



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PLANIFICACIÓN INTEGRADA MINA-CONCENTRADORA-RELAVES

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN GESTIÓN Y  
DIRECCIÓN DE EMPRESAS

GONZALO ALEJANDRO CARO PINEDA

PROFESOR GUÍA  
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
GERARDO DÍAZ RODENAS  
LORETO BURGOS RODRÍGUEZ

SANTIAGO DE CHILE

2018

## RESUMEN

Este trabajo consiste en el estudio de los efectos en el negocio debido a la implementación de un modelo conceptual de negocio minero, que considera de manera integrada las variables claves relacionadas con: i) la ley de cobre, ii) el porcentaje posible de recuperación del mineral mena\* en planta concentradora, y iii) el porcentaje de recuperación de agua desde los relaves al ser sometidos a un proceso intensivo de recuperación de agua tal como un espesamiento de alta densidad, pasta o filtrado. Esta integración de variables, considerando incluso a los relaves, se denomina en este trabajo como Planificación Integrada Mina-Concentradora-Relaves y se identificará con el acrónimo PIMCR.

Para el desarrollo del trabajo, primero se contextualiza la necesidad que tiene la industria minera actualmente (y mayormente en el futuro) de optimizar el uso del agua de proceso. Debido a nuevas restricciones ambientales y comunitarias - para operaciones actuales y por sobre todo para proyectos a futuro- las empresas mineras están considerando procesos intensivos de recuperación de agua desde los relaves, que les permita minimizar la reposición de agua desde fuentes externas. Esto se suma además, a los objetivos que la minería se ha planteado a futuro sobre una minería verde, sustentable y con el propósito de agregarle un valor, e incluso dejar de ser un *commodity*, a través de la diferenciación por valor agregado.

Dentro del mismo contexto, se explican las alternativas de procesamiento de relaves que existen actualmente para la optimización de la recuperación de agua. Finalmente, se describe la forma de la planificación minera comúnmente utilizada, que está enfocada principalmente a la variable única de ley de cobre, y las tendencias de modernizar este tipo de planificación incorporando otras variables de proceso tales como porcentaje de recuperación en planta, capacidades de tratamiento, entre otras.

Este trabajo se desarrolla tomando parámetros e información real de la mina de la División Radomiro Tomic de Codelco (DRT). Se consideran los parámetros de los relaves que genera y podría generar a futuro la DRT y el proceso de espesamiento de alta densidad. Se desarrolla un modelo conceptual de PIMCR y se compara con el modelo de planificación basada en leyes de corte y otra que integra sólo el porcentaje de recuperación mineral en planta.

El resultado demuestra que la PIMCR tiene ventajas en varios aspectos, se logra una mayor cubicación de mineral posible de tratar en planta y tanto el porcentaje de cobre fino recuperable como el valor económico pueden llegar a ser mayores.

---

\* Mena: mineral con valor económico; ganga, mineral sin valor económico

## SUMARY

*This investigation consists of a study of the effects in the mining business due to the implementation of a conceptual mining business model, which incorporates in an integrated manner the key variables in relation to i) the ore grade, ii) the percentage of ore recovery in the concentration plant, and iii) the percentage of water recovery from tailings as a result of an intense water recovery process such as high density thickening, paste or filtered. The integration of these variables, taking into consideration tailings will be referred to as Mine-Concentrator-Tailings Integration Planning (PIMCR in Spanish).*

*In order to develop this work, firstly the need of the current mining business (more so in the future) to optimize its water usage in the whole process is put under context. Due to new environmental and community restrictions –for current and future operations- mining companies are considering intensive water recovery from tailings, in order to minimize water make up from external sources. This is coherent with the mining industry's vision for a sustainable and green future, where the goal is to add value, even ceasing to be a commodity through differentiation.*

*In the same context, current alternatives to tailing processing in order to recover water are reviewed. Finally, the common mining planning nowadays used is described, which is focused mainly on the single variable of copper grade, as well as the tendency to modernize this type of planning which incorporates other variables such as plant % recovery, treatment capacities, among others.*

*This work consider parameters and real information from the mine at Radomiro Tomic Division of CODELCO (DRT, in Spanish). Parameters of actual current and future tailings, as well as the process of high density thickening are considered. A conceptual model of PIMCR is developed and it is compared to the planning model based on cut off grades and another one that considers only the percentage of ore recovery in concentrator plant.*

*The result shows that PIMCR has several advantages: a greater quantification of the ore which is treatable at the plant is possible and the percentage of fine copper as well as the economic value can be higher.*

A mi familia, quienes me acompañaron  
a lo largo de esta experiencia. Cultivamos juntos amor,  
tiempo, energía y paciencia

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo representa el término de 2 años de estudio, durante los cuales he recibido el apoyo y confianza de colegas, amigos, compañeros de clases y familiares que me han acompañado, y a quienes deseo agradecerles en esta oportunidad.

En primer lugar, son muchos los colegas y compañeros de trabajo que me han ayudado de una u otra forma, por los que les agradeceré a todos como institución, como Codelco, una empresa muy especial para mí desde mi niñez. Codelco confió en mí para este desafío de formación profesional, entregándome apoyo financiero, tiempo, sugerencias e información. Sin este apoyo de la empresa, esto no hubiese sido posible.

Quiero agradecer a la fortuna por haberme integrado a un grupo de compañeros del postgrado, a quienes desde el primer día los reconocí como un grupo excepcional en un amplio sentido de la palabra. El nivel de conocimientos en cada uno de sus temas enriquecía profundamente los debates y discusiones académicas en la sala; y el gran sentido del humor de todos hizo que el aprendizaje fuera mucho más efectivo con las largas jornadas de clase. Las jornadas de encuentro extra-académicas fueron, desde muy temprano en el curso, una dinámica muy importante lo que logró estrechar lazos que estoy seguro permanecerán por siempre.

Finalmente quiero dar infinitas gracias a mi esposa Sofía, compañera de mi vida. A mis hijas Javiera y Fernanda, y a mi hijo Gabriel. Siempre han estado junto a mí, entregándome toda su energía y ánimo, comprendiendo y aceptando que en muchas ocasiones haya debido quitarles tiempo por el estudio.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
<b>SUMARY</b> .....	<b>ii</b>
AGRADECIMIENTOS .....	iv
TABLA DE CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos .....	2
<b>3 ALCANCE DEL ESTUDIO</b> .....	<b>2</b>
<b>4 METODOLOGÍA</b> .....	<b>3</b>
4.1 Marco teórico .....	3
4.2 Desarrollo del trabajo .....	4
4.3 Conclusiones y recomendaciones .....	4
<b>5 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
<b>5.1 Minería sustentable</b> .....	<b>5</b>
5.1.1 Producción de cobre .....	5
5.1.2 Consumo de agua .....	8
5.1.3 Mercado del cobre.....	11
5.1.4 Nuevas regulaciones y leyes .....	14
5.1.5 Participación de las comunidades .....	16
5.1.6 Impacto al medio ambiente .....	17
<b>5.2 Procesamiento de relaves</b> .....	<b>19</b>
5.2.1 Producción de relaves .....	19
5.2.2 Operación de relaves .....	19
5.2.3 Procesamiento de recuperación de agua desde los relaves.....	21
5.2.4 Variables claves para el proceso de recuperación de agua desde los relaves.....	27
<b>5.3 Planificación del negocio minero</b> .....	<b>30</b>
5.3.1 Cadena de valor del negocio minero .....	30
5.3.2 Metodología de la planificación minera.....	41
5.3.3 Planificación integrada .....	46
<b>6 PLANIFICACIÓN INTEGRADA MINA, CONCENTRADORA Y RELAVES</b> .....	<b>49</b>
6.1 Planificación integrada incluyendo el proceso de recuperación intensiva de agua desde los relaves .....	49
6.2 Variables geometalúrgicas .....	49

6.3	Modelos de arcillas.....	50
6.4	Incertidumbre geológica .....	53
6.5	Estadística de parámetros .....	55
6.6	Parámetros para la valorización económica .....	57
6.7	Modelos de valorización económica.....	57
7	<b>ESTUDIO PROPIEDADES RELAVES MINA RT.....</b>	<b>59</b>
7.1	Gravedad específica.....	60
7.2	Distribución granulométrica de partículas .....	60
7.3	Velocidad de Sedimentación .....	62
7.4	Reología.....	62
7.5	Comportamiento coloidal.....	63
8	<b>ANÁLISIS DEL EFECTO EN EL NEGOCIO MINERO DE LA PMIR .....</b>	<b>66</b>
8.1	Cubicación mineral.....	66
8.2	Valor económico.....	68
9	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
9.1	Conclusiones .....	70
9.2	Recomendaciones .....	70
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1.	Línea de base 2015 y metas 2035 de la minería chilena .....	6
Tabla 6.1.	Parámetros económicos para modelo PIMCR.....	57
Tabla 7.1.	Densidad de sólidos.....	60
Tabla 7.2.	Tamaños característicos y % de finos .....	61
Tabla 7.3.	Velocidades de sedimentación en m/h (15 g/t de floculante) .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1.	Esquema metodológico del trabajo.....	3
Figura 5.1.	Capacidad estimada de producción de cobre en Chile al 2026 .....	7
Figura 5.2.	Proyección de mineral extraído en Chile y el mundo.....	7
Figura 5.3.	Consumo de agua en la industria minera del cobre en Chile .....	8
Figura 5.4.	Consumo esperado de agua en la industria minera del cobre, al 2025 .....	9
Figura 5.5.	Distintas fuentes de extracción de agua en la minería del cobre en Chile .....	9
Figura 5.6.	Consumo esperado de agua de mar en la industria minera del cobre, al 2025.....	10
Figura 5.7.	Recirculación de agua en la minería del cobre en Chile.....	10
Figura 5.8.	Distribución de costos operacionales en plantas concentradoras chilenas .....	11
Figura 5.9.	Perspectivas de consumo mundial de cobre en el largo plazo.....	12
Figura 5.10.	Consumo mundial histórico de cobre refinado.....	12
Figura 5.11.	Principales consumidores de cobre en años 2007 y 2016 .....	13
Figura 5.12.	Precio histórico del cobre refinado.....	14
Figura 5.13.	Descarga de relaves en bahía de Chañaral .....	20
Figura 5.14.	Diagrama proceso convencional de relaves .....	21
Figura 5.15.	Espesador <i>high rate</i> .....	22
Figura 5.16.	Depósito de relaves convencional .....	23
Figura 5.17.	Diagrama proceso espesamiento alta densidad y/o pasta .....	24
Figura 5.18.	Depósito de relaves alta densidad y/o en pasta .....	25
Figura 5.19.	Diagrama proceso filtrado de relaves .....	26
Figura 5.20.	Depósito de relaves filtrados.....	27
Figura 5.21.	<i>Water make up</i> histórico en plantas concentradoras en Chile.....	28
Figura 5.22.	<i>Water make up</i> según tamaño industria minera en Chile .....	28
Figura 5.23.	Cadena de valor de la industria minera .....	30
Figura 5.24.	Secuencia típica en la pérdida de valor de una unidad de mineral .....	31



Figura 5.25. Cuatro componentes de la planificación minera .....	32
Figura 5.26. Claves de éxito para el plan de negocio .....	35
Figura 5.27. Tres áreas claves en la planificación minera .....	36
Figura 5.28. Diagrama de Riesgo-Retorno .....	40
Figura 5.29. Proceso de planificación minera .....	41
Figura 5.30. Estrategia de secuencia de explotación según pits anidados .....	43
Figura 5.31. Esquema de la envolvente económica de un rajo .....	46
Figura 5.32. Ejemplo PMI aplicada en banco.....	48
Figura 6.1. Modelo propuesto, para variables geometalúrgicas .....	49
Figura 6.2. Sólido IZD de RT, con información de compósitos y % de arcillas totales .....	51
Figura 6.3. Distribución de muestras con datos NIR en rajo RT .....	52
Figura 6.4. Proporción de arcillas y filosilicatos en unidades de alteración de RT .....	53
Figura 6.5. Planificación tradicional v/s Planificación sobre incertidumbre.....	54
Figura 6.6. Resultados de % de sólidos para muestras de relave.....	55
Figura 6.7. Leyes medias de CuT por resultado .....	56
Figura 6.8. Recuperación promedio de Cu por resultado .....	56
Figura 6.9. Recuperación de Agua de los Relaves por resultado.....	57
Figura 7.1. Distribución granulométrica de los sólidos, para los compósitos definidos .....	61
Figura 7.2. Parámetros reológicos en función del porcentaje de sólidos.....	63
Figura 7.3. Tecnología espesamiento según YS .....	63
Figura 7.4. Resultados difracción rayos X sobre fracción arcilla (bajo 5 mm) .....	64
Figura 7.5. Resultados difracción rayos X sobre fracción arcilla (bajo 1 mm) .....	64
Figura 8.1. Tonelaje de mineral procesado.....	66
Figura 8.2. Ley media de cobre total .....	67
Figura 8.3. Cobre fino recuperable.....	68
Figura 8.4. Valor esperado actualizado.....	69

## 1 INTRODUCCIÓN

Los proyectos mineros, ya sean *greenfield* o de continuidad operacional, se enfocan a estudiar el negocio considerando principalmente las leyes de corte mineral y secundariamente las variables mineras y metalúrgicas que inciden en el beneficio del mineral. Las exploraciones, las estimaciones de recursos y reservas de mineral, junto con las pruebas metalúrgicas orientadas a la recuperación de mineral son desarrolladas de manera exhaustiva y con un estándar metodológico que permite establecer, con cierto grado de confiabilidad, el valor del negocio minero. Sin embargo, los nuevos desafíos de la gran minería con respecto a la sustentabilidad, las comunidades y el medio ambiente, han obligado a que el enfoque del negocio minero incluya aspectos de eficiencia operacional, cuidado con el medio ambiente y buenas relaciones con las comunidades. Es por esto que algunos de los procesos mineros como el manejo de los relaves o el suministro de agua fresca, que antes eran de bajo costo y desarrollo, hoy en día se han vuelto estratégicos, de alta complejidad de definición y con costos que impactan en el negocio.

El consumo de agua continental es una tendencia para las operaciones actuales y prácticamente algo imposible para proyectos *greenfield*. La tendencia es migrar a consumir agua de mar (con todo lo que eso conlleva en términos de desalinización y transporte a la faena minera) y aprovechar de mejor manera este recurso hídrico. Por lo tanto, se ha transformado en un aspecto clave y estratégico en el negocio minero. Muchas empresas están empezando a implementar procesos más complejos para la recuperación de agua en sus procesos.

Respecto al manejo de los relaves, es importante tener claro que cerca del 97% del material que se extrae de la mina se transforma después en relave que junto con casi toda el agua de proceso utilizada, es dispuesto en un depósito de relave. La recuperación de agua, desde los relaves, se transforma entonces en un proceso que puede condicionar fuertemente la estrategia de beneficio de mineral. La optimización en la recuperación de agua de proceso implica: optimizar el consumo de agua fresca; un menor impacto ambiental (y riesgo) en los depósitos de relaves; un menor impacto en las comunidades aledañas y un menor costo de inversión para el cierre operacional futuro.

No obstante lo anterior, los esfuerzos de la industria en estudios de características metalúrgicas del mineral ganga orientados a la recuperación de agua en procesos de espesamiento de alta densidad y/o filtrado de relave son insuficientes y no existe un nivel de estandarización internacional similar a los estudios orientados a la recuperación de mineral. Lo mismo sucede con la incorporación de estas variables en los modelos de negocio.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

El objetivo del trabajo propuesto, es estudiar el efecto de complementar un modelo de planificación minera al incluir en la toma de decisiones el procesamiento de recuperación intensiva de agua desde los relaves.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar los factores técnicos que afectan al proceso de recuperación de agua desde los relaves y cómo estos pueden ser estudiados geometalúrgicamente.
- Definir en qué parte de la planificación minera, es conveniente incorporar las variables relacionadas con la recuperación de agua desde los relaves
- Evaluar económicamente un caso real simplificado.
- Entregar las recomendaciones de estudios y trabajos futuros relacionados con esta línea de trabajo

## **3 ALCANCE DEL ESTUDIO**

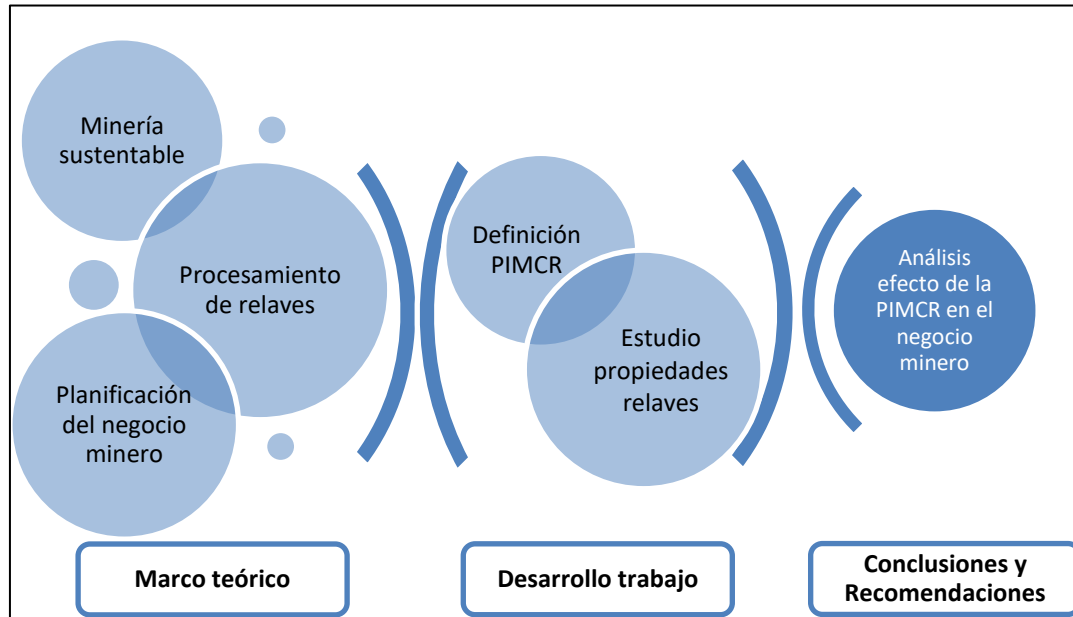
El estudio pretende complementar un modelo conceptual de una planificación minera integral, incluyendo el proceso de recuperación intensiva de agua desde los relaves, por lo que se denomina con el acrónimo PIMCR (Planificación Integral Mina-Concentradora-Relaves).

La información utilizada corresponde a la disponible del Distrito Norte de Codelco, que tiene relación con las variables que condicionan el proceso de recuperación de agua desde los relaves, el transporte de la pulpa final y su depositación.

El modelo no considerará otras variables relacionadas con el proceso de recuperación de mineral, ni con el proceso de molienda.

## 4 METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente trabajo se describe esquemáticamente en la Figura 4.1.



Ref.: Elaboración propia

Figura 4.1. Esquema metodológico del trabajo

### 4.1 Marco teórico

Se contextualiza el marco teórico en el cual se desenvuelve el trabajo, explicando 3 conceptos principales:

- **Minería sustentable:** Se indica la relevancia que tiene actualmente, el desarrollo de una minería sustentable, enfocada no solo al negocio de comercialización del mineral, sino que también considerando los impactos ambientales, sociales y culturales que tiene la industria. Se hará alusión a las nuevas normativas chilenas y extranjeras, empoderamiento de las comunidades debido al mayor acceso a la información, eventos catastróficos sucedidos en Chile y sobre todo en el extranjero, respecto a colapsos de depósitos de relaves, y a las perspectivas que han identificado altos ejecutivos de la industria, respecto al uso del recurso hídrico y a los desafíos en esa materia que tiene la industria en el corto y mediano plazo.
- **Procesamiento de relaves:** Se comenta la tendencia de la industria minera (mediana y gran minería), respecto a la incorporación de proceso más intensivo de recuperación de agua desde los relaves generados con diversos propósitos: menor impacto ambiental y social;

mayor recuperación de agua; mayor seguridad. No obstante, esto implica normalmente un mayor costo.

