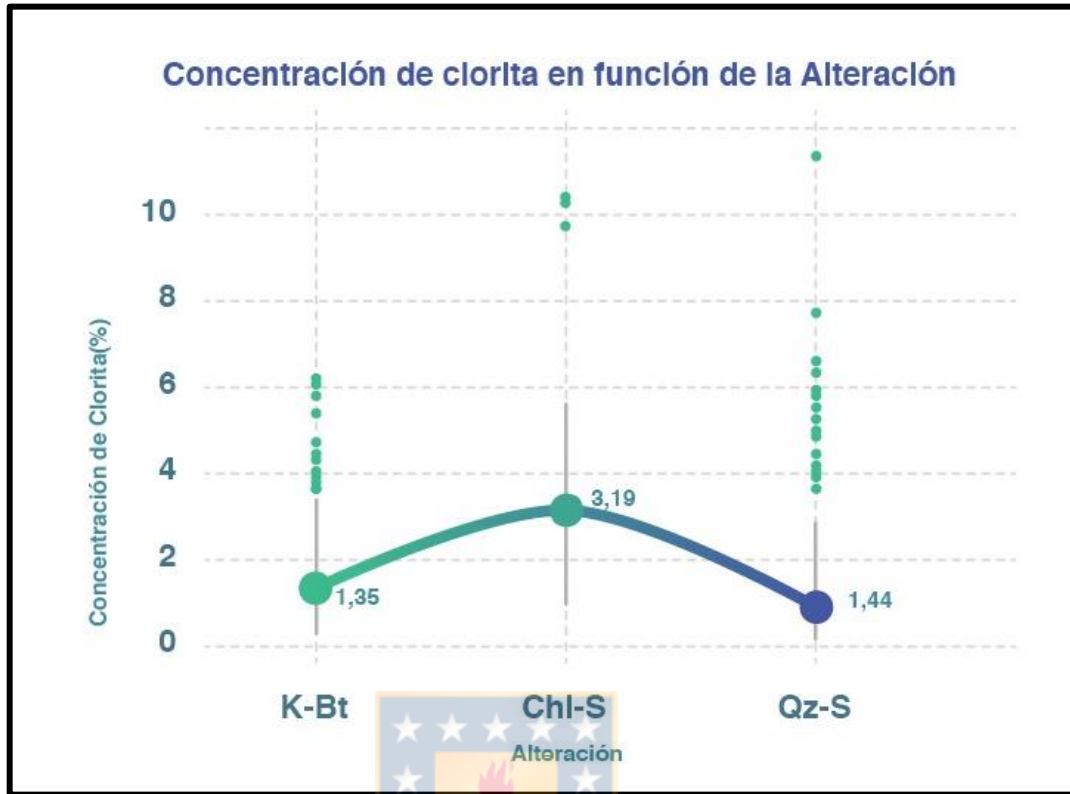
#### 7.4.2. Alteración

La Figura 7.7 muestra la concentración de clorita en función de la alteración. Para este caso, al igual que la litología, una alta concentración de clorita se relaciona positivamente con rocas de mayor dureza. En el caso de la alteración Potásica y Cuarzo Sericítica, la concentración oscila en valores similares, siendo de 1,35 y 1,44% respectivamente, manteniendo la tendencia ya mencionada. Ambas alteraciones representan cerca de un 97% de las muestras recolectadas en el yacimiento.

Por su lado, la alteración Clorita Sericita muestra una concentración significativamente más alta, no obstante, representa menos de un 3% del yacimiento y las muestras se ubican principalmente en zonas marginales o en sectores topográficamente altos.

Cabe destacar y como se mencionó anteriormente, la alteración Propilítica no fue considerada en esta parte del estudio pues su bajo número de datos le otorga una muy baja representatividad.





**Figura 7.7:** *Boxplot:* Concentración de clorita en función de las alteraciones presentes en el yacimiento.

### 7.4.3. Zona mineral

La Figura 7.8 enseña la concentración de clorita respecto a las distintas zonas minerales que constituyen el yacimiento. La zona que presenta una mayor concentración de clorita corresponde a la zona de Lixiviado Parcial seguida con una diferencia muy leve por la zona Secundaria, no obstante, esta última es la que tiene una mayor variabilidad de las tres zonas, con muestras que llegan a tener sobre un 10% de concentración de clorita. Por último, la zona Primaria es la de menor concentración, con un promedio de 0,93% de clorita.

En este caso la tendencia que seguían los parámetros geológicos no se cumple. Sin embargo, podría ser causado por las rocas que constituyen la zona de Lixiviado Parcial, ya que contienen en su mayoría rocas de las partes más altas del yacimiento, cuya exposición en superficie genera una

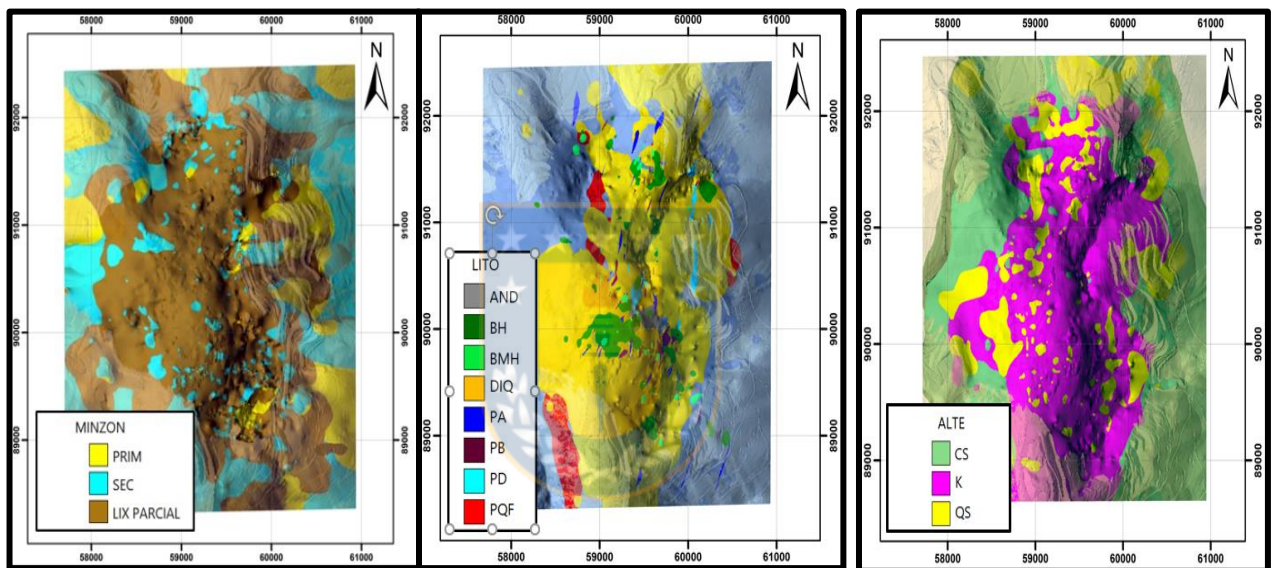
disminución en la competencia de estas. Las zonas primarias y secundarias tienen su desarrollo a mayor profundidad y altas temperaturas, provocando unidades de alta dureza y, por ende, sean más resistentes a los procesos de moliendabilidad.



**Figura 7.8:** *Boxplot:* Concentración de clorita en función de las zonas minerales establecidas en el yacimiento.

#### 7.4.4. Continuidad espacial de la clorita respecto al Bond Work Index

En este apartado se busca evaluar si los dominios de dureza presentan consistencia y continuidad espacial dentro del yacimiento Los Pelambres. De ser así, se analizará la relación que guardan los dominios sobre los parámetros geológicos estudiados. En primer lugar, se esquematiza mediante *Vulcan 10.0* las concentraciones de clorita obtenidas de los análisis QEMSCAN® de las muestras in situ, como también los mapas geológicos de litología, alteración y zona mineral (Figura 7.9).