Se explica qué son los relaves, porqué existen y cómo se gestionan actualmente, tanto en Chile como en el extranjero.

Se menciona los procesos que son factibles hoy en día, a ser aplicados en los relaves para optimizar la recuperación de agua.

Se hace directa mención al trabajo que ha desarrollado Codelco en la materia, para su proyecto de implementación de la tecnología de relaves espesados.

- **Planificación del negocio minero:** Se comenta la práctica actual para la planificación minera y para el establecimiento de la secuencia de explotación minera, según la envolvente económica establecida según recomendaciones de la industria.

#### 4.2 Desarrollo del trabajo

El desarrollo del trabajo se enfoca en 2 aspectos principalmente:

- **Definir la Planificación Integrada Mina-Concentradora-Relaves (PIMCR).** Se establece la necesidad que tiene el incorporar la información de los materiales provenientes del yacimiento, que inciden en el proceso de relaves, y porqué es algo nuevo en la industria. Se presentan los conceptos que deben ser considerados en una PIMCR.
- **Estudio Propiedades Relaves.** A partir de los parámetros que inciden en el procesamiento de los relaves, identificados en el marco teórico, se propone una variable de control que permita complementar una planificación minera integrada de manera de poder visualizarla y controlarla en la planificación de extracción y procesamiento.

#### 4.3 Conclusiones y recomendaciones

Se presenta un ejemplo conceptual de aplicación, que muestra los efectos de la propuesta de la PIMCR, desde el punto de vista del negocio minero.

Debido a la potencialidad de la PIMCR y de lo extenso que es el trabajo de planificación, se entregan recomendaciones de trabajos posteriores para lograr el cumplimiento de las ventajas de lo propuesto.

## 5 MARCO TEÓRICO

### 5.1 Minería sustentable

#### 5.1.1 Producción de cobre

*“La minería está transitando a una nueva etapa y sus principales desafíos son incorporar más conocimiento, innovación y desarrollo tecnológico”, (Fundación Chile, 2016).*

Con esta es la consigna, el equipo conformado por La Alianza Valor Minero y el Programa Alta Ley (iniciativa público-privado apoyado por CORFO y el Ministerio de Minería, y coordinado por Fundación Chile) da inicio al capítulo 3 La Minería del Futuro, Visión al 2035 en su informe de *roadmap* minero al 2035.

Este informe acerca de la visión de la minería chilena hacia el futuro y su participación como eje principal para el desarrollo económico del país, nace a partir de las recomendaciones establecidas en el informe “Minería y Desarrollo Sostenible en Chile, hacia una Visión Compartida”, elaborado por el Consejo de Innovación para el Desarrollo (CNID) en el 2014, el cual fue conformado por políticos, ex ministros, empresarios, trabajadores y dirigentes sociales encabezados por el ex Presidente de la República Ricardo Lagos.

La visión estratégica que se ha implementado a nivel país, por este *roadmap* es *“exportar 130 a 150 millones de toneladas de cobre y otros minerales, durante los 20 años que median entre 2015 y 2035, habiéndose materializado la enorme inversión que ello requiere...”*, y también *“establecer un liderazgo global en minería sostenible... posible gracias a una gestión ambiental con normas y referencias para el sector basadas en las mejores prácticas industriales, que permitan racionalizar las exigencias y los procesos de permisos, facilitando el control por parte del Estado.”*

Es decir, el desafío de la industria no es menor, es el de realizar las cosas de manera muy distinta a como las ha desarrollado hasta hoy. Se pretende que las exportaciones de mineral sean mayores, con restricciones más exigentes a las acostumbradas. Esto, sumado a que las leyes de mineral de los yacimientos chilenos son cada vez menores, lo que significa que la ventaja comparativa se ve disminuida con respecto a otros países. Esto requiere que evolucionemos de manera significativa en nuestras ventajas competitivas.

La Tabla 5.1 resume las metas definidas, con métricas muy específicas de producción, costos, desarrollo y exportaciones.

**Tabla 5.1. Línea de base 2015 y metas 2035 de la minería chilena**

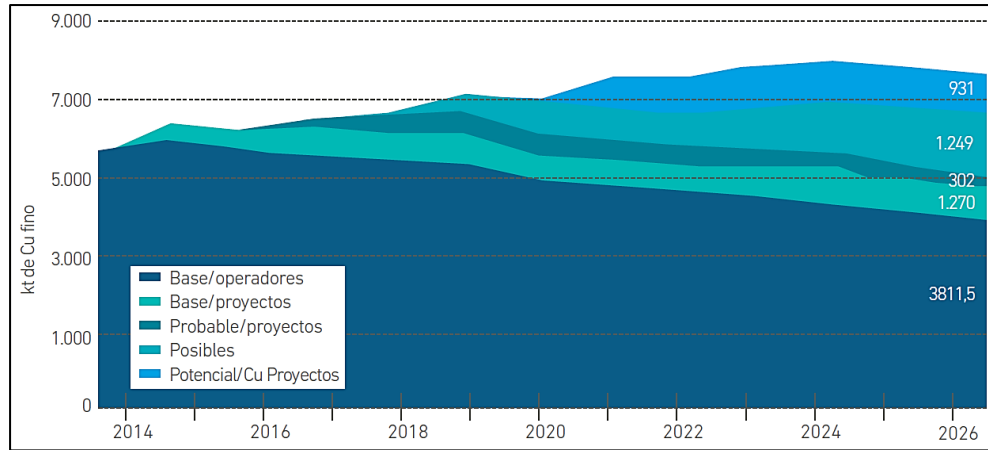
<b>Línea de base (2015)</b>	<b>Meta al 2035</b>
5,5 millones de toneladas métricas de cobre promedio producidas durante los últimos 10 años	7,5 millones de toneladas métricas de producción anual promedio en los próximos 20 años
40% de producción en primeros cuartiles de costos de la industria a nivel global	80% de producción en primeros cuartiles de costos de la industria a nivel global
65 empresas proveedoras de clase mundial	250 empresas proveedoras de clase mundial
US\$ 537 millones en exportaciones de bienes y servicios vinculados a la minería	US\$ 4.000 millones en exportaciones de bienes y servicios vinculados a la minería

Ref.: Elaboración propia, basado en (Fundación Chile, 2016)

En términos de producción, la Figura 5.1 muestra la capacidad estimada de producción de cobre para el año 2026, en donde se observa que la cantidad de cobre a producir por parte de las instalaciones existentes (Base) presenta una tendencia a la baja, incluso si se consideran los proyectos que se consideran ya en desarrollo. Para incrementar el nivel de producción, deben materializarse los proyectos que permitan extraer los recursos existentes en los yacimientos (Probables, Posibles y Potenciales).

Para alcanzar la meta definida, la industria minera nacional tendría que producir anualmente un promedio de 7,5 millones de toneladas métricas durante los próximos 20 años. La brecha respecto de este escenario es sustantiva si se considera que durante los últimos 10 años la minería chilena ha producido un promedio anual de 5,5 millones de toneladas métricas de cobre.

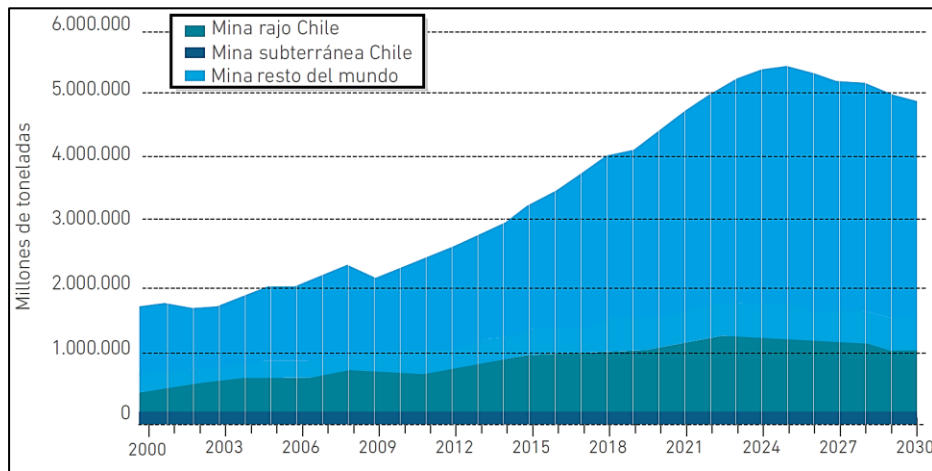
De mantenerse las condiciones actuales, la producción de cobre alcanzaría su máximo durante el año 2017 con 6.304 kt de Cu Fino. Posteriormente, ésta comenzaría a disminuir paulatinamente hasta llegar en el 2026 a 5.081 kt de Cu Fino. Este escenario representa una condición de bajo potencial, donde la minería chilena pierde competitividad y liderazgo respecto de la producción mundial y se reducen las posibilidades del país para iniciar un proceso de diversificación productiva en torno al desarrollo de una industria de proveedores de bienes y servicios, pues la escala y complejidad de los desafíos que podrían estimular el desarrollo local de conocimiento y tecnologías sería baja. Por otra parte, si Chile lograra superar las barreras que hoy impiden el desarrollo competitivo de la minería, la producción de cobre podría alcanzar 7.563 kt de Cu Fino al 2026.



Ref.: (Fundación Chile, 2016)

**Figura 5.1. Capacidad estimada de producción de cobre en Chile al 2026**

Este desafío no es menor si se observa que a nivel mundial, todo este esfuerzo sólo permitirá que Chile se mantenga como uno de los actores relevantes en el mercado del cobre en el largo plazo. En la Figura 5.2, se observa que con la materialización de los proyectos probables, posibles y potenciales, Chile en el mejor de los casos, inevitablemente migrará desde un 25% de participación actual en la producción de cobre, a un 20% aproximadamente.



Ref.: (Fundación Chile, 2016)

**Figura 5.2. Proyección de mineral extraído en Chile y el mundo**



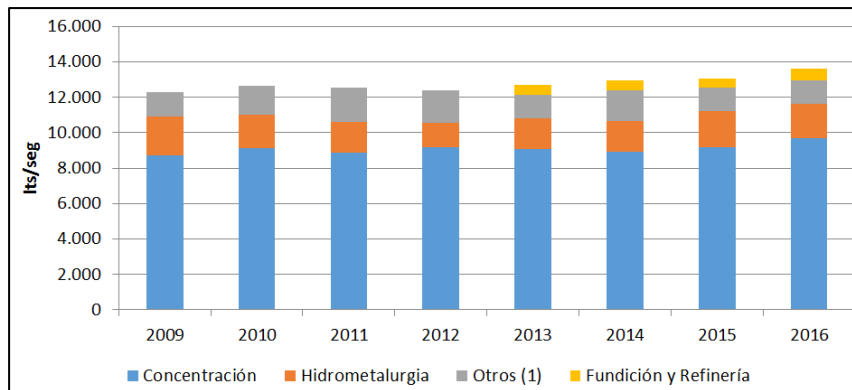
### 5.1.2 Consumo de agua

La industria minera es exhaustiva en el consumo de agua para el proceso productivo.

Históricamente el consumo de agua se ha mantenido en órdenes de los 12.000 y 13.000 l/s, con una tendencia al aumento, de acuerdo al aumento también de las producciones mineras. En la Figura 5.3 se presenta la distribución de este consumo, por el proceso minero específico, en donde a partir del año 2013, el consumo en fundición y refinería comienza a formar parte de la estadística registrada por Cochilco.

De acuerdo al análisis desarrollado por Fundación Chile (2016), este consumo de agua fresca se encuentra en torno a los 0,5 y 0,7 metros cúbicos por tonelada de mineral procesado, siendo la evaporación y retención de agua en los relaves las mayores razones de pérdida que gatilla este consumo.

La tendencia de aumento en el consumo de agua, se ha visto enfrentada con el aumento en la participación de las comunidades y sectores ambientalistas quienes critican el consumo de aguas continentales por parte de las empresas mineras. Las empresas mineras han comenzado a definir 2 focos estratégicos en la materia, al ser este un recurso muy importante e imprescindible en el negocio: 1) definir una nueva fuente de extracción de agua fresca (agua de mar); y 2) optimizar al máximo el consumo de esta agua en el proceso, optimizando su reciclaje.

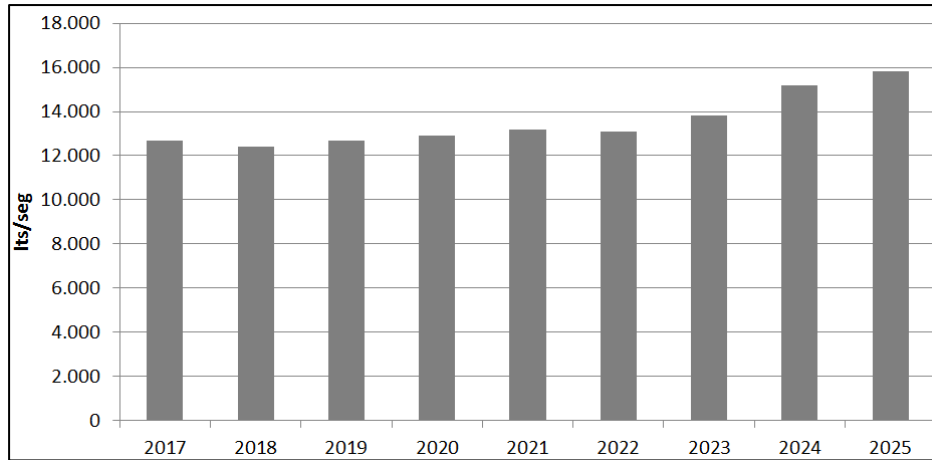


Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2016)

**Figura 5.3. Consumo de agua en la industria minera del cobre en Chile<sup>2</sup>**

Para el año 2025, se espera que el consumo de agua alcance valores cercanos a los 16.000 l/s (ver Figura 5.4), lo que significaría un aumento del 20% aproximadamente con respecto al consumo actual. (Cochilco, 2015).

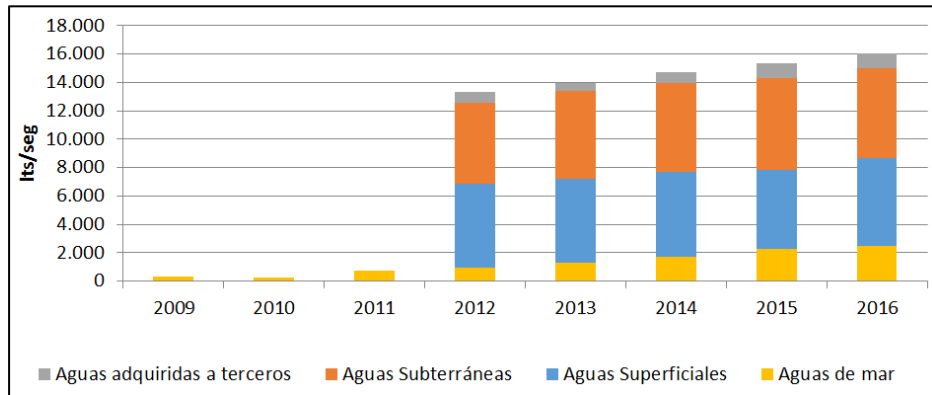
<sup>2</sup> El ítem "Otros" corresponde a agua utilizada en la mina para la supresión de polvo en caminos, agua potable utilizada en campamentos y de servicios auxiliares.



Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2015)

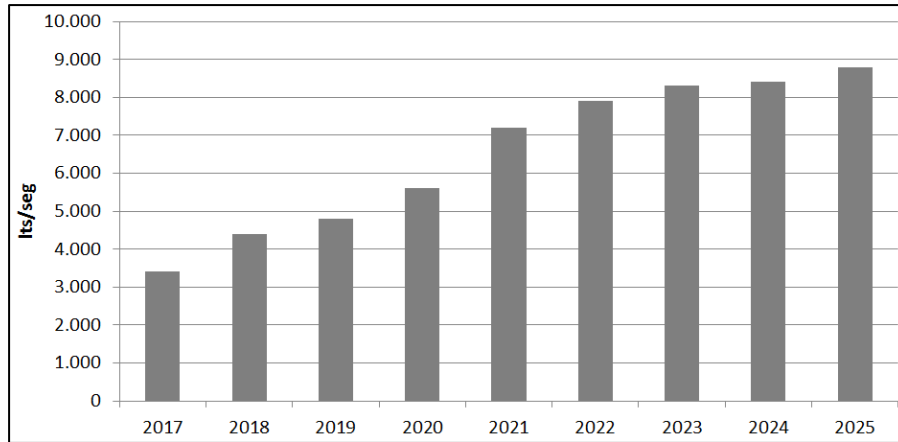
**Figura 5.4. Consumo esperado de agua en la industria minera del cobre, al 2025**

Respecto al consumo de agua de mar, su incremento desde el año 2009 (316 l/s) al 2016 (2.446 l/s) fue del 675%, tal como lo muestra la Figura 5.5. Su proyección al año 2025 alcanza los 8.800 l/s, de acuerdo a los proyectos programados dentro del período, lo que significa un crecimiento de casi 260% respecto al 2017 (Cochilco, 2015).



Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2016)

**Figura 5.5. Distintas fuentes de extracción de agua en la minería del cobre en Chile**

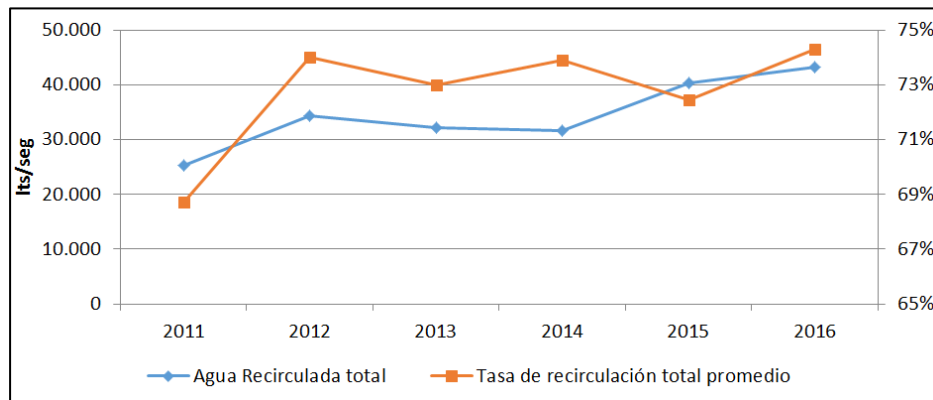


Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2015)

**Figura 5.6. Consumo esperado de agua de mar en la industria minera del cobre, al 2025**

Desde el punto de vista de la recirculación de agua de proceso, esta también ha experimentado un crecimiento, tal como lo muestra la Figura 5.7. En términos de caudal, desde el 2011 al 2016, el reciclaje ha aumentado desde 25.367 a 43.247 l/s, lo que significa un crecimiento del 70,5%.

Las tasas de recirculación se han mantenido por sobre el 70% de recirculación a partir del año 2012, sin embargo, esto debiera incrementarse aún más si se consideran los altos costos de reemplazar las pérdidas generadas en el proceso, con agua de mar.