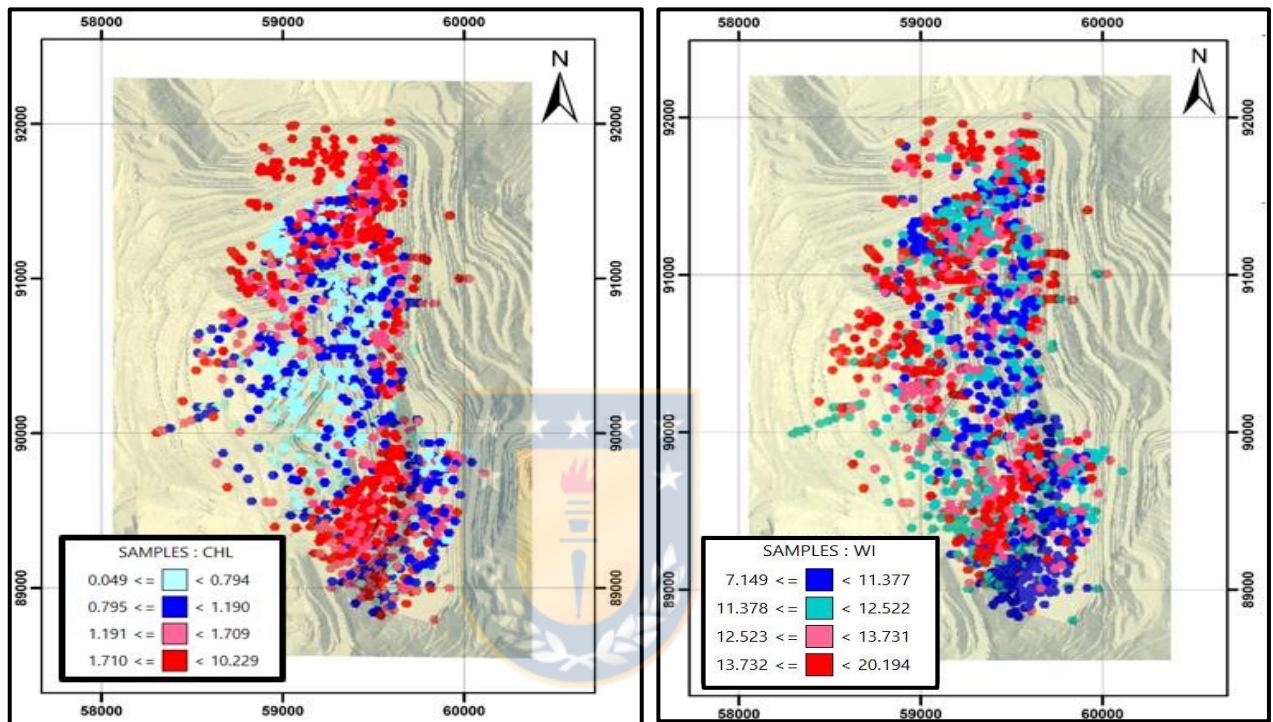
**Figura 7.9:** Mapas geológicos de las zonas minerales (izquierda), litológico (centro) y de alteración (derecha) en el yacimiento Los Pelambres.

Luego, al comparar la distribución de las poblaciones de clorita se observa que efectivamente las poblaciones de baja concentración muestran relación con las muestras de durezas más bajas y, al contrario, las poblaciones de mayor concentración evidencian relación con los dominios de mayor dureza (Figura 7.10)

Las poblaciones de alta concentración de clorita (rojo y rosado) se agrupan y distribuyen en la parte norte y sur del depósito principalmente, en tanto, los dominios de baja concentración (azul y celeste) se encuentran en la zona central y sur oriental del yacimiento. En lo referente al factor



litológico, el dominio de alta concentración coincide con una parte importante de las Andesitas y Diorita Cuarcifera, mientras que el dominio de bajo contenido tiende a coincidir con la distribución de los pórfidos Cuarzo Feldespático, A y D. En cuanto a la alteración hay una clara relación de las poblaciones de alta concentración con las zonas Cloríticas sobre todo en las zonas marginales y altas del yacimiento.



**Figura 7.10:** Distribución espacial de los dominios de Bond *Work Index* (derecha) y concentración de clorita (izquierda) en el yacimiento Los Pelambres.

Adicionalmente, al hacer un análisis en profundidad en base a la concentración, se observa que los dominios de mayor concentración tienden a distribuirse por las partes altas y zonas marginales del yacimiento, mientras que el dominio de moderada y baja concentración muestran una tendencia en su distribución en el centro del yacimiento.

Lo anterior, se condice en buena medida con los resultados en los apartados previos, donde se analiza el comportamiento de los parámetros geológicos sobre la dureza, en donde las Andesitas y la alteración Clorita Sericita eran indicadas como las zonas más perjudiciales para el proceso.

## **8. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES: RECUPERACIÓN ROUGHER**

### **8.1. INFLUENCIA DE LA GEOLOGÍA**

#### **8.1.1. Litología**

En la Figura 8.1 se observan las principales litologías que componen el yacimiento en función de los porcentajes de recuperación de las muestras in situ, los cuales fueron obtenidos a partir del modelo geometalúrgico.

La mayoría de las litologías mantienen un comportamiento similar en cuanto a porcentajes de recuperación, con medianas que oscilan entre 87 y 92%. Las Andesitas y el Pórfido D indican el rendimiento más bajo respecto al resto de las litologías, siendo incluso menor al 90%. La baja en el porcentaje de recuperación mostrada por las Andesitas podría ser causada por una abundancia de filosilicatos que la acompañan y que dificultan una molienda totalmente efectiva. En el caso de la Brecha hidrotermal y Pórfido B enseñan los mejores rendimientos de recuperación con porcentajes 91,6 y 91,9% respectivamente.