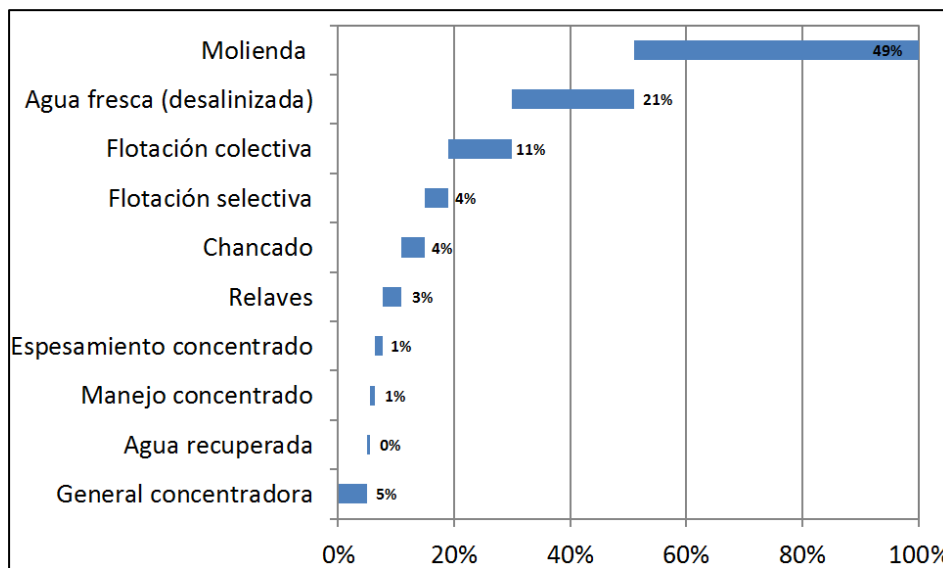
Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2016)

**Figura 5.7. Recirculación de agua en la minería del cobre en Chile**

Los costos que significa extraer agua de mar, desalinizarla y transportarla hacia el lugar donde se ubican los grandes yacimientos mineros, han obligado a las mineras a desafiarse a sí mismas, buscando alternativas de optimización de uso de energía.

La Figura 5.8 muestra la relevancia que tiene en los costos operacionales de las plantas concentradoras en Chile, el suministro de agua fresca desalinizada (21%) y lo bajo que es actualmente el costo de operación de los relaves y del agua recuperada (menos del 5% en conjunto).

De aquí es donde surge entonces, la necesidad de implementar procesos intensivos de recuperación de agua desde la fuente de mayor pérdida que son los relaves. En el capítulo 5.2 se presentan las alternativas existentes hoy en día para tales efectos y las tendencias a futuro, que permitirán optimizar la recirculación de agua y que representan una oportunidad para los desafíos de la minería del cobre en Chile.

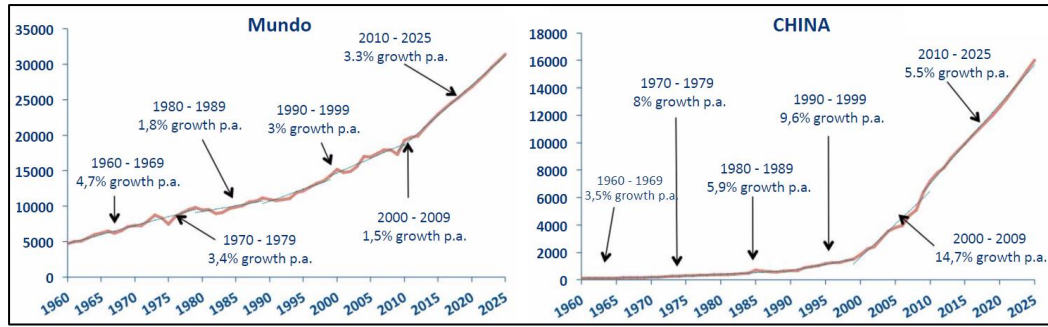


Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2015)

**Figura 5.8. Distribución de costos operacionales en plantas concentradoras chilenas**

### 5.1.3 Mercado del cobre

Las perspectivas para el mercado del cobre, con respecto al consumo de cobre a nivel mundial, se reflejan en la Figura 5.9, en donde se observa un alza proyectado al 2025 asociado a un crecimiento económico mundial del 3,3% por año (Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2013).

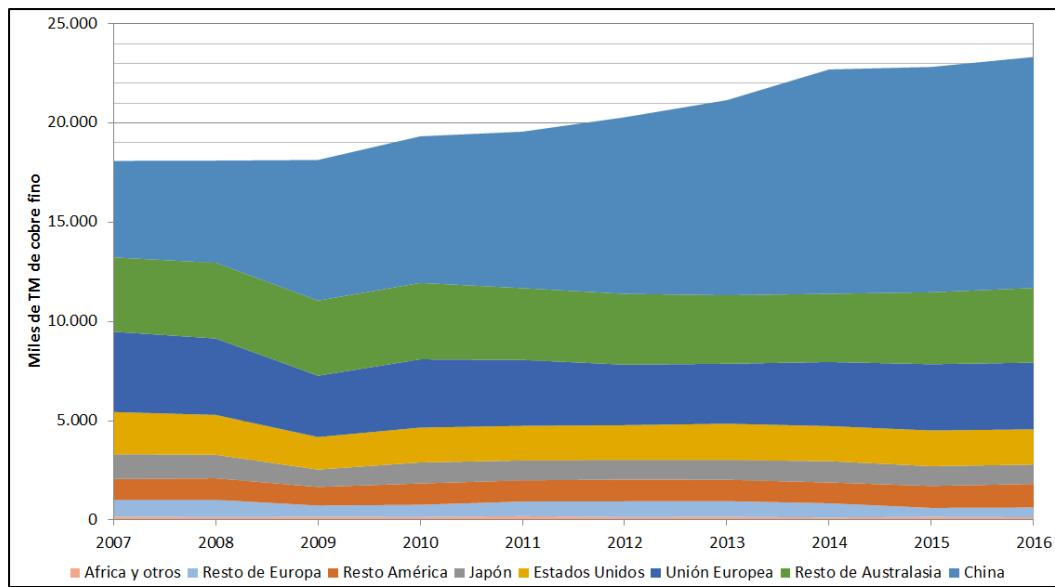


Ref.: (Ministerio de Minería, Gobierno de Chile, 2013)

**Figura 5.9. Perspectivas de consumo mundial de cobre en el largo plazo**

Esta tendencia está fuertemente influenciada por las proyecciones de crecimiento de China que en el mismo período, se estima que la potencia asiática tendría un crecimiento económico anual del 5,5% aproximadamente.

En la Figura 5.10 se puede observar lo relevante que es China, dentro del mercado internacional del cobre, en donde históricamente ha sido el mayor demandante de este mineral, y por lo tanto, el principal cliente de la industria nacional.

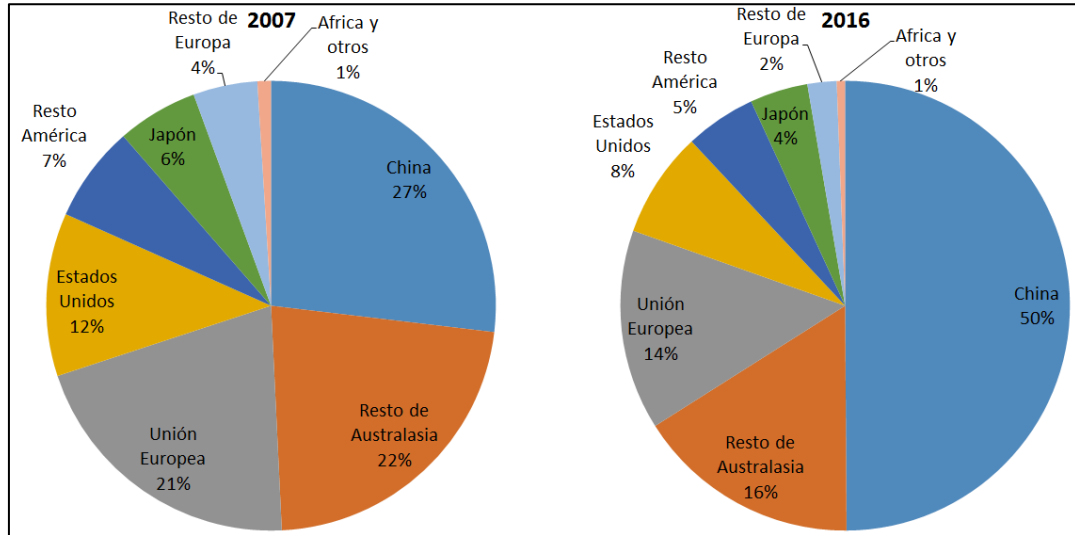


Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2016)

**Figura 5.10. Consumo mundial histórico de cobre refinado**

En la Figura 5.11 se presenta una distribución de los principales consumidores de cobre, en donde se puede apreciar cómo China ha aumentado en los últimos años en casi el doble su participación como consumidor, siendo actualmente el que consume en la misma proporción que el resto del mundo.

En general, para cualquier proyección a futuro con respecto a la demanda mundial de cobre, es muy importante tener claro cuál es la proyección de crecimiento de China ya que la mayor correlación se encuentra con el desempeño de la demanda más que con el producto en sí mismo.

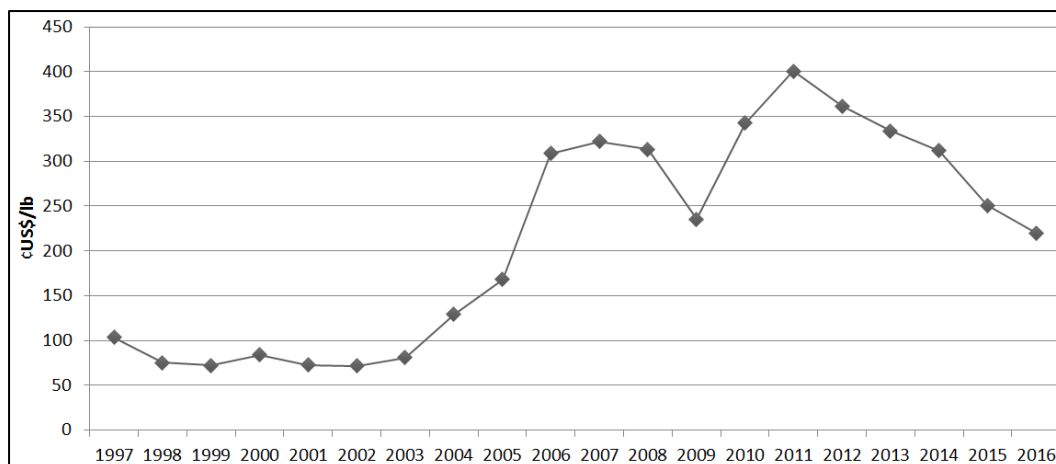


Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2016)

**Figura 5.11. Principales consumidores de cobre en años 2007 y 2016**

El precio del cobre es una variable fundamental a la hora de determinar el desarrollo de la producción nacional. Aunque los precios históricos no sirven para tomar decisiones futuras de inversión, sí resultan útiles para dar cuenta de lo que sucedió en los últimos años. En particular, los precios tuvieron un fuerte aumento entre el 2002 y el 2011, para luego comenzar a descender hasta hoy (ver Figura 5.12).

Durante el último súper ciclo de precios, las compañías mineras privilegiaron la capacidad productiva sobre la eficiencia. En ese lapso, la competitividad de costos de todo el mundo se vio resentida. En Chile esto se notó más porque los yacimientos eran, en promedio, más antiguos. El costo operacional medio fue de US\$/lb 2,17 en 2014 con un rango entre el primer y el tercer cuartil que se ubica en US\$/lb 1,92 - 2,72.



Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2016)

**Figura 5.12. Precio histórico del cobre refinado**

#### 5.1.4 Nuevas regulaciones y leyes

La historia de leyes y regulaciones ambientales en Chile es relativamente joven, ya que datan desde la segunda mitad del siglo XX. En 1964 el gobierno de la época establece formalmente políticas de sustitución sobre el medio ambiente y recursos naturales en importaciones. En dicho año, el consejo de CORFO establece el Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN), que tenía la responsabilidad de mantener actualizada la información sobre los recursos naturales del país, promoviendo investigaciones para afianzar su desarrollo productivo (Camus & Hajek, 1998).

En el año 1971, se produjo la nacionalización del cobre, proceso que nace como estrategia de conquista de los mercados mundiales y como fuente de financiamiento de la reforma agraria y el desarrollo industrial, ya que se consideraba al cobre como “el sueldo de Chile” o “la viga maestra” del desarrollo económico del país (Ortega, 1989). Durante este período, el tema de los recursos naturales no renovables y el desarrollo productivo de la industria minera no tuvo en consideración el resguardo al medio ambiente, ya que las necesidades de incremento productivo y beneficio económico eran prioritarios respecto al impacto ambiental de la industria (Camus & Hajek, 1998).

A pesar de su retraso respecto del contexto internacional, el incipiente desarrollo de la conciencia ambiental en Chile permitió la inclusión en la Constitución de 1980 del artículo 19 N°8, que “asegura a todas las personas el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Es deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza. La ley podrá establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente”.

En esa misma década, este artículo fue utilizado por grupos ecologistas y ciudadanos para que Codelco pusiera término definitivo a la depositación de relaves en la bahía de Chañaral, lo que significó un hito importante en la industria, desde el punto de vista ambiental sobre la relación de la industria minera y la ciudadanía (Hajek, 1993).

Recién en 1990 se creó la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), encargada de definir una política ambiental y de proponer una ley marco y una institucionalidad ambiental para el país.

Fue así como en 1994, se publica la ley N°19.300 “Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente”, la cual corresponde a la primera ley ambiental del país que establece el cumplimiento legal del artículo 19 N°8 incorporado en la Constitución del 1980. Con esta ley, se inician los procesos de evaluación ambiental a los proyectos de inversión, con el involucramiento de las comunidades y sociedades. El proceso formal de evaluación de impacto ambiental fue aprobado en 1997.

En el 2010, se crea –a través de la Ley N° 20.417- la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), tras las sugerencias de la OCDE, como un servicio descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propio como un sistema único de fiscalización ambiental. Dicha ley crea además el Ministerio de Medio Ambiente y el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), lo cual permite separar las funciones en materia regulatoria (Ministerio), de evaluación (SEA) y de sanción (SMA), (SMA, 2017).

Finalmente, en el 2012, se publica la Ley N° 20.600 que crea el Tribunal Ambiental, como entes jurisdiccionales especializados e independientes en materia de medio ambiente, que resuelven –dentro de otros temas- reclamaciones interpuestas contra resoluciones de la SMA.

Con respecto a proyectos mineros relacionados con manejo de relaves, existen 2 servicios del Estado de Chile que regulan los diseños, construcción y operación de estos sistemas: La Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas; y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

A través del Decreto Supremo N°50 del 2015, con el objetivo de dar cumplimiento al Artículo 294 del Código de Aguas para la aprobación de una obra hidráulica mayor, la DGA es quien aprueba la construcción de un proyecto de depósito de relaves, cada vez que este depósito interfiera cauces naturales, de manera de no comprometer la seguridad a terceros y de impedir la contaminación a recursos hídricos superficiales y subterráneos.

Por su parte, el Sernageomin regula el diseño, construcción y operación de los depósitos de relaves, a través del reglamento aprobado por el Decreto Supremo N°248, del 2007. En este reglamento, se deja explícito también, que este servicio regula los depósitos de relaves que consideren la aplicación de tecnologías que permitan reducir la cantidad de agua contenida en los relaves, de manera que se establece que es el Servicio especializado para aprobar



cualquier aplicación de tecnología en este tipo de proyectos, dejando a la DGA con la potestad de aprobar solamente aquellos proyectos que consideran la operación convencional de relaves. Esta diferenciación se explica en el punto 5.3.3 del presente trabajo.

#### 5.1.5 Participación de las comunidades

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo anterior, la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente N°19.300, establece en el marco de la evaluación ambiental de un proyecto de inversión, la participación de la ciudadanía para que se informe y opine responsablemente acerca del proyecto o actividad, como también, para que obtengan respuesta fundada a sus observaciones.

Esto opera sobre la base de que la ley considera que la ciudadanía aporta información relevante a la evaluación ambiental y da transparencia a la revisión de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA), otorgando solidez a la decisión de las autoridades (SEA, 2017).

En el rubro minero, la participación ciudadana ha tenido un rol significativo, desde sus inicios, específicamente, en los temas relacionados con los relaves. Tal como se mencionó en el capítulo anterior, desde que se inició la participación de las distintas comunidades ciudadanas en los procesos decisionales del rubro, la ciudadanía ha sido sumamente crítica y ha exigido cambios significativos. Existen muchos casos emblemáticos en donde la opinión ciudadana ha decantado en una medida que la industria minera por sí sola no habría tomado de manera voluntaria.

El primer caso a resaltar es de 1990, en donde Codelco tuvo que dejar de descargar los relaves producidos por la División Salvador en la bahía de Chañaral y construir un depósito de relaves en la comuna de Diego de Almagro (ver Figura 5.13).

Otro caso emblemático es el Caso Caimanes, del año 2014. Debido a movilizaciones ciudadanas por parte de la localidad de Caimanes de la IV Región y una denuncia a la SMA y a la Corte Suprema, esta última dictaminó que la minera Los Pelambres de Antofagasta Minerals permitiera el escurrimiento natural de las aguas del estero Pupío a la comunidad de Caimanes, libre de contaminación de desechos provenientes del tranque de relaves El Mauro. Esta condición podía llegar a implicar que si la minera no estaba capacitada para cumplir con dicho dictamen debido al tranque de relaves, entonces la minera tendría que remover todo ese material ya depositado, significando un costo incalculable para la minera.

Actualmente, la participación ciudadana se ha enfocado también en la optimización del uso del recurso hídrico en el rubro minero, descartando la posibilidad de aceptar que se sigan entregando derechos de agua continental a las mineras. Los proyectos *greenfield* de la gran minería no conciben la

posibilidad de obtener estos derechos, por lo que todos estos proyectos consideran la necesidad de obtener y transportar agua de mar.

En el futuro, se espera que las comunidades mantengan el protagonismo en las decisiones que finalmente deben tomar las empresas mineras, desde el punto de vista de alternativas para el destino de los residuos mineros y de las fuentes de agua para el proceso.

#### 5.1.6 *Impacto al medio ambiente*

La industria minera, al igual que otras industrias y actividades humanas, tiene un impacto al medio ambiente, el cual debe ser mitigado lo más posible y, en el caso de no ser posible mitigar completamente alguno de ellos, la ley exige que se realice la compensación del impacto generado en la misma magnitud.

Los principales impactos de la industria son:

- Recursos hídricos

Quizás, el impacto más significativo de la industria minera, es el efecto en la calidad de aguas y la disponibilidad del recurso hídrico en el área de emplazamiento.

Los aspectos más relevantes al respecto son

- Drenaje ácido y lixiviación de contaminantes
- Erosión de suelos y botaderos en superficies de agua
- Infiltraciones de depósitos de relaves, botaderos de lastre y pilas de lixiviación
- Extracción de aguas subterráneas

En el corto plazo, estos son los aspectos que desde el punto ambiental, la industria minera deberá mitigar.

Con respecto a la afectación provocada por los depósitos de relaves, es importante la optimización del reciclaje de las aguas contenidas en ellos, por lo que la industria, deberá implementar procesos intensivos de recuperación de agua, lo que significa profundizar en estudios de reología de los relaves, que permitan operarlos con la viscosidad elevada con que quedarán posteriormente.

Finalmente, con respecto al consumo de aguas continentales, la cual pone en riesgo la sustentabilidad de los acuíferos, la industria ya está migrando a un consumo de agua de mar, con procesos de desalinización que permitan su uso minero.

- Calidad del aire

Las emisiones de material particulado ocurren en cada etapa del ciclo de la mina, pero especialmente durante las actividades de exploración, desarrollo, construcción y operación.

Las operaciones mineras movilizan grandes cantidades de material, y los botaderos de lastre, que contienen partículas de pequeño tamaño, se dispersan fácilmente por el viento.

- Vida silvestre

La vida silvestre es un término amplio que se refiere a todas las plantas y animales (u otros organismos) que no están domesticados. La minería afecta el medio ambiente y la biota asociada, mediante la eliminación de la vegetación y la capa superior del suelo, el desplazamiento de la fauna, la liberación de contaminantes y la generación de ruido.

- Valor social

Los impactos sociales de los proyectos mineros a gran escala son controvertidos y complejos. El desarrollo mineral puede generar riqueza, pero también puede causar una disrupción considerable. Los proyectos mineros pueden crear empleos, carreteras, escuelas e incrementar las demandas de bienes y servicios en áreas remotas y empobrecidas, pero los beneficios y costos pueden ser compartidos de manera desigual. Si las comunidades sienten que están siendo tratadas injustamente o compensadas inadecuadamente, los proyectos mineros pueden generar tensiones sociales y conflictos violentos.

Los EIA pueden subestimar o incluso ignorar los impactos de los proyectos mineros en la población local. Es común que las comunidades se sientan particularmente vulnerables cuando los vínculos con las autoridades y otros sectores de la economía son débiles, o cuando los impactos ambientales de la minería (al suelo, al aire y al agua) afectan la subsistencia y el sustento de la población local.

## 5.2 Procesamiento de relaves

### 5.2.1 Producción de relaves

El relave corresponde al material de desecho producido durante el proceso de flotación de los minerales sulfurados. Por lo general, la producción de relave equivale a un 95 - 97% del total de material obtenido durante la etapa de extracción. Es decir, del total de material extraído del yacimiento, sólo un porcentaje menor (entre un 3 y 5%) corresponde al mineral beneficiado como concentrado y el resto es material de desecho o relave.

Estos relaves están conformados por una mezcla de suelo, roca molida, minerales, soluciones químicas y -en su mayor parte- agua. El contenido de agua en los relaves puede fácilmente alcanzar valores del 80% del peso total de relave producido.

Considerando los grandes volúmenes de minerales beneficiados, el consumo de agua por parte de las plantas concentradoras puede alcanzar a miles de metros cúbicos diarios (mediana y gran minería). Por lo tanto, es un punto estratégico económico y ambiental para las compañías mineras, el recuperar la mayor parte de esta agua, que constantemente se está eliminando dentro del relave, para su reutilización en el proceso de beneficio.

Debido a que los volúmenes de producción de relave son considerablemente grandes, es necesario disponer de lugares especiales para su colocación (o *depositación*). Estos lugares actualmente se denominan *depósitos de relaves*, y pueden variar en su metodología constructiva, su tamaño y su diseño en general, dentro de otros factores. Esto depende de los niveles de producción de relave (asociado directamente con la producción de mineral), como también de factores ambientales.

En Chile, desde hace más de 3 décadas, se ha regulado la construcción y operación de estos depósitos, que pueden llegar a tener una vida útil de más de 15 años. Además, se ha regulado el abandono o *cierre*, de algunos depósitos que ya han cumplido con su vida útil.

Actualmente y desde el año 2007, esta regulación se hace efectiva a través del cumplimiento del Decreto Supremo N°248, que se refiere a los requisitos necesarios para el diseño, construcción y operación de estos depósitos. Esta regulación tiene como referencia la experiencia chilena respecto a la materia y la experiencia internacional respecto a innovaciones que actualmente en Chile se están llevando a cabo en muchos proyectos de depositación de relaves, pero que aún no se han llevado a la práctica.

### 5.2.2 Operación de relaves

El manejo de los relaves en Chile ha ido variando en el transcurso de la historia de la minería, junto con la historia de la conciencia (y regulación) ambiental y del conocimiento técnico involucrado (metalurgia, hidráulica, geotecnia).

Desde sus inicios, las compañías mineras no consideraban, dentro de sus compromisos productivos, el manejo cuidadoso de los relaves tal como existe actualmente. Durante los dos primeros tercios del siglo XIX, los relaves eran dispuestos en botaderos o “tortas” en lugares cercanos a las plantas de beneficio, sin ningún tipo de estudios ambientales exigidos. En algunos casos, estos lugares podían estar cerca de centros urbanos, sin impactar mayormente a las autoridades o a la población.

El caso más emblemático respecto al poco cuidado en el manejo de los relaves, es el ocurrido en la bahía de Chañaral, en la Región de Atacama (ver Figura 6.1). Desde el año 1959, los relaves provenientes de la planta de beneficio del mineral de El Salvador, perteneciente a la empresa norteamericana Andes Copper Mining Company fueron transportados gravitacionalmente a través del cauce natural del río Sal, el cual desemboca al mar, frente a la ciudad de Chañaral. En 1970, con la estatización del cobre, el mineral pasó a ser propiedad de CODELCO, como División Salvador.



Ref.: (León A., 2001)

**Figura 5.13. Descarga de relaves en bahía de Chañaral**

Sin embargo, la práctica de descargar los relaves al río Sal continuó hasta el año 1990, cuando por motivos legales, CODELCO debió construir un depósito de relaves y dejar de contaminar el río Sal y la desembocadura de la bahía de Chañaral. Este hecho, generó un impacto ambiental severo, en donde la flora y la fauna marina quedaron sepultadas por completo, en un radio aproximado de 30 km (León A., 2001).

La Figura 5.13 muestra la fotografía de la desembocadura del río Sal, junto con la ciudad de Chañaral. En ella se observa la playa artificial generada por la depositación de relaves durante por lo menos 30 años.

Según cálculos estimados por la Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA), descontaminar la bahía de Chañaral podría significar un costo aproximado de 500 millones de dólares (León A., 2001). Actualmente, los relaves deben ser dispuestos en depósitos especialmente acondicionados y

deben cumplir con altos estándares técnicos y ambientales. A continuación se explican de manera resumida, las principales características de los depósitos de relaves que actualmente operan en el país, desde el punto de vista de la ingeniería geotécnica.

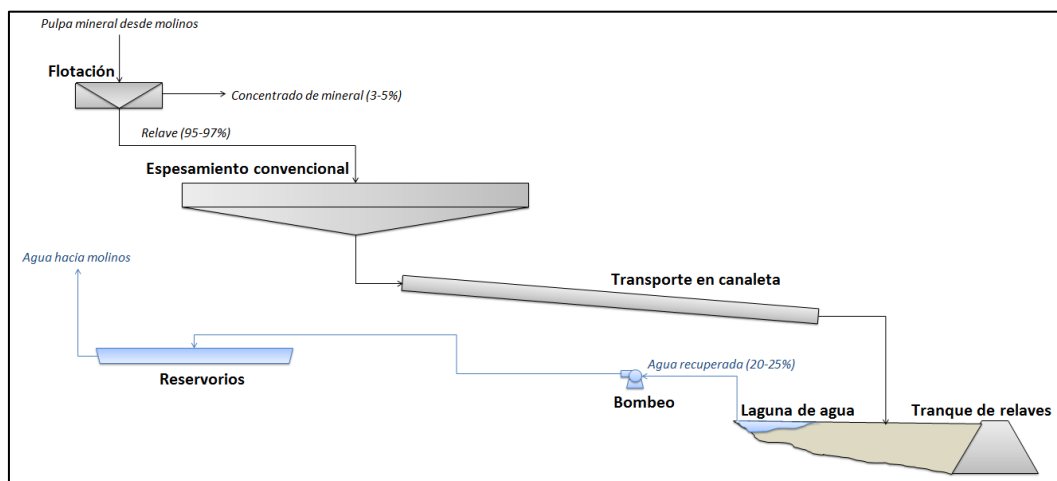
### 5.2.3 Procesamiento de recuperación de agua desde los relaves

Actualmente, el procesamiento típico de recuperación de agua desde los relaves comienza en la planta concentradora con la incorporación de espesadores de alta tasa de tratamiento, que logran recuperar cierta parte del agua contenida y, en algunos casos, finaliza en el sector del depósito de relaves donde se implementa un sistema de recuperación de agua con sistema de bombeo. Hay faenas mineras como la de División Andina y División Teniente de Codelco, que no tienen implementado el sistema de recuperación en sus depósitos.

En los siguientes subcapítulos se describirán los distintos procesos utilizados para el procesamiento recuperación de agua de los relaves.

- Proceso convencional

Uno de los procesos más tradicionales en la minería es la operación convencional de los relaves (ver Figura 5.14). Consiste en someter a espesamiento los relaves generados en el proceso de flotación, hasta lograr una recuperación de agua del orden de un 20 a un 25%, logrando un porcentaje de sólidos (Cp) en el relave de un 50-55% aproximadamente. En algunos casos es posible llegar a valores cercanos a un 60% de porcentaje de sólidos en la pulpa del relave, dependiendo de sus características granulométricas y mineralógicas.



Ref.: Elaboración propia

**Figura 5.14. Diagrama proceso convencional de relaves**

Los espesadores utilizados para este proceso son los espesadores *high rate* (“de alta tasa”, según su traducción del inglés) y los espesadores

convencionales (ver Figura 5.15). Aunque los diseños de estos equipos no son un estándar rígido en la industria, los distintos proveedores de estos equipos presentan solo pequeñas diferencias entre ellos, de manera de generar una diferencia competitiva.

Normalmente, estos espesadores son ubicados dentro de la misma planta concentradora, al final de proceso, ya que de esta forma, el agua recuperada requiere un transporte menor. Los relaves que son descargados de estos espesadores, poseen una viscosidad y reología que permite el transporte gravitacional hacia el sector del depósito de relaves, donde serán almacenados finalmente.

En Chile, el transporte de los relaves desde los espesadores en planta concentradora normalmente es gravitacional debido a la diferencia geométrica que generalmente tiene la planta con el sector del depósito de relaves. La topografía del país, juega un rol muy favorable desde el punto de vista energético, en donde los depósitos de relaves se ubican en cotas inferiores a la planta concentradora, lo que facilita el transporte de los relaves.

Finalmente, los relaves son descargados en un depósito de relaves, los cuales son presas de acumulación de gran cantidad de material, ya que deben almacenar la producción de relaves de toda la vida útil de la mina. Es común que algunas faenas mineras, las más antiguas sobre todo, posean más de un depósito de relave.



Ref.: (Outotec, s.f.)

**Figura 5.15. Espesador *high rate***

En el depósito, el material es decantado naturalmente por gravedad y el agua contenida en estos sale a la superficie. En las faenas en donde se considera la recirculación de esta agua en el proceso, poseen estaciones de bombeo ubicados estratégicamente en los sectores donde se forma la laguna de aguas del depósito.



ef.: (Kinross Gold Corporation, 2017)

**Figura 5.16. Depósito de relaves convencional**

En los depósitos en donde no se tiene considerado la recirculación del agua hacia el proceso, se privilegia la evaporación de estas aguas.

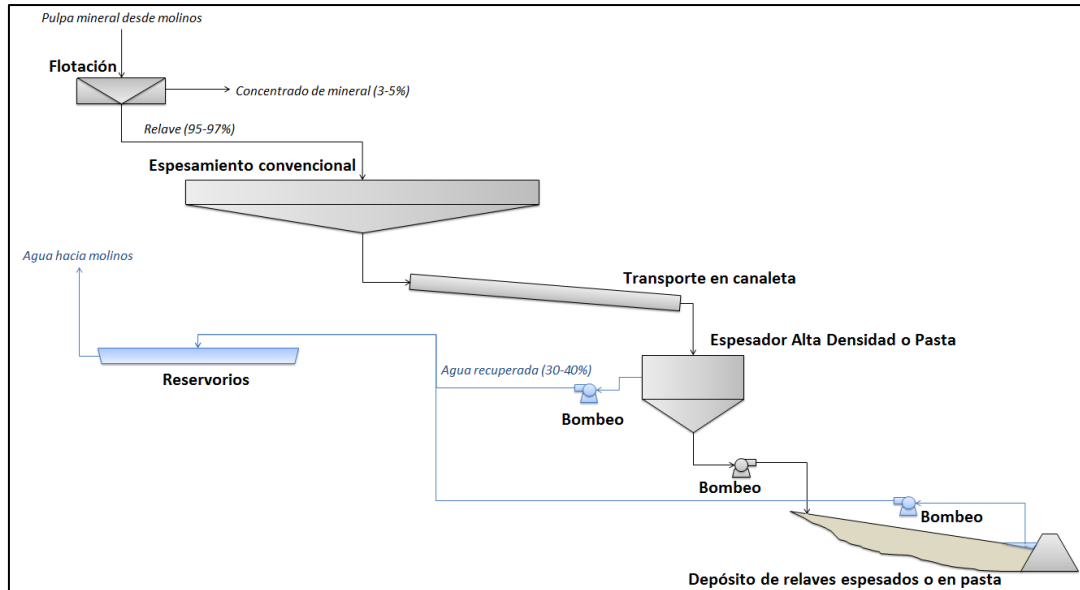
El agua en un depósito de relaves es un riesgo a la estabilidad y significa un mal uso del recurso hídrico dentro de la operación minera.

- Proceso de espesamiento alta densidad y/o pasta

Los procesos de espesamiento de alta densidad de los relaves y de espesamiento en pasta corresponden a los procesos que intensifican la recuperación de agua desde los relaves, en comparación con el proceso convencional. A su vez, el proceso de pasta de relaves, es un subproceso que permite recuperar más agua que el de alta densidad. Sin embargo, como proceso son muy similares.

En la Figura 5.17 se presenta el diagrama de este proceso, en donde también aparece el proceso convencional de espesamiento de relaves. El proceso de espesamiento de alta densidad y/o pasta corresponde a la incorporación de un sistema de espesamiento al final del tramo de transporte de relaves hacia el depósito de relaves. Es decir, estos equipos se ubican normalmente en el sector del depósito de relaves, en vez de ubicarse en el sector de la planta concentradora.





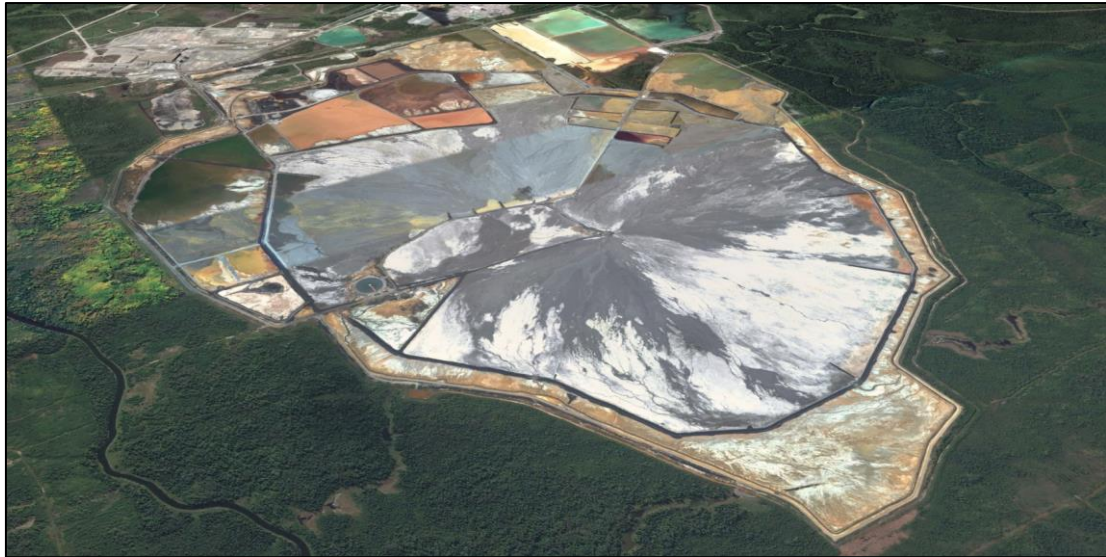
Ref.: Elaboración propia

**Figura 5.17. Diagrama proceso espesamiento alta densidad y/o pasta**

Esto se debe a que el relave espesado a alta densidad o a pasta, es una pulpa en donde los factores reológicos del material (tales como la viscosidad y la tensión de fluencia) influyen importantemente en su transporte. El costo energético de transportar la pulpa tan espesa (con tan poca agua), normalmente es mayor que el de transportar el agua adicional recuperada hacia la planta concentradora.

Los equipos espesadores son diferentes a los convencionales, son de menor diámetro y de mayor altura de pared. Además, poseen un mayor torque en sus rastras, debido a que deben mover una columna de material sedimentado mucho mayor.

Luego de ser sometidos a este nivel adicional de espesamiento, los relaves deben ser dispuestos en un depósito de relaves para lo cual deben ser transportados hidráulicamente a través de un sistema de bombeo. Normalmente, estos relaves ya no pueden ser transportados gravitacionalmente, aunque exista un desnivel favorable para aquello. Las fuerzas viscosas internas controlan su comportamiento internas debido a la extracción del agua.



Ref.: (Google Earth, 2017)

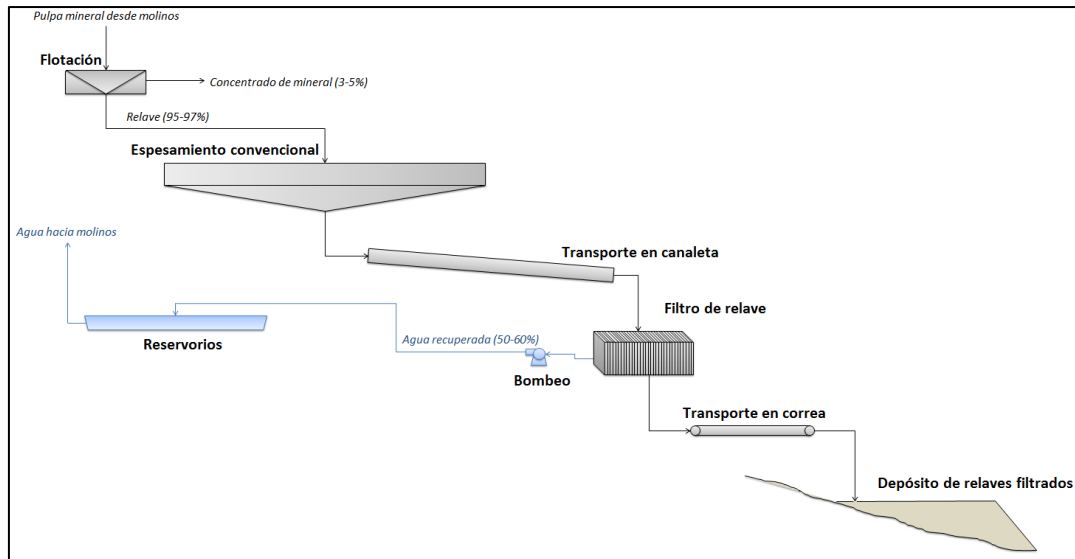
**Figura 5.18. Depósito de relaves alta densidad y/o en pasta**

Estos procesos buscan normalmente que el agua sea capturada prácticamente en su totalidad desde los espesadores de alta densidad o pasta, de manera de minimizar la recirculación de agua desde el depósito, ya que se espera evitar tener una laguna de aguas en este. Sin embargo, la experiencia en la gran minería ha demostrado que aún no ha sido posible lograr este efecto. Por lo tanto, las operaciones de la gran minería consideran un sistema de recirculación de agua desde el depósito de relaves.

Por último, el depósito de relaves también se ve sometido a un cambio importante, con la reducción de agua en este. Al igual que lo que sucede con el transporte de la pulpa espesada a alta densidad y/o pasta, el depósito también aprovecha las propiedades viscosas y geotécnicas que ahora comandan su comportamiento. Es por esto, que es posible aprovechar la superficie de depositación, con la colocación de mayor cantidad de relaves, cada vez que este puede ser depositado con una mayor pendiente superficial, tal como lo muestra la Figura 5.17.

- **Proceso de filtrado**

Al igual que en el caso del proceso de espesamiento de alta densidad y/o pasta, el proceso de filtrado también es normalmente considerado ser aplicado en el sector cercano al depósito de relaves. Esto, debido a que los relaves filtrados logran tener tan poca humedad que ya no es posible ser transportados hidráulicamente y deben ser transportados mecánicamente, ya sea a través de correas transportadoras o camiones.



Ref.: Elaboración propia

**Figura 5.19. Diagrama proceso filtrado de relaves**

Nuevamente, el costo energético y económico de transportar el agua que se logra recuperar es menor que el de transportar los relaves al depósito.