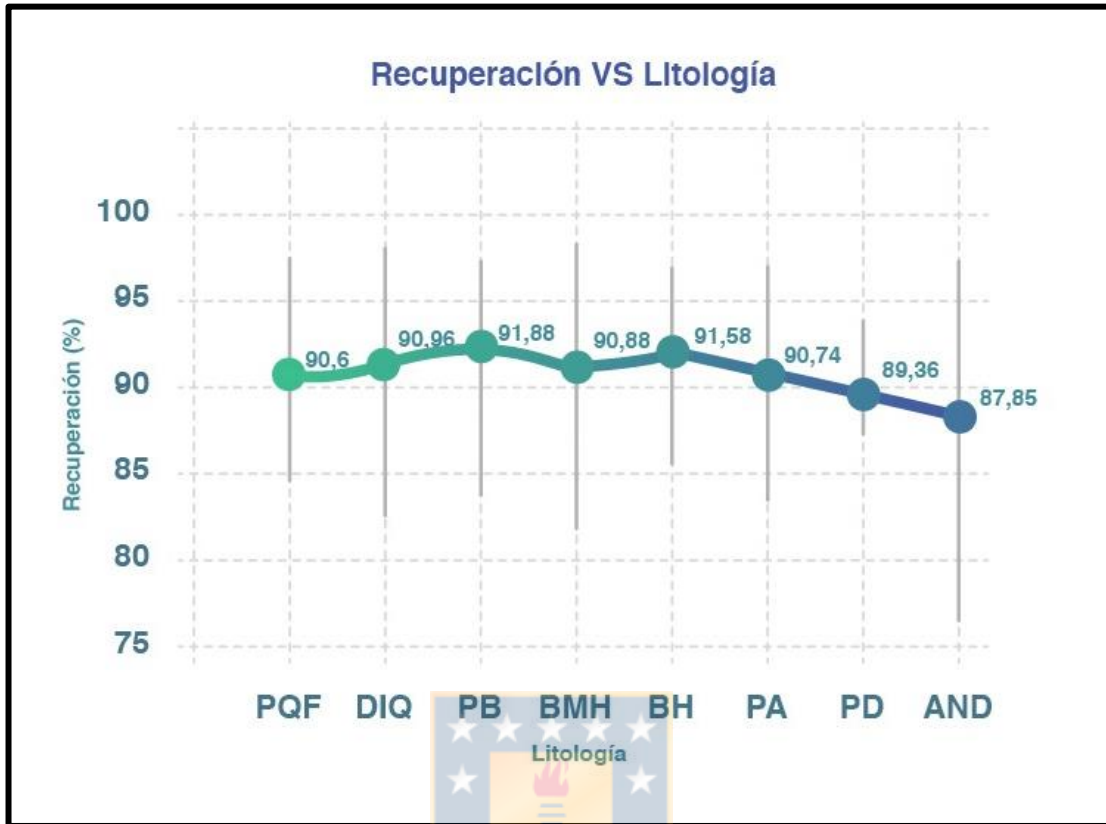


Figura 8.1: *Boxplot*: Recuperación versus Litologías Minera Los Pelambres.

### 8.1.2. Alteración

En el caso de la Figura 8.2 se observan las distintas alteraciones presentes en el yacimiento y sus respectivos valores de recuperación en el muestreo in situ. La alteración Propilítica tiene una mediana de recuperación de 83,49%, no obstante, tal como se mencionó anteriormente su bajo número de datos le resta representatividad, por lo tanto, no es incluida dentro del análisis. A modo general, las tres alteraciones restantes no muestran una gran variación en su comportamiento en la prueba de recuperación, oscilando entre 89,72 y 90,9% variando levemente por la influencia de su composición litológica y de zonación mineral.



**Figura 8.2:** *Boxplot:* Recuperación versus Alteraciones Minera Los Pelambres.

### 8.1.3. Zona mineral

En la Figura 8.3 se observa el porcentaje de recuperación para cada zona mineral definida para el yacimiento. La zona de Lixiviado Parcial posee un porcentaje de recuperación menor al resto de las zonas minerales, lo cual podría ser causado por una carencia de sulfuros de cobre y la alta presencia de cobre soluble en comparación a la zona Secundaria y Primaria. Mientras que la diferencia existente entre las medianas de recuperación de la zona primaria y secundaria podría ser causada por el tiempo de residencia que les corresponde a las rocas de cada zona mineral en las celdas de flotación.

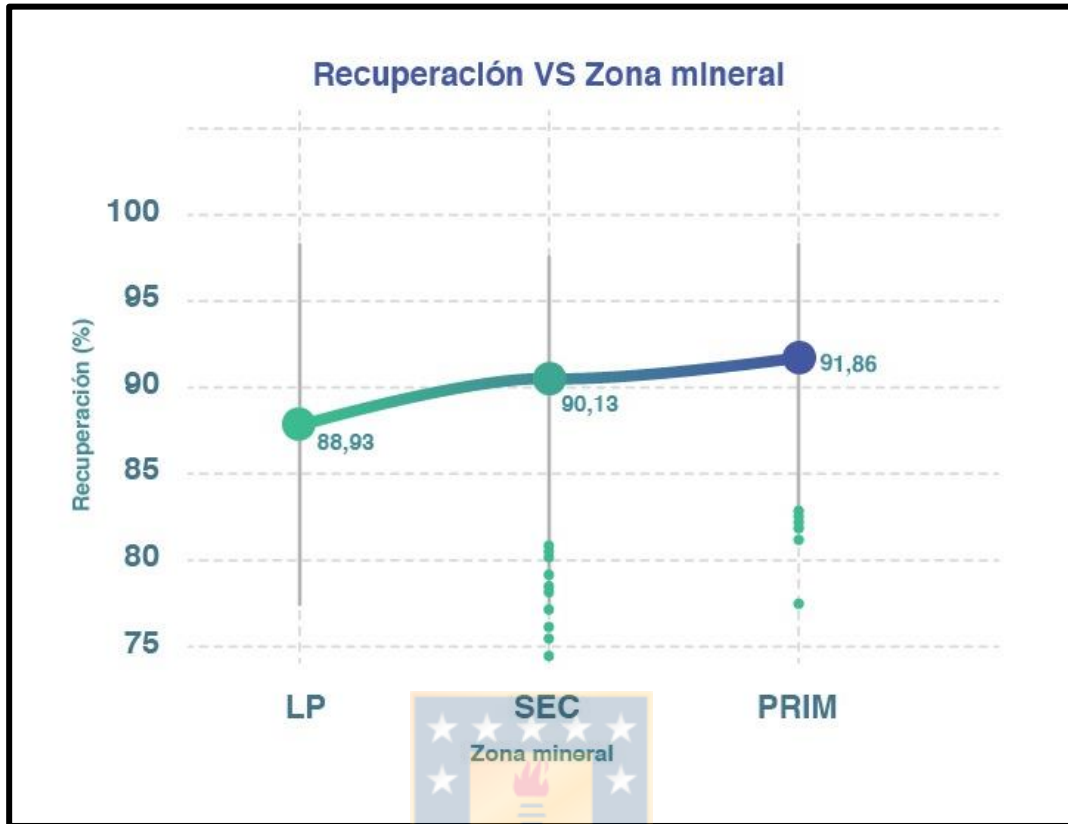
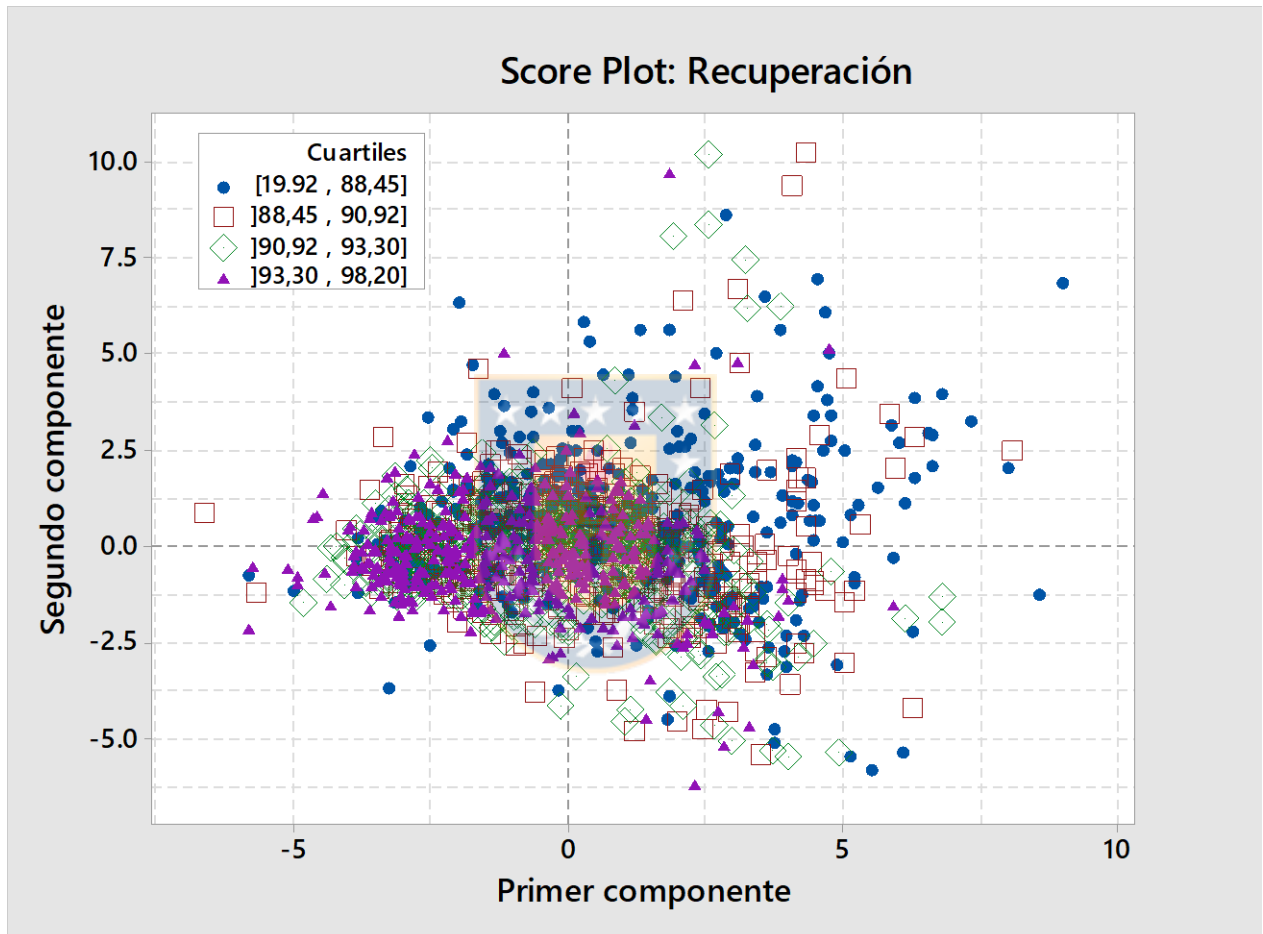