Existen una variedad de tipo de filtros que son normalmente utilizados en este procesos, sin embargo, para la gran minería, este proceso aun se ha aplicado debido a que los equipos no son de la envergadura suficiente que permitan tener una operación confiable y de costo competitivo.

Este proceso es bastante común en mineras de oro de pequeño y mediano tamaño, ya que el filtro forma parte además de su proceso de recuperación mineral. En la gran minería del cobre, existe intensión de su aplicación, ahora que algunos proveedores de estos equipos han desarrollado la tecnología para construir filtros de placas verticales de gran tamaño, con capacidad de tratar aproximadamente 10.000 toneladas diarias de relave, lo que permitiría su aplicación.



Ref.: (Kinross Gold Corporation, 2017)

#### **Figura 5.20. Depósito de relaves filtrados**

Una vez filtrados los relaves, el agua recuperada es retornada al proceso de la planta concentradora y los relaves son transportados mecánicamente hacia el depósito.

El depósito bajo estas condiciones de contenido de agua en el relave, ya no genera laguna y el material puede ser finalmente descargado como un material prácticamente seco, formando una torta de material o botadero, similar al caso de los estériles o materiales post-lixiviación.

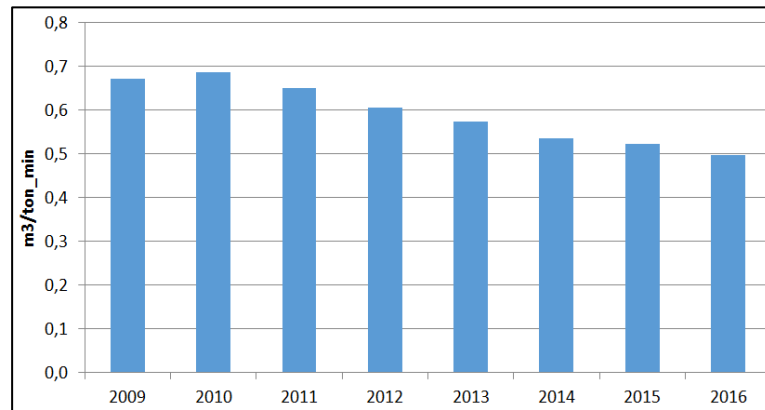
#### **5.2.4 Variables claves para el proceso de recuperación de agua desde los relaves**

- Proceso de recuperación de agua desde los relaves

El proceso de recuperación de agua desde los relaves es algo que la industria minera viene haciendo desde hace mucho tiempo, con el objetivo de minimizar el reabastecimiento en el proceso con agua fresca.

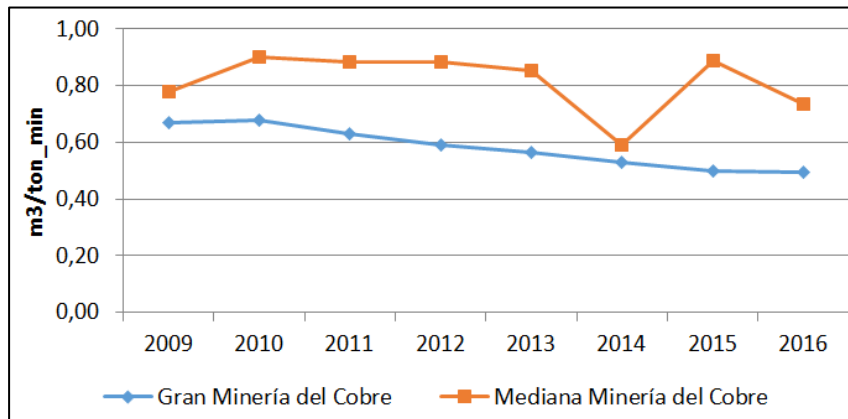
El agua de reposición se denomina normalmente como *water make up* (*wmu*) y se define en función de los litros por tonelada procesada en planta (como un valor unitario), de manera de poder establecer el costo de esta reposición de agua dentro del costo de producción.

En la Figura 5.21 se presenta la evolución que han experimentado las empresas mineras del país, con respecto al *wmu* de operaciones de plantas concentradoras, en donde se ha producido una reducción del 35% entre el *wmu* del año 2009 (0,67 m<sup>3</sup>/ton) y del año 2016 (0,5 m<sup>3</sup>/ton), promedio de la industria.



Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2016)

**Figura 5.21. Water make up histórico en plantas concentradoras en Chile**



Ref.: Elaboración propia, basado en (Cochilco, 2016)

**Figura 5.22. Water make up según tamaño industria minera en Chile**

Es importante destacar que el *wmu* de la gran minería del país es significativamente menor al de la pequeña y mediana minería, lo que refleja un mayor esfuerzo en disminuir el consumo, debido a las grandes cantidades de agua requeridas. En la Figura 5.22 se refleja esto, en

donde la diferencia entre la gran y mediana minería alcanzaron un 77% en el año 2015, estimulado principalmente por la baja del precio de cobre en dicho período.

La cantidad de agua de reposición, siempre ha sido establecida de acuerdo a la disponibilidad del recurso hídrico y no con un criterio económico en donde se establezca el punto más económico entre el agua de reposición y el agua recuperada de los relaves.

El parámetro que se utiliza en la industria para medir el porcentaje de recuperación de agua desde los relaves es el porcentaje de sólidos (en peso),  $C_p$ . Este parámetro se define según la Ecuación 5.1 como la razón entre el peso del material sólido contenido en los relaves  $W_S$  y el peso total de la pulpa  $W_T$ .

$$C_p = \frac{W_S}{W_T} \times 100 [\%] \quad \text{Ecuación 5.1}$$

La relación entre el  $C_p$  y la variable reológica *yield stress* (YS) normalmente es exponencial<sup>3</sup>, al graficar el valor de  $C_p$  en el eje de las abscisas y el valor de YS en el de las ordenadas.

La Figura 7.2 muestra el comportamiento típico de la variable YS respecto al  $C_p$ . Un aumento en el YS, significa que se requiere un mayor esfuerzo para la extracción del agua, lo que se refleja en un mayor consumo energético y un mayor costo operacional.

- Propiedades geotécnicas y reológicas

Las propiedades geotécnicas y reológicas más relevantes que inciden en el proceso de recuperación de agua desde los relaves son:

- Mineralogía (contenido y tipo de arcillas)
- Gravedad específica
- Banda granulométrica (% de finos)
- Yield stress (tensión de fluencia)
- Viscosidad,  $\mu$

En el Capítulo 6 se presentan las propiedades geotécnicas y reológicas de los materiales considerados para este trabajo, de la mina Radomiro Tomic de Codelco.

---

<sup>3</sup> Se hace notar que existen casos en donde la relación  $C_p$  v/s YS es lineal o incluso logarítmica, sin embargo esos casos son excepcionales. Un análisis específico de estos casos se escapa al propósito de este estudio. No obstante, el trabajo abordado en este estudio es completamente aplicable a cualquier relación entre estas variables.

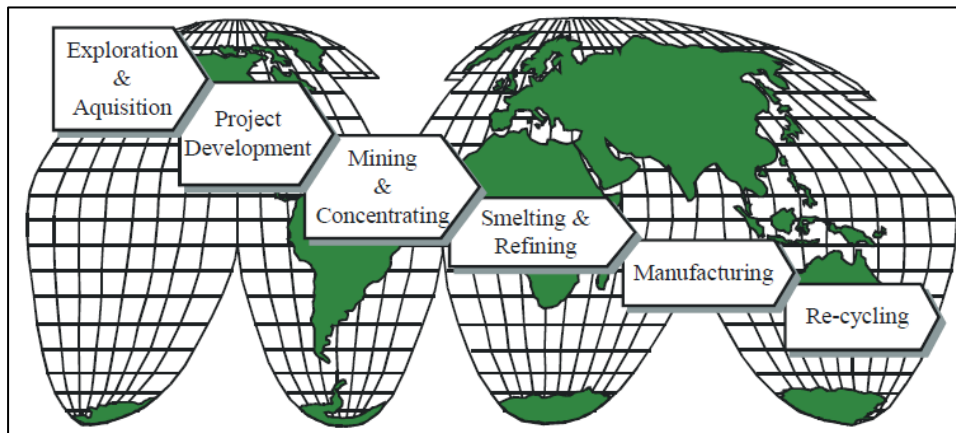
## 5.3 Planificación del negocio minero

### 5.3.1 Cadena de valor del negocio minero

La minería es una industria global, en donde distintas empresas operan dentro de una cadena de valor mundial.

Ya sea como empresas prestadoras de servicio, o como operadoras mineras o dueñas de instalaciones mineras, todas estas empresas forman parte de esta cadena de valor, como parte de un eslabón o como parte de muchos eslabones.

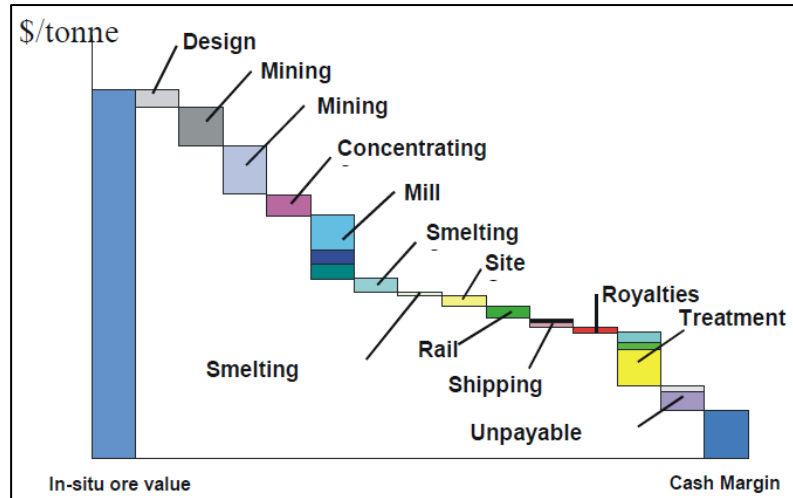
En cualquier industria es importante enfocarse en dónde se crea valor dentro de la cadena. En el caso de la industria minera, esto no es trivial ya que las empresas deben resolver dónde incorporarse dentro de esta cadena y cómo gestionarla. Una de las razones de porqué es difícil establecer apropiadamente el incremento de valor es que el resultado del valor generado sólo se puede observar al final de la cadena, la cual es normalmente muy extensa. Además, los aportes de valor entregados pueden verse afectados negativamente debido a factores exógenos a lo entregado por una empresa, tales como precios de los *commodities*, precios de ciertos insumos estratégicos, cambios en las normativas de los países desde el punto de vista ambiental o comunitario, entre otros.



Ref. (Horsley, 2002)

**Figura 5.23. Cadena de valor de la industria minera**

Por lo tanto, una de las estrategias más validadas para la agregación de valor dentro de la cadena de valor de la industria minera está en la optimización de los costos. La Figura 5.24 muestra una secuencia típica de pérdida de valor de una unidad mineral, en donde al considerar todas las actividades necesarias para poder procesar una unidad de mineral, es posible identificar cuál de ellas es la que genera mayor pérdida de valor, y de esta forma, realizar gestión en ella para optimizarla.



Ref. (Horsley, 2002)

**Figura 5.24. Secuencia típica en la pérdida de valor de una unidad de mineral**

Sin embargo, la industria de la gran minería del cobre en Chile se ve enfrentado a dos grandes dilemas para el aseguramiento del valor:

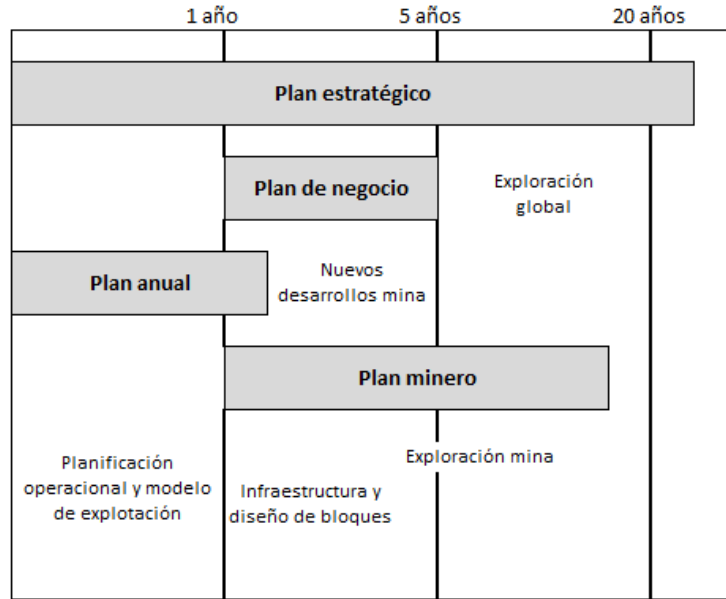
- La gran influencia en el valor que tienen algunos factores exógenos como el precio del cobre y los costos de ciertos insumos estratégicos (electricidad, agua, suministros, entre otros)
- La confiabilidad de la promesa de valor de los compromisos internos como los verdaderos costos de: desarrollo de los proyectos, de producción, de comercialización, entre otros.

Es decir, si bien hay factores que no dependen directamente de la empresa minera y que pueden afectar su promesa de valor, también está la real estimación interna de los proyectos y de las operaciones que en muchas ocasiones tienen una incidencia aún mayor que los factores exógenos.

- Proceso de planificación minera

La planificación es una parte esencial del proceso, para maximizar el valor del negocio. En la Figura 5.25 se muestra esquemáticamente los cuatro componentes de la planificación minera, que serán descritos a continuación.





Ref.: Elaboración propia, basado en (Horsley, 2002)

**Figura 5.25. Cuatro componentes de la planificación minera**

- **Plan estratégico**

El plan estratégico es aquel plan de largo plazo, que debe definirse a nivel corporativo en la empresa minera, y que debe tomar en cuenta todos los posibles eventos externos a la empresa, que pueden afectar el negocio minero.

Este plan define el mapa de ruta que la empresa seguirá, y permitirá tomar decisiones estratégicas que permitan la sustentabilidad del negocio.

Dentro de los factores externos que debe considerar están los cambios de gobierno en el tiempo, cambios en la demanda de los minerales explotados, cambios en los precios del metal, cambios en las normativas ambientales, entre otros.

Debido a que el mundo está en un permanente cambio, este plan estratégico debe estar actualizándose permanentemente, ya que los cambios supuestos en una primera planificación, pueden ser muy distintos a los considerados inicialmente.

Este plan estratégico es normalmente desarrollado con una visión de 20 a 25 años. En algunas empresas mineras, este plan puede llegar a 30 o 35 años incluso.

- Plan de negocio

El plan de negocio es aquel plan que trabaja coordinadamente entre todas las divisiones o departamentos de la empresa minera, según el marco referencial entregado por el plan estratégico.

Su foco por lo general, es el quinquenio (mirada a 5 años) y en algunas ocasiones es integrado al plan anual o presupuesto. Sin embargo, existe un peligro en enfocarse mucho en el corto plazo y los costos operacionales a expensas de la planificación a futuro.

Si la planificación reporta directamente a los administradores operacionales, puede existir una fuerte tendencia a re direccionar recursos a los “incendios” de corto plazo. Estos “incendios” de corto plazo son por lo general, una consecuencia de una pobre planificación de negocio quinquenal, y utilizar esta planificación para solucionarlos, es el principio del fin. Lamentablemente, la falta de planificación no es algo de fácil o rápida identificación, usualmente puede tomar un par de años para evidenciar esto, por lo que la transformación de “minero” a “bombero” para solucionar los problemas en el corto plazo puede llegar a ser inevitable.

Esta planificación de negocio es muy importante y debe realizarse anualmente con un equipo independiente al de la operación, con recursos dedicados y exclusivos. En términos de éxito de la empresa, esta planificación es la más crítica ya que define los mayores costos de proyectos estratégicos de la empresa, que permiten sustentar el negocio.

En la Figura 5.26 se muestran las claves de éxito para una planificación de negocio, a nivel corporativo pero igualmente válido para niveles inferiores de la organización.

#### Adquisición de recursos minerales de calidad

Un factor clave en el éxito de una compañía minera es la calidad de sus recursos minerales. Por lo tanto, los procesos de adquisición de yacimientos forman parte de una de las claves de éxito.

En esto, no sólo la ley es importante, sino que también la metalúrgica, la geometría y la ubicación de la mina.

#### Éxito en el desarrollo de los proyectos

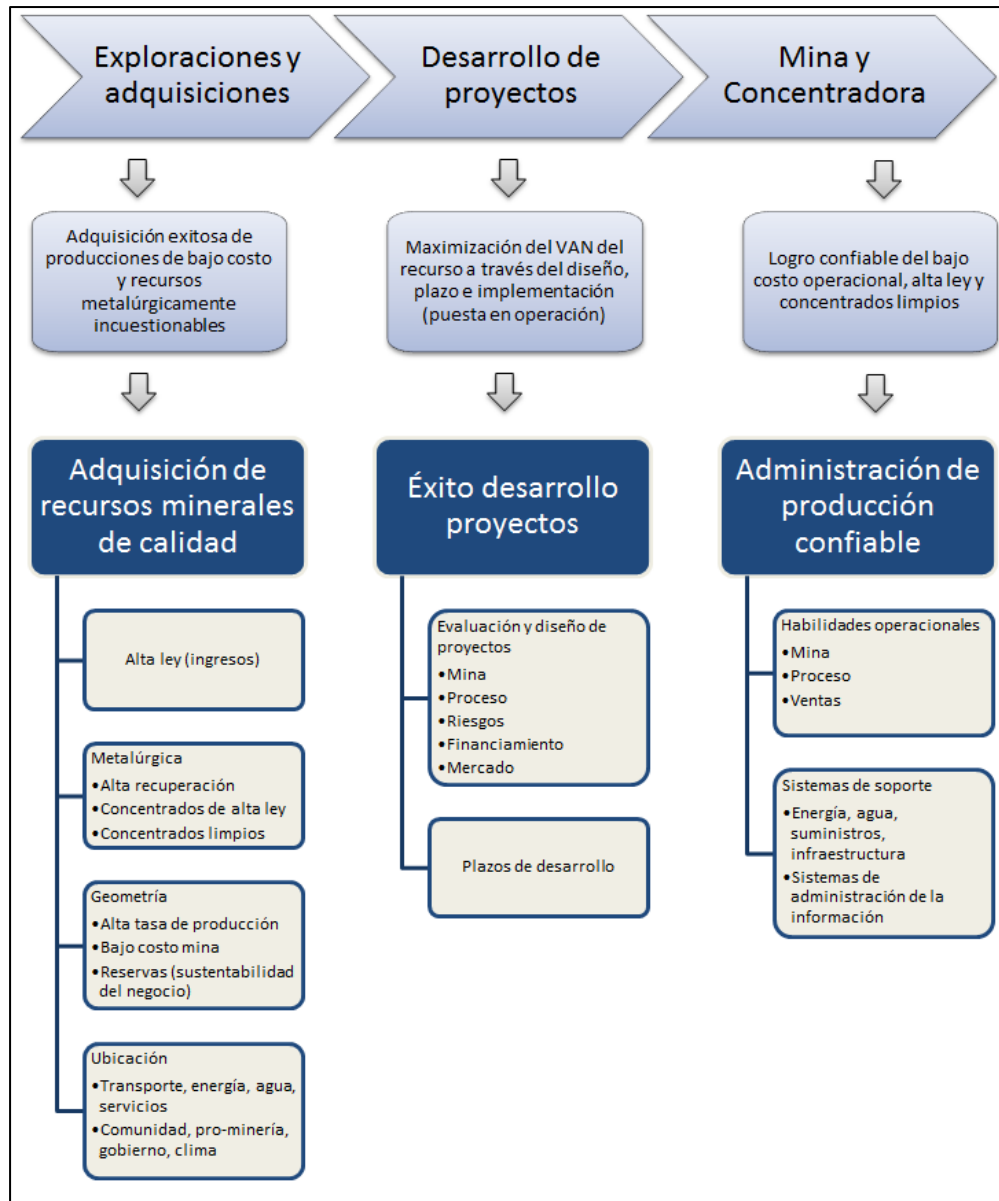
Los diseños y evaluaciones de los proyectos también son factores clave en la planificación del negocio minero. Las promesas de valor deben ser razonables y confiables. Existe la tendencia de un ensañamiento por una promesa optimista de los proyectos por parte de quienes están a cargo de sus evaluaciones. Es algo natural, que impulsa a quienes trabajan en el desarrollo de los proyectos, el tener toda su concentración, ímpetu y optimismo en el desarrollo del proyecto. Sin

embargo, es necesario poder tener una visión crítica del proyecto, de manera de lograr tener diseños, plazos y evaluaciones económicas confiables.

#### Administración de producción confiable

Es importante reconocer la experiencia y habilidades necesarias e implementarlas en una organización eficiente. Normalmente, las estructuras organizacionales tienden a ajustarse al control operacional, en vez de calzar con la habilidad de agregar valor.

Es muy usual que se generen conflictos de interés entre quienes operan el negocio y quienes sostienen el negocio, cuando no existe una estructura organizacional adecuada.



Ref.: Elaboración propia, basado en (Horsley, 2002)

**Figura 5.26. Claves de éxito para el plan de negocio**

- Plan anual

El plan anual es aquel que, a partir del plan de negocio, decanta en un horizonte de trabajo de 1 año.

Se definen el presupuesto, la calendarización de las actividades y los recursos para llevarlo a cabo.

También, se definen los parámetros de mediciones o kpi (*key performance indicators*) que permiten establecer el cumplimiento de las metas anuales. Estos kpi pueden ser: toneladas de mineral extraído, costo de producción (C1), insumos utilizados, entre otros.

- Plan minero

En este nivel de planificación, se deben monitorear los requerimientos de adquisición de recursos minerales y la administración de la producción.

En una mina existente, esta planificación puede representarse como una línea de producción.

En la Figura 5.27 se presentan los requerimientos globales de adquisición de recursos minerales, desarrollo de proyectos y administración de la producción a un nivel local.



Ref.: Elaboración propia, basado en (Horsley, 2002)

**Figura 5.27. Tres áreas claves en la planificación minera**

### Definición de la exploración objetivo:

Durante los estudios de factibilidad, es normal que los recursos no estén delineados por completo, por lo que siempre es necesario estudios posteriores que permitan reconocer el cuerpo mineral.

La exploración global permite establecer criterios principales para definir los objetivos que permitirán dar paso a un programa de perforaciones específico. Es importante que en una etapa temprana de la mina, se definan los objetivos potenciales, ya que la ubicación de la infraestructura depende de ello, como también la ubicación de botaderos, depósito de relaves, etc.

### Perforaciones exploratorias:

La mayoría de los esfuerzos iniciales en las exploraciones están enfocados en establecer la confianza geológica de un recurso. Sin embargo, estas además cumplirán un rol de definir aspectos geotécnicos e hidrogeológicos fuera de los límites del cuerpo mineralizado, y que entregarán información valiosa para otras decisiones estratégicas.

### Definición del recurso

Una mina en operación, tendrá una definición clara del pit global (o pit final), sin embargo, siempre existirán diferentes pits anidados que dependerán de los costos operacionales, metodología de extracción, ley mineral, etc.

Los pits pueden variar a lo largo de la vida de la mina, debido a cambios en las condiciones económicas del entorno.

Actualmente, las actualizaciones de estas condiciones económicas se realizan con el uso softwares especializados que permiten realizar estos ajustes de manera rápida y eficiente, lo que permite definir tanto los pits anidados como el pit final de la mina, con una evaluación de retorno maximizado.

### Plan de vida de la mina (*Life-of-mine plan*, o LOM)

El recurso mineral establece un límite superior al valor de la mina. No existe efectivamente, un límite inferior.

El LOM, establece la base del plan de negocio en una escala local. Sin un LOM efectivo, el valor del recurso se disminuye considerablemente.

Algunos de los requerimientos para establecer un LOM son:

- Secuencia de producción, para maximizar el VAN.
- Analizar y gestionar las tensiones regionales y subsidencia.
- Determinar la infraestructura futura y los requerimientos de capital que sustenten la operación.

- Focalizar y calendarizar los esfuerzos de exploraciones.
- Establecer los grandes proyectos y las fechas de inicio/término.
- Identificar áreas de mejoras.
- Planificar el cierre de la mina y actividades de remediación.

### Diseño conceptual

En el marco del LOM, el diseño conceptual es necesario como un requisito para un diseño más detallado. Este identificará los ítems necesarios en el largo plazo y proveerá de información para una evaluación económica previa a comprometer trabajos futuros.

### Evaluación económica

Se necesita una evaluación satisfactoria, previo a la clasificación del mineral del recurso para establecer la calidad de la reserva. Este proceso permitirá seleccionar el plan de extracción más apropiado y filtrar el mineral sin valor económico (ganga) antes de ser comprometido en algún calendario de producción.

Esta evaluación puede realizarse en un estudio de factibilidad formal.

### Programación de los proyectos y de la producción

La programación es una parte integral del proceso de planificación y, aunque se muestra como una actividad discreta en el diagrama anterior, se extenderá desde los detallados cronogramas de producción y recursos a corto plazo a escenarios de producción del LOM a largo plazo.

Lo ideal es que todos los programas de producción y recursos se integraran entre sí y estén vinculados a modelos económicos y otras herramientas de optimización.

### Diseño final

El diseño de la calidad es un producto de la planificación sana y de la atención al detalle. En una mina subterránea, la seguridad es de suma importancia y todos los diseños tienen que cumplir con las listas de verificación de seguridad antes de que puedan ser aprobados.

Todo el valor añadido de la planificación anterior, tal vez durante muchos años, se puede perder por el diseño final inferior o apresurado.

El resultado visible de los departamentos de planificación de la mina son principalmente los diseños de tronaduras y desarrollos, lo cual es probablemente la razón por la cual es común pensar que la planificación de la mina solamente el diseño de la mina.

La planificación minera y el diseño de la mina son actividades separadas. El diseño de la mina puede realizarse sin una planificación de la mina y es muy común que así suceda en la industria. Sin embargo, es la planificación la que agrega la mayor parte del valor.

### Plan operacional

El plan operacional corresponde al soporte operativo a corto plazo, el cual debe estar equilibrado con los requisitos de planificación a más largo plazo.

En la gran minería, normalmente este plan operacional lo realiza un especialista de planificación, independiente del equipo de operación mismo. Esto permite desincentivar comprometer recursos de planificación de largo plazo, con aquellos recursos necesarios para la operación a corto plazo.

Es útil entender que el plan estratégico define los límites del plan de negocio, y que el plan minero define las restricciones del plan operacional.

Los resultados operacionales pueden fácilmente ser peor en una mina donde se apliquen las mejores prácticas operacionales pero con un plan minero deficiente, en vez de una mina donde se utilicen malas prácticas operacionales, pero con un muy buen plan minero (Horsley, 2002).

- **Análisis de riesgos**

La planificación de una nueva mina es un proceso iterativo. La simplicidad de una mina en rajo abierto hace que sea relativamente fácil optimizar el diseño usando un software especializado. La minería subterránea en cambio, depende en gran medida de la experiencia y el conocimiento del equipo de planificación y el margen de error es mucho mayor.

Es importante, al desarrollar cualquier evaluación, identificar claramente en una etapa temprana, el potencial máximo de cualquier proyecto.

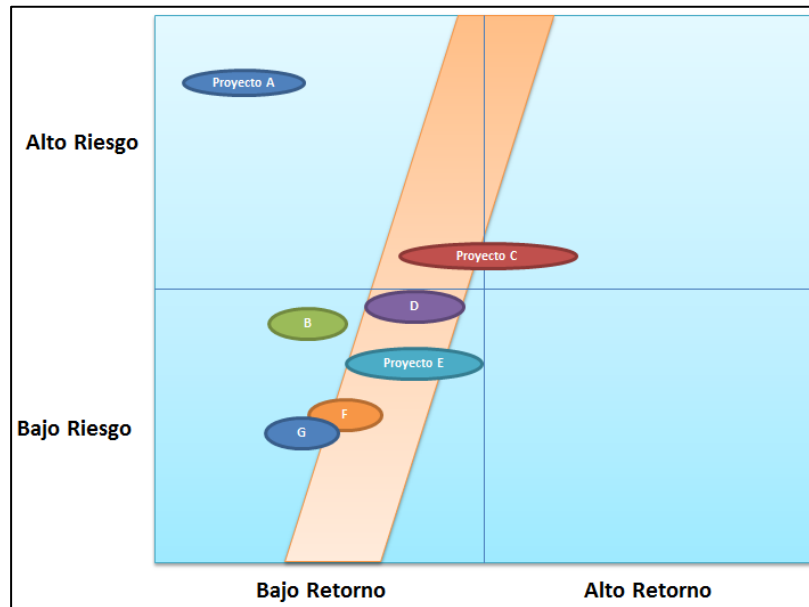
Algunos proyectos nunca alcanzarán los índices económicos de requeridos, ni los requisitos que minimicen los riesgos mínimos tolerados, sin importar el esfuerzo que se les aplique, y se abortarán antes de gastar demasiado. El optimismo sin fundamento (o ensañamiento del equipo de proyecto) puede perder una gran cantidad de tiempo y dinero y desviar recursos de otros proyectos.

Los diagramas de Riesgo-Retorno (ver Figura 5.28) son una buena manera de mostrar el atractivo potencial y relativo de los proyectos. Pueden usarse directamente desde la definición del objetivo de exploración inicial hasta el estudio de factibilidad final. Es una buena



práctica, actualizar permanentemente este tipo de diagramas, a medida que se avanza en las etapas de los proyectos.

Este diagrama muestra en el eje X el nivel de retorno económico a través de VAN por ejemplo. También puede considerarse otro índice económico necesario como iVAN, TIR, Capex, etc. La decisión económica se debe evaluar considerando más de un parámetro económico.



Ref.: Elaboración propia, basado en (Horsley, 2002)

**Figura 5.28. Diagrama de Riesgo-Retorno**

En el eje Y se representa el nivel de riesgo del proyecto, considerando una multiplicidad de factores, tales como riesgos económicos, riesgos de seguridad, riesgos medio ambientales, políticos, comunitarios, entre otros. De esta misma forma, al igual que en el eje X, se deben tomar en consideración todos los riesgos del negocio que puedan incidir de manera importante en la toma de decisión.

La banda color naranja, representa la tolerancia para la toma de decisión o el umbral que debe sobrepasar el proyecto para que sea desarrollado.

Las elipses representan el margen que tienen distintos proyectos respecto al retorno económico en sentido horizontal y el margen respecto al riesgo en sentido vertical.

Mientras más marginal es un proyecto, desde el punto de vista económico y de riesgos, más esfuerzo, tiempo y dinero se requiere para lograr tomar una decisión. Sin embargo, hay casos de proyectos importantes en la gran minería, en donde se han evaluado con majestuosos retornos y muy bajo riesgo, debido a una pobre evaluación

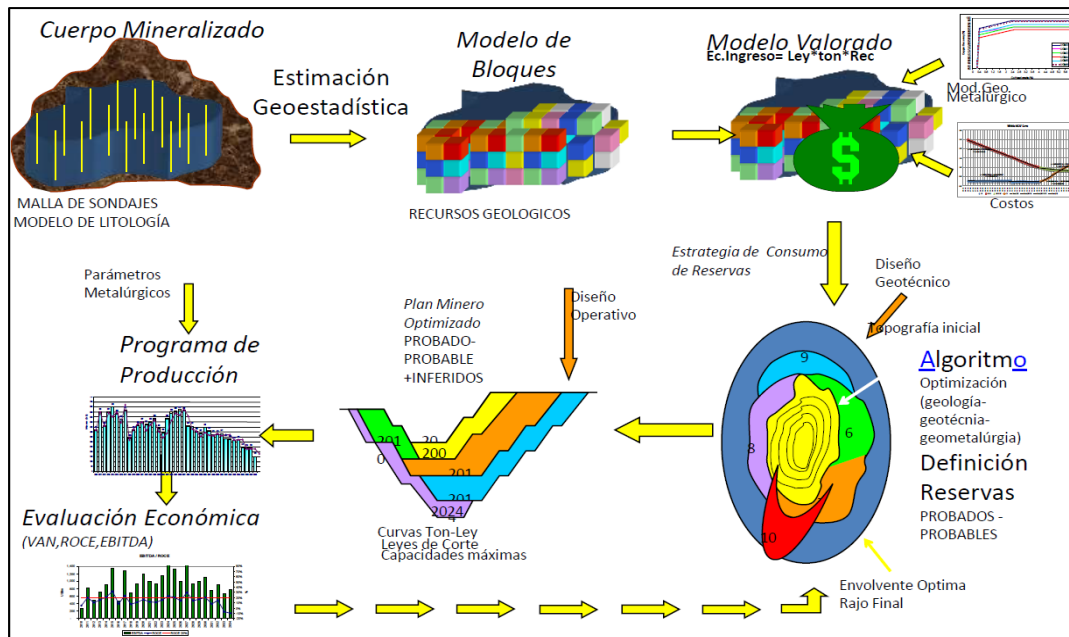
real de sus parámetros y que al avanzar en su desarrollo, se ha ido reflejando este ensañamiento o enamoramiento de los proyectos, ya que los retornos han terminado siendo marginales y los riesgos muy alto. Ha habido casos en la gran minería que los proyectos han migrado desde una situación muy favorable en el diagrama Riesgo-Retorno en etapas tempranas del proyecto (estudios de prefactibilidad y factibilidad), y finalmente en plena ejecución, se han debido detener y cancelar por haber sobrepasado el umbral de tolerancia hacia una situación desfavorable (pérdida de valor de la compañía). Esto ha significado costos de varias decenas de millones de dólares y décadas de trabajo de estos proyectos.

Es por esto, la importancia de que las evaluaciones, desde etapas tempranas, sean con información de la calidad requerida y con las expectativas conservadoras recomendadas.

### 5.3.2 Metodología de la planificación minera

La metodología tradicional de planificación a largo plazo de minas a cielo abierto se basa en un procedimiento secuencial de etapas, en donde el problema original se divide en varios subproblemas más simples de resolver.

En la Figura 5.29 se resume esquemáticamente, la secuencia típica utilizada para una correcta planificación minera, la cual comienza con la información geológica y metalúrgica de los minerales explorados.



Ref.: (Araneda, 2016)

Figura 5.29. Proceso de planificación minera

- Modelo de recursos

El proceso comienza con la generación de los modelos de recursos, que se basan en la información geológica y metalúrgica generada con los sondajes exploratorios.

Generalmente, los modelos de recursos son representados en modelos de bloques, que son sólidos que representan una geometría a los cuales se les asignan información relevante que los caracteriza, tales como densidad, tipo de roca, leyes de minerales, impurezas, % de recuperación metalúrgica, entre otras.

- Categorización de recursos

La estimación confiable de un Recurso y luego de una Reserva de mineral, es probablemente el aspecto más crítico en el éxito de un desarrollo minero.

Una estimación confiable combina datos relevantes y de calidad con una interpretación geológica robusta, además utiliza una adecuada metodología para producir una representación confiable del yacimiento, en términos de:

- Geometría
- Distribución de leyes
- Densidades
- Variables metalúrgicas

Una adecuada estimación de recursos de mineral será la base de la definición de las reservas de mineral que sustentarán la explotación de la mina.

La metodología de clasificación de recursos minerales, difiere según tipo de mina. En las minas rajo abierto, una vez determinado el límite de explotación de los rajos, se diseñan fases y se determina una ley de corte económica; luego se calcula el volumen total de recursos minerales contenidos en la mina diseñada. En las minas subterráneas, en cambio, los recursos minerales resultan de informar los minerales de los sectores a explotar con su respectiva ley, a leyes de corte variable, producto de un plan minero.

La categorización de los recursos se realiza de acuerdo al ejercicio de planificación de largo plazo, que utiliza en su elaboración la totalidad de los recursos minerales que resultan económicamente explotables.

Las reservas minerales, constituyen un subconjunto de los recursos minerales. La estimación de una reserva de mineral requiere de la colaboración de geólogos, ingenieros de mina, metalurgistas, economistas mineros y otros profesionales del negocio minero.

Además de los aspectos económicos, para la puesta en marcha de un proyecto minero, se deben evaluar aspectos políticos, legales, medioambientales y sociales.

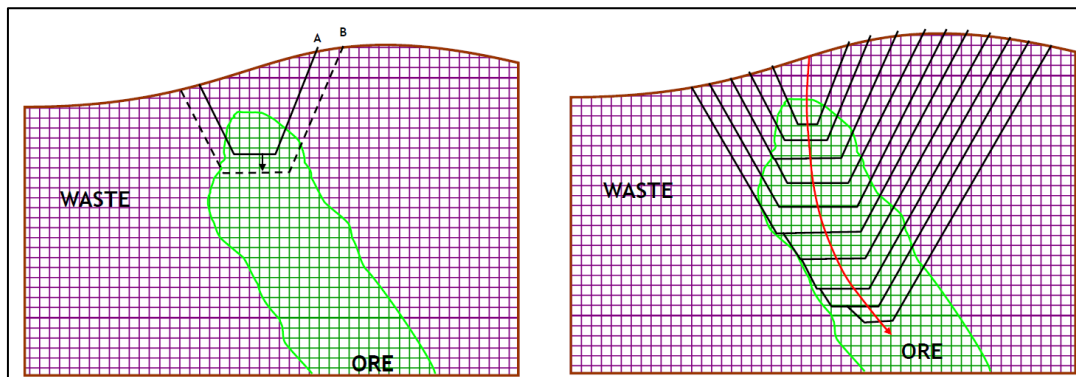
El proceso de determinación de reservas consiste en convertir los recursos medidos e indicados resultantes de los planes mineros en reservas probadas y probables, de acuerdo a los factores modificadores que se agrupan en los geo-ciencias, minería, procesos, del negocio y su entorno.

- Secuencia de explotación

La secuencia de explotación o estrategia de consumo de reservas, es la forma en que se extraen los materiales desde el rajo, durante su vida útil o *Life Of Mine (LOM)*. La extracción del material se realiza en sucesivos rajos intermedios, los que reciben el nombre de “fases” o “expansiones”.

La secuencia de explotación de las distintas fases está relacionada con la distribución de las variables geológicas, geometalúrgicas y económicas del yacimiento.

Buscando maximizar la recuperación del metal fino del yacimiento, una alternativa es diseñar rajos intermedios al pit final, utilizando la misma metodología de diseño del pit final e introduciendo variaciones de precio de venta del producto final (metal).



Ref.: (Araneda, 2016)

**Figura 5.30. Estrategia de secuencia de explotación según pits anidados**

Buscando maximizar la recuperación del metal fino del yacimiento, una alternativa es diseñar rajos intermedios al pit final, utilizando la misma metodología de diseño del pit final e introduciendo variaciones de precio de venta del producto final (metal).

Con esto, se obtiene una secuencia de rajos más pequeños (pudiendo generarse como fase N°1 la explotación de dos o más rajos pequeños), en donde éste o estos rajos tiene o tienen asociados el precio de venta del producto (PVP) más bajo (cada bloque tiene una mayor exigencia

para ser extraído), hasta llegar al PVP pronosticado para el largo plazo, el cual corresponde al que originó el rajo final.

Esta metodología tiene el problema de que los precios altos hacen mover la dirección de la mina hacia sectores de mejor ley, aun cuando estos tengan una mayor sobrecarga, ya que el costo de mover los estériles asociados al mineral permanece constante.

- Ley de corte

La ley de corte es el valor de un parámetro geológico que se usa para decidir si una tonelada métrica de material es enviada a proceso o no. Es decir, si se considerará como mineral o como ganga.

El beneficio neto o utilidad lograda con el envío de una tonelada de material se expresa a través de una función  $U(x)$ , donde  $x$  corresponde al valor del parámetro utilizado para definir el destino del material, como por ejemplo, la ley de cobre.