Figura 8.3: Boxplot: Recuperación versus Zonas minerales Minera Los Pelambres.

## 8.2. SCORE PLOT

En la Figura 8.4 se presenta el *Score Plot* generado mediante el Análisis de Componentes Principales para las 1.826 muestras disponibles. La utilidad de este gráfico radica en la identificación del componente o cuadrante de interés para la situación planteada, es decir, se determina cuál de los componentes es el que clasifica de mejor manera las poblaciones de recuperación. Para ello, se clasifican las poblaciones en distintos grupos, destacando aquellas poblaciones con menores y mayores porcentajes de recuperación con la finalidad de facilitar la interpretación del gráfico.

La gráfica muestra un gran solapamiento entre las cuatro poblaciones, no obstante, existe una leve tendencia del grupo de baja recuperación a dispersarse por la parte positiva del primer y segundo cuadrante. Mientras que la población de alta recuperación no muestra una inclinación clara hacia algún componente en particular.

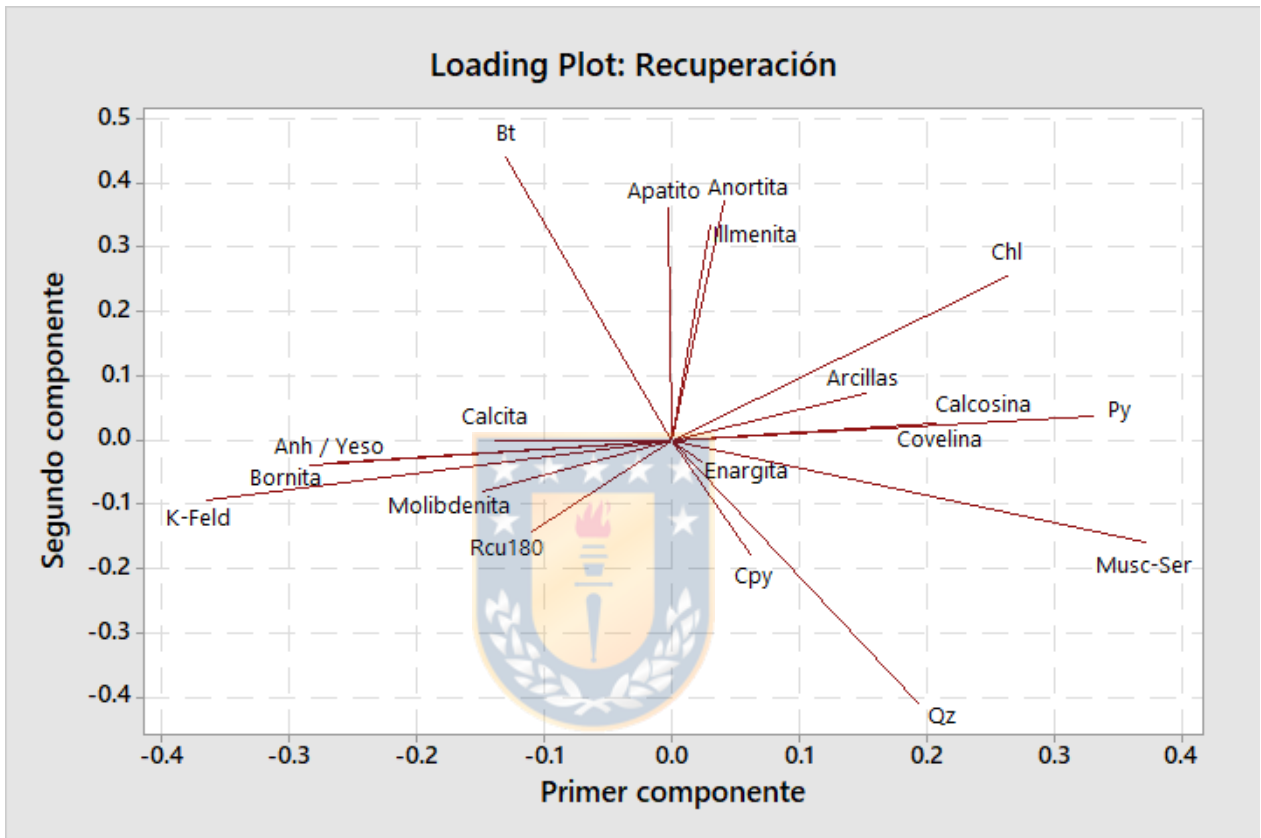


**Figura 8.4:** *Score Plot:* Poblaciones de recuperación *rougher*.

### 8.3. LOADING PLOT

La Figura 8.5 muestra el *Loading Plot* generado mediante el Análisis de Componentes Principales, donde se especifican las mineralogías asociadas a las poblaciones de recuperación. Se observa que tanto la clorita como la pirita son indicadas, según el análisis, como minerales vinculados en mayor

medida a valores de muy baja y baja recuperación. La presencia de minerales como el cuarzo y otros sulfuros no evidencian una gran diferencia entre las poblaciones de baja y moderada recuperación.



**Figura 8.5:** Loading Plot: Relación entre las distintas mineralogías y las poblaciones de recuperación previamente definidas.

Seguidamente se calculan los coeficientes de correlación de Pearson de cada uno de los minerales que evidencian una mayor afinidad con la variable de recuperación, y así determinar aquel o aquellos que presenten una mayor correlación. (Tabla 8.1)

**Tabla 8.1:** Matriz de correlación de Pearson. Variable de Recuperación.

	Recuperación	Clorita	Pirita	Cuarzo	Musc-Ser
Recuperación	<b>1</b>				
Clorita	<b>-0.238</b>	<b>1</b>			
Pirita	-0.156	0.5171	<b>1</b>		
Cuarzo	0.016	-0.044	0.329	<b>1</b>	
Musc-Ser	-0.120	0.378	0.637	0.477	<b>1</b>

Los coeficientes de correlación calculados no superan el 0.5 y están dentro del espectro negativo en función a la recuperación, revelando una correlación débil e inversa sobre el proceso. La clorita tiene la mayor correlación e impacto, por lo tanto, es escogida para el análisis de concentración de esta versus el rendimiento metalúrgico alcanzando.