Por lo tanto, para tomar la decisión de si una tonelada de material con ley  $x$  será enviada a un destino 1 o a un destino 2 (suponiendo que 1 = *proceso* y que 2 = *descarte*), dependerá de la siguiente relación:

$$U_1(x) > U_2(x) \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Si la utilidad de enviar el mineral a proceso es mayor que a descarte, entonces esa tonelada de mineral debe ser sometida al proceso y obtener un beneficio por ello.

Existe un límite en donde enviar un mineral con cierto parámetro  $x$  es indiferente si se envía a proceso o descarte, es decir:

$$U_1(xc) = U_2(xc) \quad \text{Ecuación 5.3}$$

En esta condición, se dice que  $xc$  es la condición de corte de ese parámetro, o también llamada "ley de corte".

Es decir, si se cumple la Ecuación 5.2, para  $x > xc$ , todo el material con ley sobre  $xc$  conviene que sea enviado al destino 1, o sea, a proceso.

Cuando existen restricciones de proceso, se genera un costo de oportunidad al procesar una unidad adicional de material. Por lo tanto, para evaluar el mejor momento de si cierta tonelada de material debe ser procesada o puede ser procesada posteriormente, se debe considerar que la utilidad o beneficio de enviar el material de ley  $x$  a proceso es la suma de dos partes, esto es:

$$U(x) = U_{dir}(x) + U_{op}(x) \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde  $U_{dir}(x)$  es la utilidad directa de procesar una tonelada de mineral de ley  $x$ , y  $U_{op}(x)$  es el costo de oportunidad o beneficio de cambiar el

programa de procesamiento al agregar esa unidad adicional de material.

Específicamente, si  $t$  es el tiempo incurrido en procesar la tonelada de mineral y  $i$  es la tasa de descuento, el costo de oportunidad se puede expresar como:

$$U_{op}(x) = -t i VAN \quad \text{Ecuación 5.5}$$

- Ley de corte marginal

Cuando no hay restricciones de capacidad, se utilizan las leyes de corte marginal o leyes de corte mínimas y no se consideran los costos de oportunidad.

Ahora, si se consideran todos los costos asociados a enviar una tonelada de mineral al proceso, esto es, el costo de extracción mineral ( $M_o$ ), el costo de procesamiento del mineral ( $P_o$ ), el costo de *overhead* del mineral ( $O_o$ ), el costo de refinación del mineral ( $R$ ), junto con otras variables tales como la recuperación metalúrgica ( $r$ ) y el precio del metal ( $V$ ), la utilidad de enviar a proceso una tonelada de mineral quedaría expresado como:

$$U_o(x) = x r (V - R) - (M_o + P_o + O_o) \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Por otra parte, la utilidad de enviar una tonelada de mineral a botadero de lastre (descarte) quedaría expresada como:

$$U_w(x) = -(M_w + P_w + O_w) \quad \text{Ecuación 5.7}$$

En donde  $M_w$ ,  $P_w$  y  $O_w$  son los costos de minería, procesamiento y *overhead* del mineral enviado a lastre.

Así, el costo marginal es el valor de  $x$ , para el cual  $U_o(xc) = U_w(xc)$ , esto es:

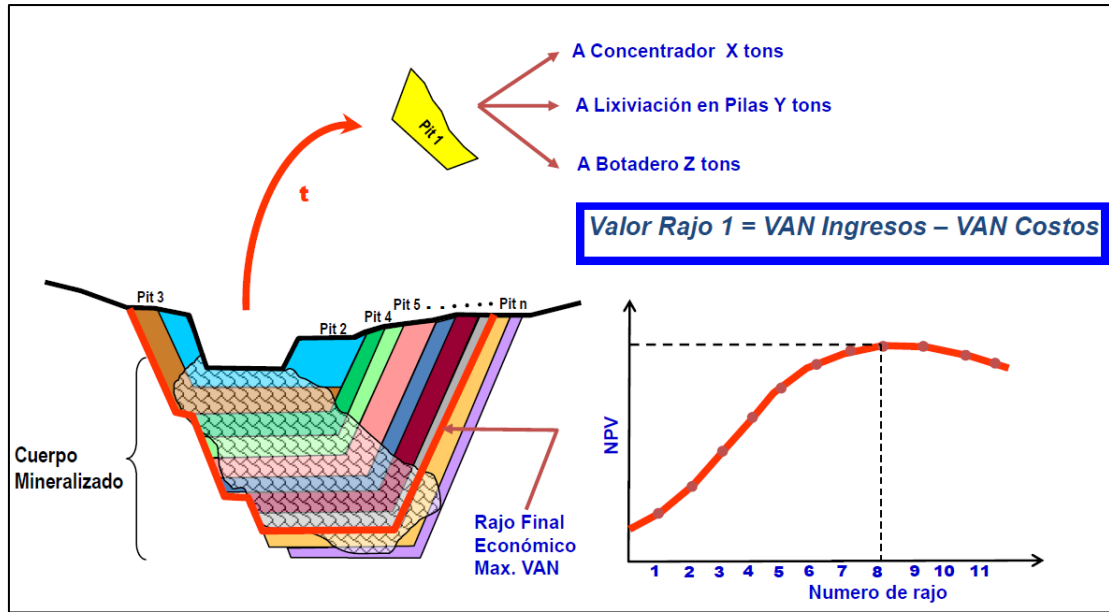
$$xc = \frac{(M_o - M_w) + (P_o - P_w) + (O_o - O_w)}{r(V - R)} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

- Envolvente económica

Las leyes de corte permiten definir la envolvente económica para la explotación de un yacimiento.

Como el caso real de la minería es que sí existen restricciones de proceso, es necesario considerar el costo de oportunidad al procesar una unidad adicional de material.

Lane, K. (2016) desarrollo la teoría que permite resolver el problema de estimar la política de leyes de corte en el tiempo, que maximiza el VAN.



Ref.: (Araneda, 2016)

**Figura 5.31. Esquema de la envolvente económica de un rajo**

En resumen, el modelo de Lane considera que el valor presente  $V$  de una operación basado en un recurso finito depende de varios factores: del tiempo presente  $T$  (ya que los flujos de caja  $C_i$  dependen de los precios y de los costos de cada período  $i$ ); de la cantidad de recurso remanente  $R$ ; y de la estrategia de operación empleada a futuro  $\Omega$  (donde  $\Omega$  consiste en una ley de corte variable, que puede tomar los valores  $g_1, g_2, \dots, g_n$ , para lo que resta de vida de la mina. Es decir, el valor presente de una operación quedaría expresado según:

$$V = V(T, R, g_1, g_2, \dots, g_n) \quad \text{Ecuación 5.9}$$

De todos los conjuntos de estrategias de operación  $\Omega$  que se pueden adoptar, hay un conjunto que es óptimo, en donde se maximiza el valor presente  $V$ , esto es:

$$\text{Max}_{\Omega}\{V(T, R, \Omega)\} = V^*(T, R) \quad \text{Ecuación 5.10}$$

### 5.3.3 Planificación integrada

El concepto de Planificación Minera Integrada (PMI) es algo que la industria minera ha estado incubando desde mediados del siglo XX, en donde se ha buscado una optimización del proceso minero, al integrar la planificación de la mina, con antecedentes geometalúrgicos del mineral y estableciendo cómo inciden en la operación de la planta concentradora, integrando así el plan de extracción de la mina hacia aguas abajo en la cadena de valor.

Este concepto también se ha descrito desde sus inicios con otros nombres, tales como Planificación Mina-Planta (*Mine to Mill*, o *M2M*), Planificación Pit a Puerto (*Pit to Port*) y Planificación de Recursos a Mercado (*Resource to Market*).

De acuerdo a los casos publicados y experiencias compartidas por distintas empresas mineras, es posible evidenciar el beneficio de la PMI, en los siguientes aspectos:

- Mayor caracterización del cuerpo mineral
- Optimización económica
- Trazabilidad del mineral a través de la cadena productiva
- Modelamiento del impacto que tienen las prácticas mineras sobre la naturaleza del comportamiento del mineral
- Modelamiento del impacto que tienen las características mineralógicas sobre el proceso
- Implementación controlada en terreno puede lograr mejoras sustanciales en el rendimiento del proceso

Los casos existentes en la literatura sobre aplicación del concepto de la PMI, se han basado en lograr la optimización del negocio minero, pensando en las operaciones existentes de manera integrada. Las principales aplicaciones se han enfocado a la optimización de los efectos relacionados con la dureza del mineral en el proceso de chancado y molienda, optimización del proceso de flotación, según los parámetros metalúrgicos del mineral, plan de extracción minera de acuerdo a parámetros metalúrgicos del mineral a procesar en planta, entre otros.

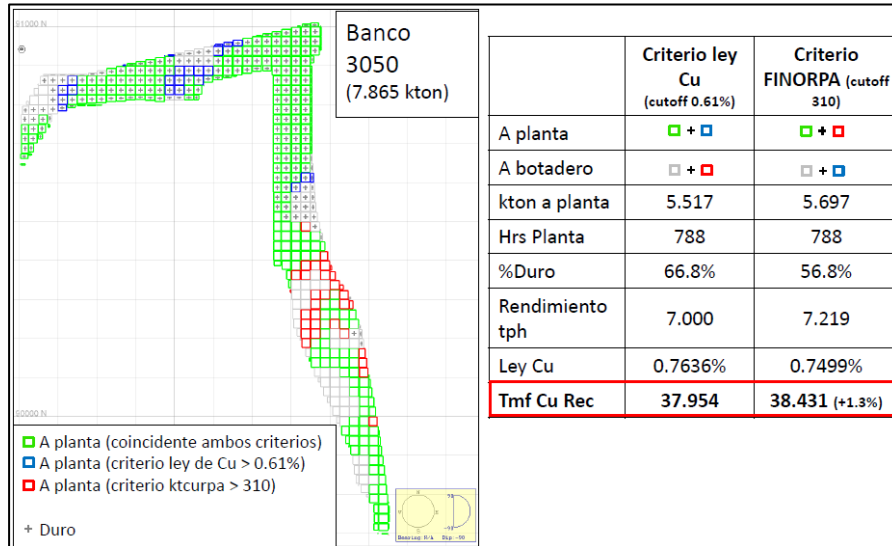
Para ejemplificar el concepto de planificación integrada, en la Figura 5.32 se presenta un caso estudiado por Muñoz, P. et al (2015), el cual fue expuesto en el 4º Seminario Internacional de Planificación Minera, en donde se establece resumidamente el beneficio de integrar el proceso hacia aguas abajo en la planificación minera, especialmente en la planificación de extracción minera desde el banco del pit.

En la figura, se puede observar un caso base tradicional en donde el plan de extracción se basa sólo en la ley de corte mineral (criterio ley Cu) y el caso retador que corresponde a una PMI que considera no solo la ley de corte del mineral, sino que también las leyes de corte de molibdeno, porcentaje de recuperación mineral en la planta y el rendimiento de la planta en términos de toneladas por hora de utilización de la planta concentradora (criterio FINORPA).

El estudio establece que según el criterio adoptado, los bloques que se enviarán a planta y a botadero son distintos, y por ende las toneladas métricas de cobre fino recuperado también. En este caso, el factor dureza del material, restringe a la planta (molienda), afectando negativamente su rendimiento a



7.000 tph para el caso base versus 7.219 tph para el criterio FINORPA. Este último criterio sería un 1,3% más conveniente que el criterio ley Cu (caso base), incluso teniendo una ley mineral menor.



Ref.: (Muñoz, Pineda, Mora, Cortinez, & Bisso, 2015)

**Figura 5.32. Ejemplo PMI aplicada en banco**

## 6 PLANIFICACIÓN INTEGRADA MINA, CONCENTRADORA Y RELAVES

### 6.1 Planificación integrada incluyendo el proceso de recuperación intensiva de agua desde los relaves

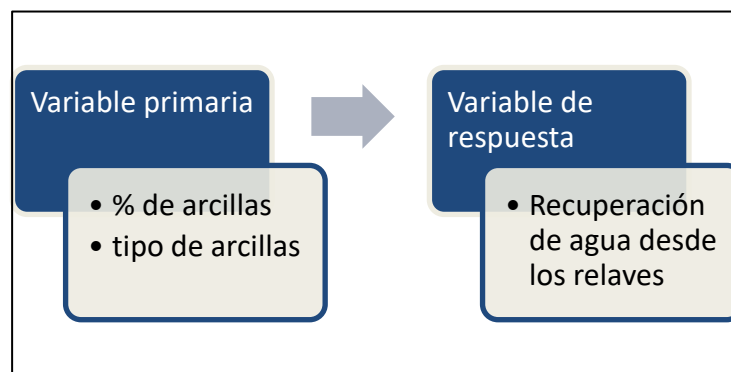
El modelo propuesto consiste en la ampliación del concepto de Planificación Minera Integrada, considerando en el proceso aguas abajo la recuperación intensiva de agua contenida en los relaves. Se denominará Planificación Integrada Mina-Concentradora-Relaves, PIMCR.

Al igual que lo mostrado en la Figura 5.32, al incorporar variables metalúrgicas relacionadas con el proceso de recuperación de agua desde los relaves al modelo de bloque, es posible establecer, según la capacidad instalada de equipos de recuperación de agua, un criterio de explotación que permita dar cumplimiento con la promesa de valor del plan minero.

Para el desarrollo de este modelo conceptual, se utilizarán datos reales de la mina a rajo a abierto de la División Radomiro Tomic de Codelco. Se establecerán los parámetros y propiedades geometalúrgicas que condicionan el proceso de extracción de agua desde los relaves y que condicionan además, su posterior transporte hacia un depósito de relaves y su depositación.

### 6.2 Variables geometalúrgicas

Las variables geometalúrgicas corresponden a las propiedades de los minerales que generen algún impacto positivo o negativo sobre el valor de los recursos. Según Coward et al., 2009, en términos generales, estas variables se pueden clasificar como: Variables Primarias (dureza, alteraciones, ley mineral); y Variables de Respuesta (recuperación mineral, capacidad de procesamiento).



Elaboración propia

Figura 6.1. Modelo propuesto, para variables geometalúrgicas

En la Figura 6.1 se muestra el modelo propuesto para las variables geometalúrgicas relevantes para la recuperación de agua desde los relaves.

Este modelo permite establecer entonces la variable de control (variable primaria) y la variable de verificación del resultado del control (variable de respuesta).

### **6.3 Modelos de arcillas**

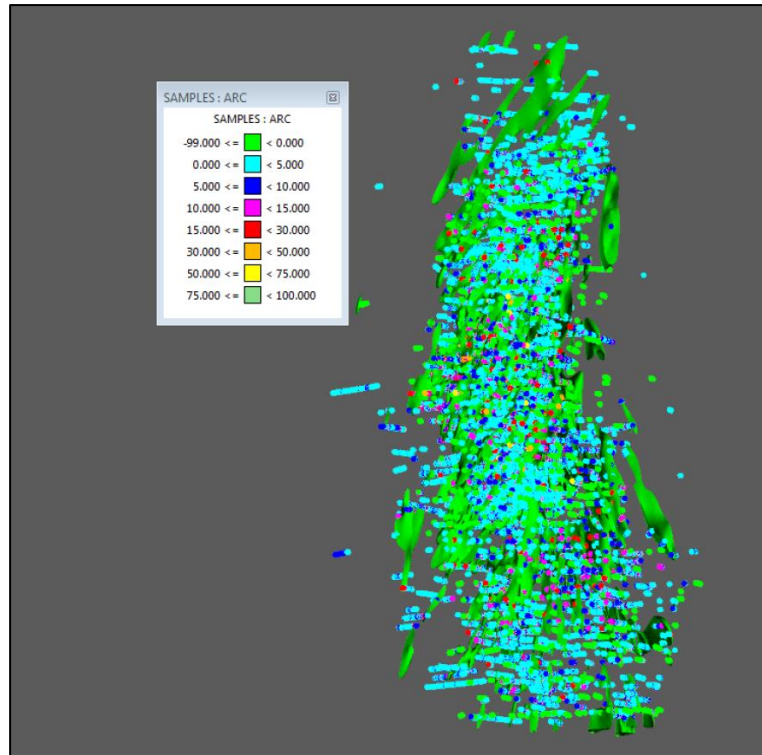
El trabajo propuesto consiste en generar un modelo de arcillas, que identifique diversos aspectos tales como:

- Tipo de arcillas
- Cantidades
- Ubicación espacial

El modelamiento de las arcillas es un factor importante para cuantificar e identificar el tipo de arcillas que tendrán efectos en el proceso de recuperación de agua desde los relaves, así por ejemplo la ganga con porcentajes mayores a 1% de esmectita complica a los procesos de la planta y con un QS mayor a 10% se genera problemas en la recuperación.

En RT se desarrolló un modelo de IZD (Índice de zona de daño), que considera un umbral de 10% de arcillas, el cual es crítico para los procesos de flotación (ver Figura 6.2). Este sólido se construyó con el fin de ser usado para las variaciones de recuperación y dureza de los procesos geometalúrgicos y se utilizó para poblar el modelo de arcillas en el modelo de bloques, mediante kriging ordinario.

Este modelo permite establecer el % de arcillas y expandir su utilización al propósito de este estudio, que es evaluar la recuperación de agua desde los relaves, a través de pruebas y metodologías que se describen en el capítulo 6 del presente trabajo.



Elaboración propia a partir de información confidencial de Codelco

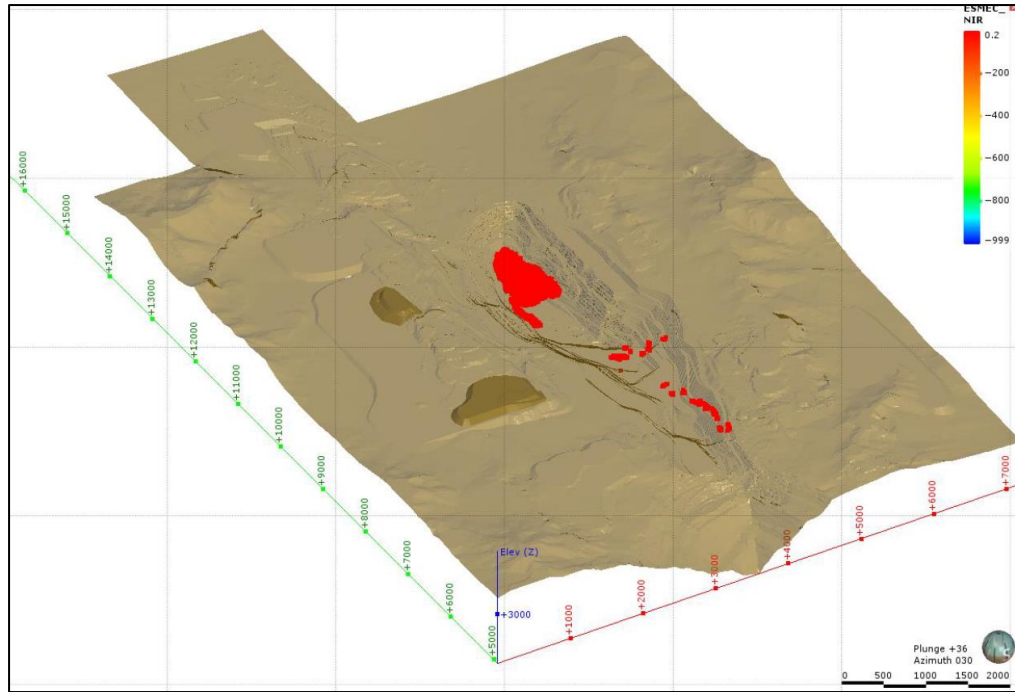
**Figura 6.2. Sólido IZD de RT, con información de compósitos y % de arcillas totales**

Además, para este trabajo se consideró información disponible de RT acerca de mediciones NIR (*Near InfraRed*) que consiste en un método de espectrometría que permite evaluar a nivel cercano al infrarrojo en el espectro de luz, las propiedades minerales de un material. Es un método bastante preciso y práctico, el cual puede ser utilizado en línea con un sistema de control o *in situ*.