#### **8.4. ANÁLISIS DE BOXPLOT: CONCENTRACIÓN DE CLORITA**

##### **8.4.1. Litología**

Se observa en la Figura 8.6 la concentración promedio de clorita contenidos para cada una de las litologías que componen el yacimiento. Para el caso de la Figura 8.1 podemos interpretar que a mayor abundancia de clorita presente en la muestra ocurre un efecto negativo sobre el rendimiento geometalúrgico de la muestra en cuestión. Cabe destacar que a diferencia del *Bond Work Index*, los altos valores de concentración de clorita tienden a relacionarse con las poblaciones con bajos porcentajes de recuperación, no obstante, las muestras con bajas concentraciones de clorita no muestran un efecto claro en el rendimiento geometalúrgico final.



Lo anterior está conectado con las propiedades físicas de la clorita, pues pertenece al grupo de filosilicatos originados a partir de la alteración hidrotermal de minerales ferromagnesianos primarios como anfíboles y micas. Generalmente, los problemas asociados con los filosilicatos son de carácter fisicoquímicos, afectando todas las etapas del circuito de procesamiento de minerales. Debido al tamaño pequeño de sus partículas y su alta superficie específica son altamente reactivos y sensibles a los cambios. Se ha observado que la presencia de aluminosilicatos y minerales de silicato de magnesio en la flotación, afectan el rendimiento metalúrgico.



**Figura 8.6:** *Boxplot:* Concentración de clorita en función de las litologías que componen el yacimiento.

La Andesita es la litología que contiene una concentración de clorita y otros filosilicatos como la biotita y muscovita significativamente más alta que el resto de las litologías. Esta cualidad podría

generar alguno de los problemas anteriormente mencionados disminuyendo su rendimiento geometalúrgico.

En el caso del Pórfido Cuarzo Feldespático, al contrario, es la litología que contiene la menor concentración de clorita y biotita, seguida por el Brecha Magmática Hidrotermal. En estas litologías no se observa una relación clara entre la baja concentración de clorita con sus respectivas recuperaciones. El resto de las litologías presentes en el yacimiento exhiben una leve diferencia entre ellas mostrando un comportamiento geometalúrgico similar tanto en recuperación como en concentración.

#### **8.4.2. Alteración**

La Figura 8.7 representa la concentración de clorita en función de la alteración. Para este caso, a diferencia de la litología, una alta concentración de clorita no muestra una tendencia clara con el rendimiento geometalúrgico de muestra. Por ejemplo, la alteración Clorita Sericita tiene una concentración de clorita promedio de casi el doble que el resto de las alteraciones, sin embargo, no es la alteración que muestra un mejor rendimiento. Esta diferencia en la relación de concentración de clorita y recuperación debe estar gatillado por alguna o todas las propiedades mencionadas en los capítulos previos. Por otro lado, esta alteración solo representa un 2.3% de la totalidad de las muestras in situ.

Para el caso de la alteración Potásica y Cuarzo Sericita, las recuperaciones presentan una leve diferencia tanto en su concentración de clorita como en su porcentaje de recuperación. Estos sectores de alteración componen aproximadamente el 96% del yacimiento y al igual que con el resto de las alteraciones no existe una tendencia de cómo afecta la clorita al valor de recuperación.

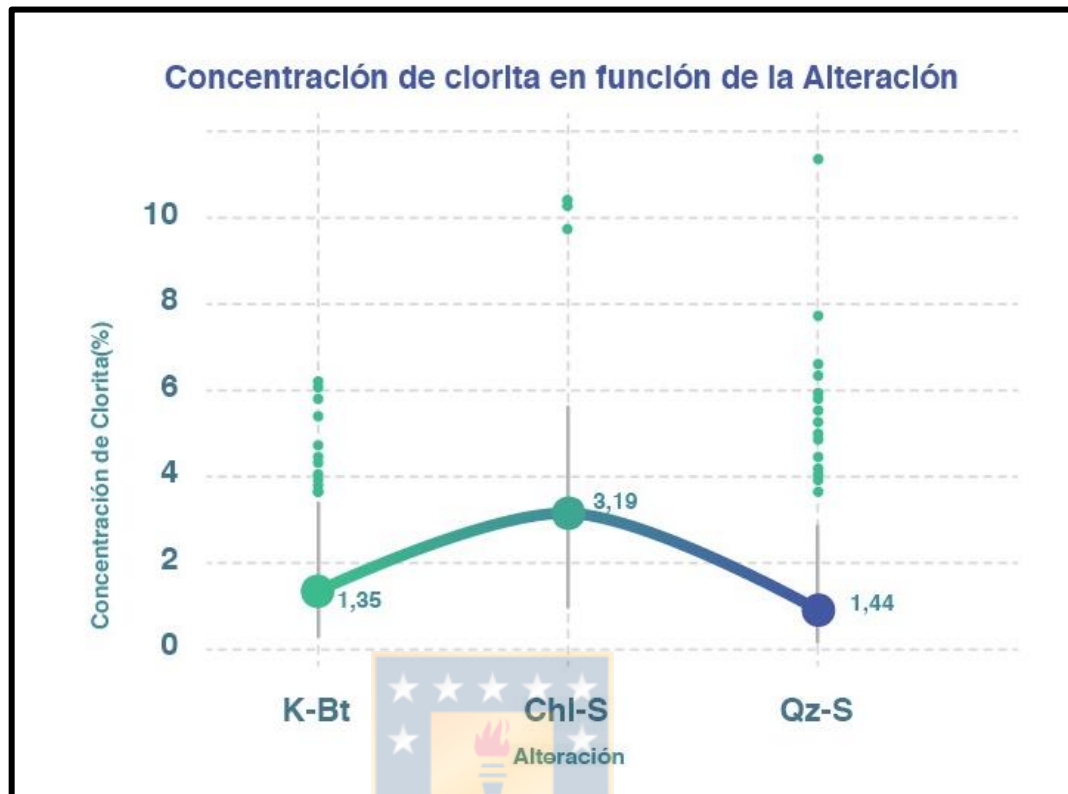


Figura 8.7: *Boxplot*: Concentración de clorita en función de las alteraciones presentes en el yacimiento.

### 8.4.3. Zona mineral

La Figura 8.8 muestra la concentración de clorita respecto a las distintas zonas minerales que constituyen el yacimiento. La zona que presenta una mayor concentración de clorita entre las distintas zonas minerales corresponde a la zona de Lixiviado Parcial seguida con una diferencia muy leve por la zona Secundaria, no obstante, esta última es la que tiene una mayor variabilidad de las tres zonas, con muestras que llegan a tener hasta un 10% de concentración de clorita. Por último, la zona Primaria es la de menor concentración, con un promedio de 0.93% de clorita.

La zona de lixiviado parcial posee un rendimiento geometalúrgico menor al resto de las zonas minerales, lo cual podría ser causado por una carencia de sulfuros de cobre y la alta presencia de cobre soluble en comparación a la zona secundaria y primaria. Por su parte, la diferencia existente

entre las medianas de recuperación de la zona primaria y secundaria podría ser causada por el tiempo de residencia que les corresponde a las rocas de cada zona mineral en el proceso de flotación y en menor medida a la diferencia en la concentración de filosilicatos y minerales arcillosos existentes en cada zona y que finalmente perjudican el rendimiento de la muestra.

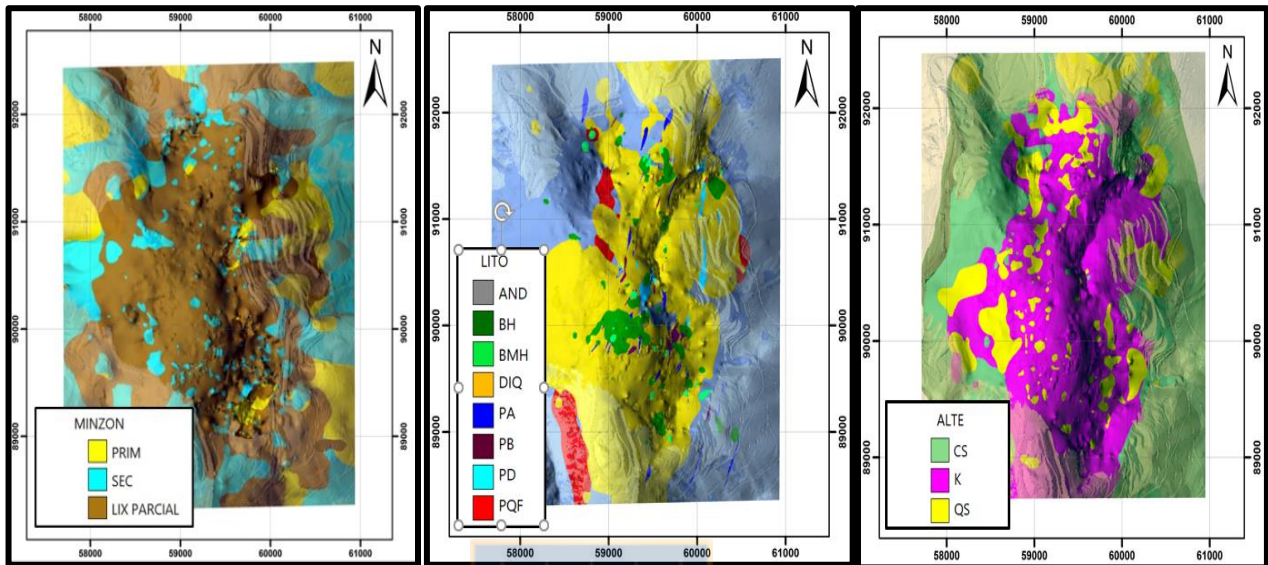


**Figura 8.8:** *Boxplot:* Concentración de clorita en función de las zonas minerales establecidas en el yacimiento.

#### 8.4.4. Continuidad espacial de la clorita respecto a la Recuperación Rougher

En este apartado se busca evaluar si las poblaciones de recuperación definidas presentan consistencia y continuidad espacial en el yacimiento Los Pelambres. De presentar continuidad espacial, se analizará si los dominios mantienen relación con los parámetros geológicos investigados. Para facilitar la interpretación, se gráfica mediante el software *Vulcan 10.0* los valores

de recuperación obtenidos de la base de datos metalúrgica y sus respectivas concentraciones de clorita obtenidas de los análisis QEMSCAN® (Figura 8.9).



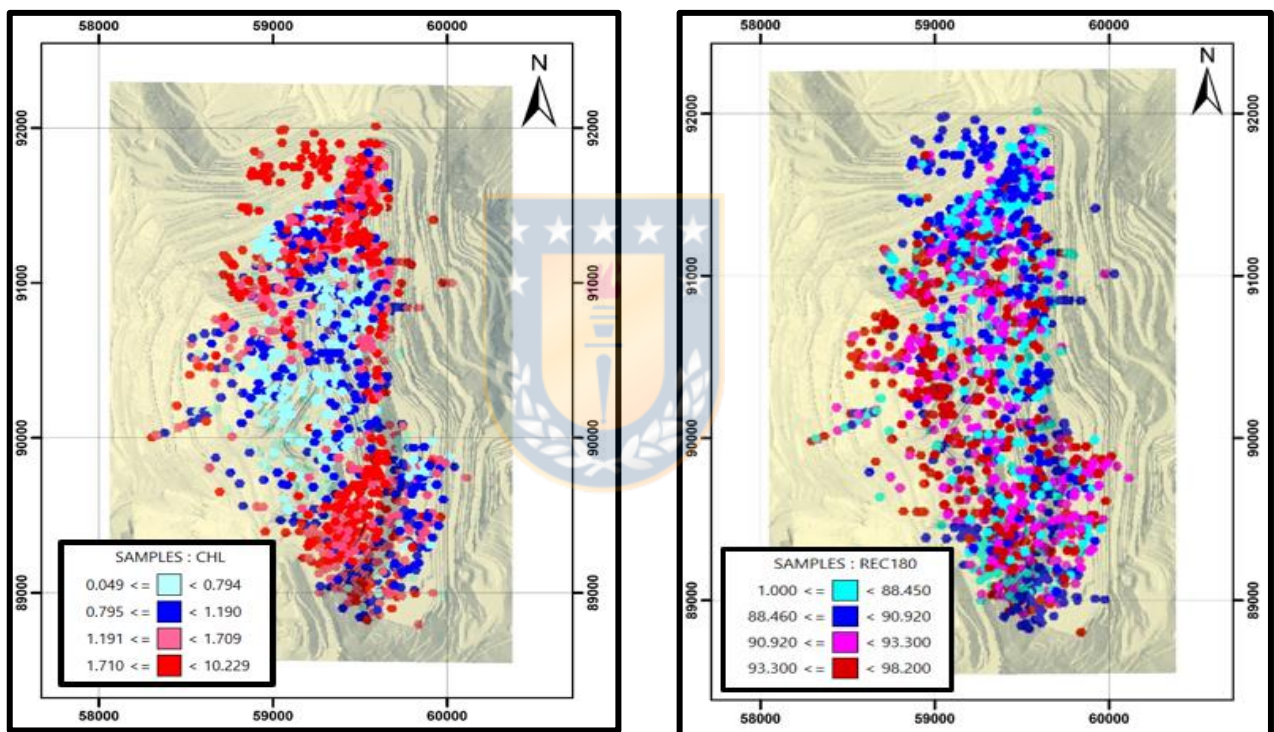
**Figura 8.9:** Mapas geológicos de las zonas minerales (izquierda), litológico (centro) y de alteración (derecha) en el yacimiento Los Pelambres.

Al analizar la distribución de los dominios de clorita se observa que las poblaciones de baja concentración tienen a agruparse con los mayores porcentajes de recuperación de cobre. Por otro lado, las poblaciones de mayor concentración guardan una mayor relación con los dominios de menor recuperación (Figura 8.10).

Las poblaciones de alta concentración de clorita (rojo y rosado) se agrupan y distribuyen en la zona norte y sur del depósito principalmente, mientras que, las poblaciones de baja concentración (azul y celeste) se encuentran en la zona central y sur oriental del yacimiento. Acerca del factor litológico, el dominio de alta concentración coincide en gran medida con la zona de Andesitas, sin embargo, las poblaciones de menor concentración no muestran una tendencia a alinearse con alguna de las litologías. Es importante destacar que la diferencia en los porcentajes de recuperación no muestra una relación clara con las muestras con concentraciones más bajas, sin embargo, a

medida que la concentración aumenta si se evidencia una baja en el rendimiento metalúrgico de la muestra.

Adicionalmente, al hacer el análisis en profundidad considerando las zonas minerales, se observa que los dominios de menor recuperación tienden a distribuirse por las partes altas y en los bordes del yacimiento, mientras que los dominios que abarcan los porcentajes más altos muestran una tendencia en su distribución en el centro del yacimiento.



**Figura 8.10:** Distribución espacial de los dominios de Recuperación (derecha) y concentración de clorita (izquierda) en el yacimiento Los Pelambres.

Lo mencionado anteriormente, se condice en gran medida con los resultados obtenidos en el análisis de componentes principales. Adjudicando a la zona mineral y la alteración como los parámetros más perjudiciales en el rendimiento metalúrgico en el proceso.



## 9. CONCLUSIONES

Con la finalidad de fortalecer el proceso de planificación en Minera Los Pelambres, se desarrolló esta investigación para mejorar el rendimiento en función de la planificación minera. Esta memoria permite concluir que las observaciones obtenidas mediante los análisis QEMSCAN® son una herramienta efectiva en la determinación de los minerales de alteración que producen efectos perjudiciales en el rendimiento metalúrgico en las muestras in situ.

Los resultados de los análisis de datos revelan que la clorita es un mineral altamente dañino durante la operación, viéndose reflejado en los coeficientes de vectores propios obtenidos en el análisis multivariable por componentes principales. La clorita es un mineral de alteración de aspecto micáceo que se forma en las rocas ígneas producto de la alteración de minerales ferromagnesianos primarios, como anfíboles y, sobre todo, micas (principalmente biotita y flogopita).

La presencia de filosilicatos y partículas finas respecto al proceso de flotación mostraron ser altamente contraproducentes en la eficiencia del proceso. En particular, el análisis nos indica que el desempeño metalúrgico en el proceso de recuperación se ve afectado directamente por la concentración de filosilicatos presentes en la muestra in situ.

Durante el proceso de molienda al igual que en la flotación, la presencia de filosilicatos genera un impacto negativo en la eficiencia del proceso. Una sobremolienda implica un daño notable en particular de las superficies laterales (direcciones cristalográficas “a” y “b”), haciendo las partículas más reactivas y favoreciendo el desarrollo de aglomerados de comportamiento plástico que se adhieren a los molinos (reducción del radio interno) y bolas que se encuentran dentro de dichos equipos, disminuyendo su capacidad efectiva de conminución.

En cuanto al rendimiento observado en las muestras *in situ*, el control geológico más determinante para la operación es la zona mineral, pues independiente de la mineralogía de ganga y la granulometría analizada es donde se encuentran las mejores recuperaciones. Cabe destacar la importancia del factor alteración, ya que la presencia de clorita manifiesta *peaks* de dureza tal como ocurre en la alteración clorítica y en las andesitas (litología con mayor cantidad de clorita).

Asimismo, se determinó que la clorita exhibe una continuidad espacial dentro del depósito, presentando el primer control mineralógico en ambas etapas, permitiendo proyectar con esta variable el comportamiento metalúrgico del mineral durante el proceso.

Para la flotación, la disposición espacial de los dominios de baja recuperación coincide con la distribución de una porción mayoritaria de las andesitas que constituyen el yacimiento, siendo justamente la litología que menor rendimiento presenta. En lo que respecta al factor alteración, la distribución de las alteraciones hidrotermales presentes en el yacimiento tienden a ajustarse de mejor forma a los dominios de recuperación que la litología. En el caso de la molienda se determinó que el principal control geológico sobre el *Work Index* corresponde a la alteración hidrotermal. La alteración clorítica se asocia a valores de alta dureza, mientras que la alteración potásica y cuarzo sericítica, predominantes en el yacimiento, se asocian a valores más bajos de este indicador.

Por último, se destaca el carácter cuantitativo de los métodos y datos utilizados en esta investigación, recalcando la importancia de la innovación y desarrollo de nuevas técnicas que permitan la captura de parámetros geológicos de forma cuantitativa, acorde a una industria minera cada vez más exigente. En virtud de esto, se hace relevante contar con métodos de toma de datos cuantitativos que, aplicados de manera correcta, sirvan como complemento a la metodología de mapeo, caracterización de los modelos de geociencias y permitan aumentar la sustentabilidad del proceso productivo.



## REFERENCIAS

- Abdi, H., Williams, L., 2010. Principal component analysis. Computational Statistics. Vol. 2, N°4, 433-459 pp.
- Acosta, H., 1981. Geología del yacimiento Los Pelambres y distribución de la mineralización en el perfil N- 6.490.300, Región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Santiago, Universidad de Chile, Santiago-Chile.
- Álvarez, P., 2006. Geología de la Alta Cordillera de San Juan entre los 31°30' y 32°00'. Informe Interno, Antofagasta Minerals, 111 pp, Santiago.
- Atkinson, W Jr., Sourivon, A. Vehrs, T., Faunes, G., 1996. Geology and mineral zoning of the Los Pelambres porphyry copper deposits, Chile. Society of Economic Geology Special Publication, N°5, 131-156 pp.
- Bergoeing, J., 2016. Evolución geoquímica del magmatismo de la Región de Los Pelambres (31°S) entre el Cretácico superior y el mioceno superior: implicancias para la evolución tectónica y metalogénica de los Andes de Chile Central.
- Bertens, A., Deckart, K., González, A., 2003. Geocronología U-Pb , Re-Os y 40Ar/39Ar del pórfido CuMo Los Pelambres, Chile central. Actas 10° Congreso Geológico Chile CD Rom, Concepción.
- Bond, F. Crushing and Grinding Calculations. British Chemical Engineering, Junio, 1961, 378-385 pp.
- Caso Base (2021). Superintendencia Geología, Minera Los Pelambres. Análisis y Desarrollo de Información Geometalúrgica, Minera Los Pelambres, AMSA. Informe técnico.
- Castelli, J. C., 2006. Geología de Los Pelambres y El Pachón: Geovectra, informe para AMSA, Santiago. 35 pp.

Charrier, R., 1981. Mesozoic and cenozoic stratigraphy of the Central Argentinian-Chilean Andes (32° - 35° S) and cronology of their tectonic evolution. Zentralblatt fuer Geologie und Palaeontologie. Teil I, N° 3, 4. 344-355 pp.

Cochilco, 2021. Producción cobre de mina por empresa.

Cortés, C., 2016. Efecto de la presencia de caolinita y montmorillonita en la flotabilidad de calcopirita de alta pureza en agua destilada, agua de mar y iones. Memoria de título Ingeniería Civil Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Davenport, W. G., King, M., Schlesinger, M., Biswas, A. K., 2002. Extractive Metallurgy of Copper. Fourth ed. Kidlington, Oxford, England, Elsevier Science Limited, pp. 57 – 72.

Diaz, R., 2012. La fiebre del Cobre o el errado camino al desarrollo. Editorial Urano. Santiago de Chile.

Duncan, R., 1991. Competition and the Coexistence of Species in a Mixed Podocarp stand. Journal of Ecology, 79(4), 1073-1084 pp.

Fustos, R., 2017. Descubrimiento de unidades geometalúrgicas por medio de análisis de conglomerados geoestadístico. Tesis de Doctorado en Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.

Finch, J., Gelinás, S., Moyo, P., 2006. Frother related research at McGill University. Minerals Engineering, Vol 19, pp. 726 – 733.

González, C., 2005. Control Estadístico Multivariable mediante Análisis de Componentes Principales (PCA) aplicado al área de destilación Planta I Methanex Chile Limited. Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil Químico, Facultad de Ingeniería, Universidad de Magallanes.

Guía Minera. (28 de julio de 2018). Minera Los Pelambres Ltda. <https://www.guiaminera.cl/minera-los-pelambres-ltda/>

Guitart, A., 2007. Geología de las nacientes de los ríos Mercedario y Teatinos (32° LS), Provincia de San Juan.

- Kawatra, S., 2006. *Advances in Comminution*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 568 pp.
- Lobos, L., 2015. Evaluación del uso de NaSH en el circuito de flotación selectiva de molibdeno de Los Pelambres.
- Lowell, J.D., Gilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits: *Economic Geology*, V. 65, 373-408 pp.
- Morell, S., 2014. Propuesta de modificación de circuito para planta de flotación colectiva Cu – Mo en planta concentradora El Chacay, Minera Los Pelambres.
- Moscoso, R., Padilla, H., Rivano, S., 1982. Hoja Los Andes, Región de Valparaíso, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile. 52-67 pp.
- Mosher J. B., Tague C. B., 2001. Conduct and precision of bond grindability testing. *Minerals Engineering*, 1187-1197 pp.
- Mpodozis, C., 2015. Mapa Geológico Regional del Área de Los Pelambres (esc 1:75.000). Informe Interno, Antofagasta Minerals, Santiago.
- Mpodozis, C., 2011. Geología e Historia Tectónica. Distrito Los Pelambres. Nuevos Antecedentes. [Diapositivas de PowerPoint]. Presentación interna.
- Mpodozis, C., Brockway, H., Marquardt, C., Perelló, J., 2009. Geocronología U/Pb y tectónica de la región de Los Pelambres-Cerro Mercedario: implicancias para la evolución cenozoica de Los Andes del centro de Chile y Argentina. En: Congreso Geológico Chileno, No.12., Santiago.
- Munizaga, F., Vicente. J.C., 1982. Zonación plutónica y volcanismo miocénico a la latitud 33°S de los Andes 7th Congr. Geol. Argent (resumé).
- Musso, R. J. E., Pérez, D. J., Rey, R., Toohey, J., 2012. Geología de las nacientes del río La Pantanosa, Cordillera Frontal (31 33'S), Provincia de San Juan, Argentina. En: XIII Congreso Geológico Chileno. Antofagasta 250-251 pp.
- Nguyen, A. V., Schulze, H. J., 2004. *Colloidal Science of Flotation*, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 677 – 708.

Olmos, B., 2018. Ensayos de conminución para evaluar el efecto de la aplicación de microondas a muestras minerales. Memoria de titulación para optar al título de ingeniero civil metalúrgico. Universidad Técnica Federico Santa María.

Oyarzún, M., Arévalo, A., 2011. Rock texture and BWi Relationships, El Teniente Ore Deposit, Chile. The first AUSIMM International Geometallurgy Conference, Brisbane, Queensland.

Pasten, R., 2018. Homologación de prácticas operacionales y estandarización de procesos en planta concentradora Los Pelambres. Tesis para optar al grado de magister en gestión y dirección de empresas.

Peña, D., 2002. Análisis de datos. Madrid: Mac Graw Hill, 133-158 pp.

Perelló, J., Sillitoe, R.H., Mpodozis, C., Brockway, H., Posso, H., 2012. Geologic setting and evolution of the porphyry copper-molybdenum and copper-gold deposits at Los Pelambres, central Chile: Society of Economic Geologists Special Publication 16, 79-104 pp.

Informe Técnico N°21, 1971. Investigación detallada de minerales en áreas seleccionadas de las Provincias de Atacama y Coquimbo. Nueva York.

Preece, R., 2016. Geochemical indicators for improved prediction of geometallurgical behavior in mine operations. Richard Preece Services LLC. Reporte Interno para Minera Escondida Ltda. 156 pp.

Presentación geología del yacimiento Los Pelambres (2016). Superintendencia Geología, Minera Los Pelambres. Análisis y Desarrollo de Información Geometalúrgica, Minera Los Pelambres, AMSA. Informe técnico.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garret, R., Dutter, R., 2008. Statistical data analysis explained: Applied environmental statistics with R. John Wiley & Sons, Ltd: 343 pp.

Rivano, S., Sepúlveda, P., 1991. Carta Geológica de Chile 69: Hoja Illapel, Región de Coquimbo. 132 pp.

Rojas, J., 2018. Evaluación de índice de trabajo (work index); en un yacimiento tipo pórfido de cobre y su implicancia geometalúrgica. Tesis para optar por el título de Ingeniero Geólogo. Pontificia Universidad Católica del Perú.

- Ruiz, L., 2017. Factibilidad técnica-económica de la integración de agua permeada en el proceso de flotación Rougher Cobre-Molibdeno de la Compañía Minera Doña Ines de Collahuasi SCM. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico.
- Saavedra, F., 2019. Modelamiento implícito de resistencia de roca en Minera Los Pelambres mediante estimación por inverso a la distancia y kriging ordinario. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción.
- Sillitoe, R.H., 1973. Geology of the Los Pelambres porphyry copper deposits, Chile. *Economic Geology*. Vol. 68 N°1, 1-10 pp.
- Skewes, M.A, Atkison, W. Jr., 1985. Petrology of the early formed hydrothermal veins within the central potassic alteration zone of Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile: *Revista Geológica Chilena*, n° 25-26, 39-56 pp.
- Skewes, M.A., 1984. Biotitas en la zona de alteración potásica del depósito de cobre porfídico Los Pelambres: Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Actas v.2, 3-341 pp.
- Superintendencia de Geotecnia Minera Los Pelambres, 2008. Presentación Geotecnia MLP. Presentación interna.
- Superintendencia de Geotecnia Minera Los Pelambres, 2009. Presentación Geotecnia MLP. Presentación interna.
- Superintendencia Geología, Minera Los Pelambres., 2012. *Compilación Geología*. Informe interno, 39 pp.
- Superintendencia Geología, Minera Los Pelambres., 2017. *Análisis y Desarrollo de Información Geometalúrgica*, Minera Los Pelambres, AMSA. Informe técnico.
- Superintendencia Geología, Minera Los Pelambres., 2019. Presentación Geología MLP. Presentación interna.
- Vianna, S. M., 2004. The effect of particle size, collector coverage and liberation on the floatability of galena particles in an ore. Tesis (Doctorado) The University of Queensland, Australia. Department of Mining, Minerals and Materials Engineering. 337 pp.

Yianatos, J., 2005. Flotación de minerales. Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales, Universidad Técnica Federico Santa María.

Zapotitla, J., 2011. Análisis de componentes principales. 44-55 pp.

Zhao, R., Han, Y., He, M., Li, Y.,a 2017. Grinding kinetics of quartz and chlorite in wet ball milling. Powder Technology, 305, 418-425 pp.





## ANEXOS

**Tabla A.** Correlación de Pearson entre las variables metalúrgicas de Bond Work Index, Recuperación 180  $\mu\text{m}$  y los minerales detectados mediante QEMSCAN®.

Minerales	Bond Work Index (KWh/tc)	Recuperación Rougher (%)
Cuarzo	-0,003057927384	0,01647037659
Biotita	0,03770183693	-0,006660344865
Clorita	<b>0,2518641918</b>	<b>-0,2376931351</b>
Arcillas	-0,04451693431	-0,1855833231
Feld-K	-0,0347823773	0,1531346593
Musc-Ser	0,08124914038	-0,1201072108
Anortita	0,1097813396	-0,07849796439
Apatito	0,1445186936	-0,02166118248
Anh/Yeso	0,3492750126	0,1667660968
Calcita	0,1830699629	0,07666974597
Calcopirita	0,195566425	0,1557601006
Covelina	-0,0221766097	-0,07508224181
Enargita	-0,00884499179	-0,03505778002
Molibdenita	0,07613247874	0,09414668492
Pirita	0,1638814683	-0,1564416035
Bornita	0,1356206122	0,1242504347
Calcosina	-0,225365783	-0,07599752135