En este caso, RT ha avanzado en caracterizar los minerales ganga (sin valor económico y que se transformarán en relave) para la caracterización de las arcillas. En este sentido, se tienen caracterizados 4 tipos de arcillas:

- Sericita (muscovita + illita)
- Caolinita
- Esmectita
- Limonitas

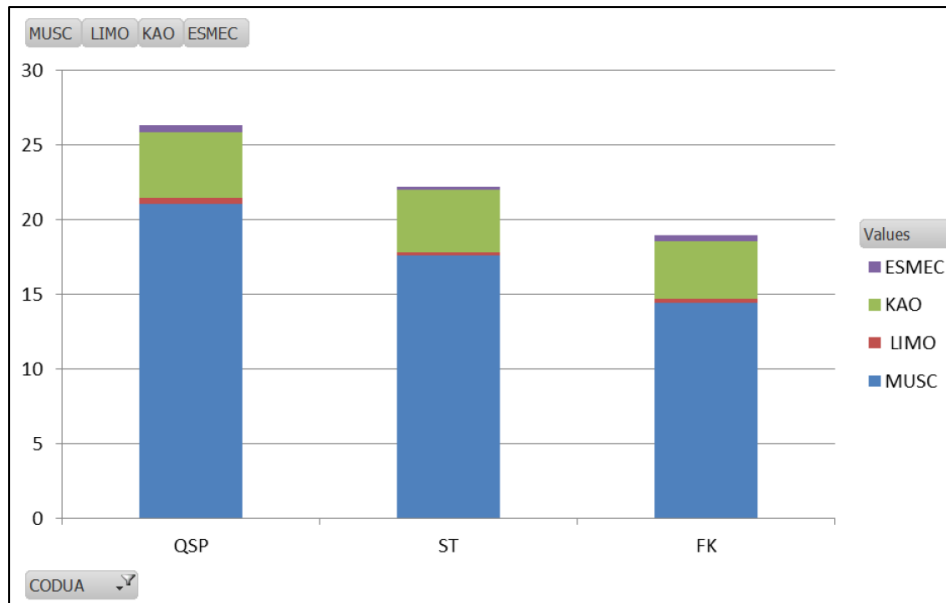
Las muestras evaluadas con NIR se distribuyen en el rajo de RT según se muestra en la Figura 6.3.



Elaboración propia a partir de información confidencial de Codelco

**Figura 6.3. Distribución de muestras con datos NIR en rajo RT**

El gráfico de la Figura 6.4 se describe la cantidad de arcillas presentes en cada unidad de alteración presentes en la misma base de datos de arcillas en la columna denominada CODUA. Se puede observar que la unidad QSP es la que presenta mayor cantidad de filosilicatos y arcillas, seguida por las alteraciones ST y FK que presentan menor cantidad de estos minerales. En este gráfico no se utilizaron las mediciones de NIR con valores negativos



Elaboración propia a partir de información confidencial de Codelco

**Figura 6.4. Proporción de arcillas y filosilicatos en unidades de alteración de RT**

#### 6.4 Incertidumbre geológica

Tal como se ha discutido, el proceso de planificación requiere de múltiples parámetros de entrada, incluyendo costos, variables primarias y variables de respuesta. Todos estos parámetros son estimados a partir de información limitada, previo al proceso de planificación.

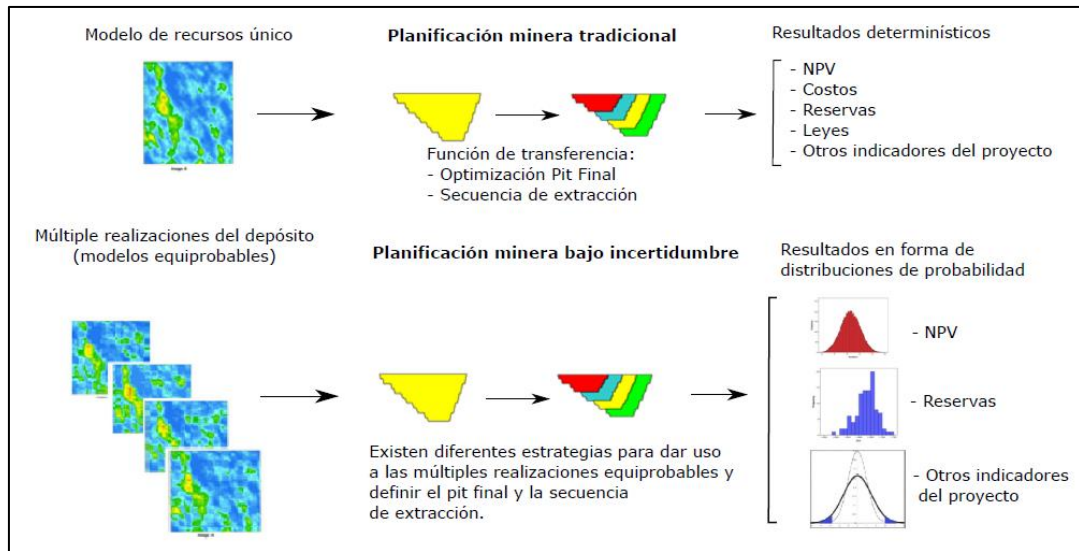
Debido a que este conocimiento no es completo ni cierto sobre los valores que tomarán las variables de planificación, aparece el concepto de incertidumbre. Los parámetros están sujetos a incertidumbre (errores), por lo tanto existe un riesgo en el cumplimiento de los resultados de planificación y de la promesa de valor.

Existen diversas fuentes de origen de esta incertidumbre, tales como: a) incertidumbre geológica, asociada a la variabilidad de las propiedades de los materiales; b) incertidumbre técnica, asociada a los parámetros operacionales; y c) incertidumbre económica, relacionada a la variabilidad de parámetros económicos tales como el precio del cobre, el precio de la energía, entre otros.

A pesar de que existen estas fuentes de incertidumbre que son muy bien conocidas por la industria minera, la metodología tradicional de planificación minera utiliza un enfoque determinístico para construir los programas de producción, los cuales asumen que no existen fluctuaciones en los valores estimados. Esto conduce a planes poco realistas, generalmente con requerimientos operacionales inadecuados, errores en la estimación del VAN

operacional (y de inversión en caso de proyectos), lo que genera un incumplimiento en la promesa de valor del negocio.

El modelo propuesto considera como relevante incorporar la incertidumbre como concepto de la planificación, por lo que la variabilidad de las propiedades que inciden en el proceso de recuperación de agua desde los relaves será considerado en este modelo conceptual, según lo establece la Figura 6.5.

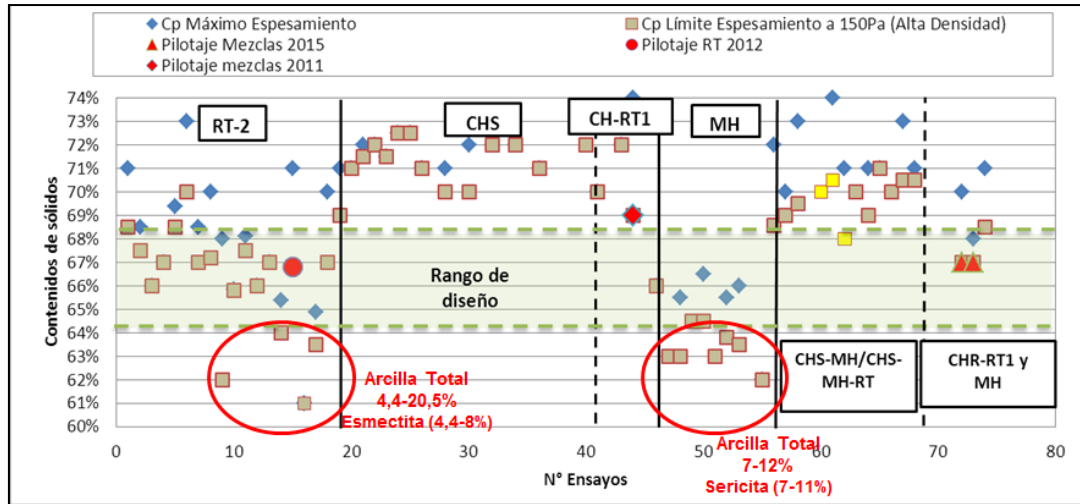


Elaboración propia a partir de información confidencial de Codelco

**Figura 6.5. Planificación tradicional v/s Planificación sobre incertidumbre**

Para el caso de los relaves, se considerará la variabilidad de los resultados obtenidos de pruebas de recuperación de agua, según la información mostrada en la Figura 6.6. En este caso, la recuperación de agua está representada por el % de sólidos que logra la pulpa de relaves al ser sometida a un proceso de recuperación intensivo de agua.

Se puede apreciar la variabilidad de los resultados, lo cual implica una incertidumbre para la planificación.



**Figura 6.6. Resultados de % de sólidos para muestras de relave**

El rango de diseño de los sistemas de recuperación de agua desde los relaves varía entre un 64% de contenido de sólidos hasta un 69%. Sin embargo, hay muestras que se ubican debajo de este rango, las cuales representan un riesgo de lograr el porcentaje de sólidos requerido. Estas muestras tienen un contenido de arcillas del tipo esmeclita y sericita mayores a 4% lo que refleja el impacto en el proceso.

El mineral que contiene más de esos porcentajes de este tipo de arcillas impedirá lograr la recuperación de agua necesaria, por lo que dichos materiales deberán ser procesados en la planta concentradora de manera mezclada con otros con menor cantidad de este tipo de arcillas, de manera de poder diluir el efecto nocivo.

Las muestras que se ubican por sobre el rango de diseño (la mayoría), no requieren de un tratamiento específico, sólo reflejan que pueden lograr fácilmente el rango de diseño y demuestra que existe disponibilidad de materiales para ser mezclados con los pocos aquellos que se encuentran bajo el rango de diseño.

### 6.5 Estadística de parámetros

Las estadísticas consideradas en el modelo propuesto son 3:

- Ley de cobre total (CuT %)
- Recuperación de cobre (Rec Cu %)
- Recuperación de agua de relaves (Rec AR %)

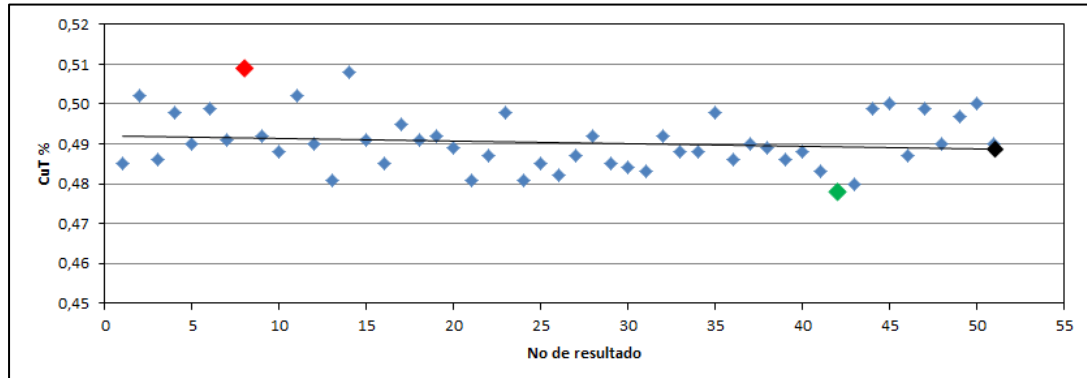
Las dos primeras estadísticas son dos de las típicamente utilizadas en planificación minera integrada.



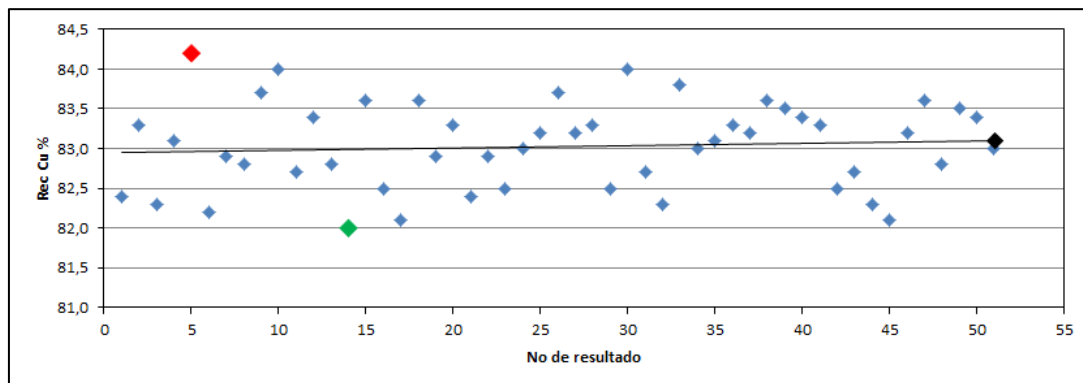
La tercera, corresponde a la estadística considerada para el modelo propuesto, cuando se incorpora un proceso de recuperación de agua intensivo desde los relaves.

La forma de aplicar las estadísticas consiste en la incorporación de la información en los modelos de bloque del pit, y simular su extracción en una secuencia dada.

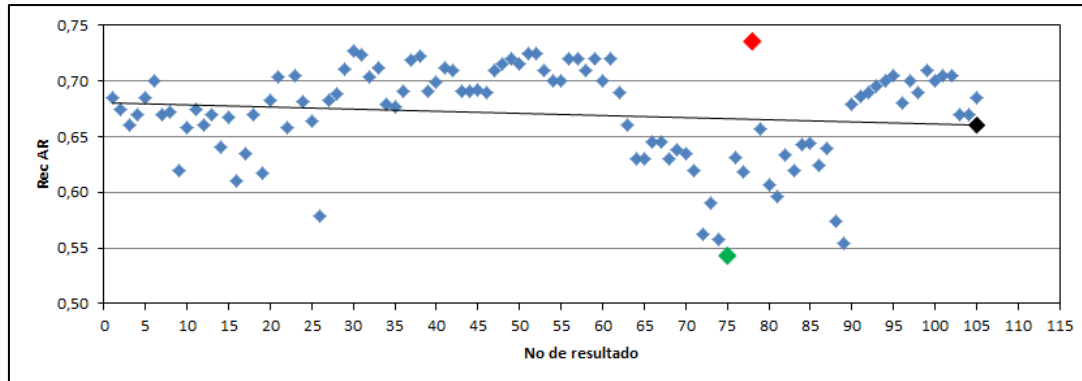
Las figuras siguientes muestran los resultados obtenidos de valores promedio para cada una de las estadísticas.



**Figura 6.7. Leyes medias de CuT por resultado**



**Figura 6.8. Recuperación promedio de Cu por resultado**



**Figura 6.9. Recuperación de Agua de los Relaves por resultado**

### 6.6 Parámetros para la valorización económica

Los valores de los parámetros de valorización económica considerados para el cálculo del pit final se presentan en la Tabla 5.1.

**Tabla 6.1. Parámetros económicos para modelo PIMCR**

Parámetro	Valor
Precio Cu	2 US\$/lb
Precio AR	0,02 US\$/lb
Costo mina	2,8 US\$/lb
Costo planta concentradora	10 US\$/lb
Costo relaves	0,03 cUS\$/lb
Costo venta Cu	1 US\$/lb

### 6.7 Modelos de valorización económica

Se utilizarán 3 modelos de valorización económica, los cuales son:

- Modelo 1: criterio ley de Cu:

$$v_1(b) = \begin{cases} (P_{Cu} - CV_{Cu}) * f * L_{Cu}(b) * Rec_{Cu} * T - (CM + CP) * T & , si b es mineral \\ -CM * T & , si b es estéril \end{cases}$$

- Modelo 2: criterio ley de Cu y Rec mineral:

$$v_1(b) = \begin{cases} (P_{Cu} - CV_{Cu}) * f * L_{Cu}(b) * Rec_{Cu}(b) * T - (CM + CP) * T, & \text{si } b \text{ es mineral} \\ -CM * T & \text{, si } b \text{ es estéril} \end{cases}$$

- Modelo 3: criterio ley de Cu, Rec mineral y Rec agua de relaves:

$$v_1(b) = \begin{cases} (P_{Cu} - CV_{Cu}) * f * L_{Cu}(b) * Rec_{Cu}(b) * T - (CM + CP) * T + (P_{AR} - CV_{AR}) * Rec_{AR}(b) * f_{planta} * T - CR * f_{planta} * T, & \text{si } b \text{ es mineral} \\ -CM * T & \text{, si } b \text{ es estéril} \end{cases}$$

Donde:

- $P_{Cu}$  : Precio de venta del metal (US\$/lb)
- $CV_{Cu}$  : Costo venta mineral (US\$/lb)
- $f$  : Factor de ajuste (2.204,62 lb/ton)
- $L_{Cu}(b)$ : Ley del mineral (%)
- $Rec_{Cu}$  : Recuperación metalúrgica (%)
- $T$  : Tonelaje del bloque (ton)
- $CM$  : Costo extracción mina (US\$/ton)
- $CP$  : Costo procesamiento mineral (US\$/ton)
- $P_{AR}$  : Precio de venta del agua (US\$/lb)
- $CV_{AR}$  : Costo venta agua (US\$/lb)
- $Rec_{AR}(b)$  : Recuperación agua desde relaves (%)
- $f_{planta}$ : Factor planta (97%)
- $CR$  : Costo procesamiento relaves (US\$/ton)

## 7 ESTUDIO PROPIEDADES RELAVES MINA RT

Para la implementación de la PMIR para los relaves de la mina Radomiro Tomic, y en específico, para la implementación del proyecto futuro de RT Sulfuros Fase II (PRTS-II), se desarrollaron una serie de estudios enfocados a establecer el comportamiento y las propiedades que influyen en dicho comportamiento, para la aplicación de un proceso de recuperación intensiva de agua desde los relaves.

Para ello, se desarrollaron una serie de estudios tales como pilotaje de procesamiento mineral para la generación de relaves, pilotaje de procesamiento de relaves y pruebas de laboratorio a los relaves.

Se prepararon distintos compósitos<sup>4</sup> a partir de propiedades mineralógicas de mena, con el objetivo de pesquisar la variabilidad de los parámetros de recuperación de agua desde los relaves (espesamiento y filtrado principalmente).

Las pruebas realizadas fueron:

- Ensayos de caracterización física de las muestras:
  - i. Granulometría por tamizaje hasta malla #200
  - ii. Granulometría por hidrometría de 75  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$
  - iii. Gravedad específica de sólidos
- Ensayos de selección de floculante
  - i. Pruebas de sedimentación a escala laboratorio para selección de floculante.
  - ii. Pruebas de reología para los floculantes seleccionados.
- Ensayos de sedimentación
  - i. Pruebas con floculantes y determinación de dosis de floculante óptima.
  - ii. Determinar la tasa de tratamiento.
  - iii. Determinación de % de sólidos de descarga obtenida en el underflow para cada tipo de equipo.
  - iv. Determinación de la claridad de agua a obtener en el espesador.
  - v. Determinación de la reología de las muestras de underflow.
  - vi. Determinar el diámetro, tipo y número de equipos necesarios para un tonelaje de tratamiento dado

---

<sup>4</sup> Compósito, se refiere una mezcla de dos o más materiales de propiedades físico-químicas distintas de manera de obtener propiedades distintas.

- Ensayos de transporte y reología
  - i. Determinar las propiedades básicas de los relaves.
  - ii. Estudiar las propiedades reológicas del relave con viscosímetro rotacional.
- Ensayos de comportamiento coloidal
  - i. Propiedades básicas.
  - ii. pH, conductividad de la pulpa.
  - iii. Determinación de presencia y tipo arcillas.
  - iv. Análisis electroquímico del agua de proceso.
  - v. Análisis de intercambio catiónico.
  - vi. Sensibilidad de la sedimentación al pH

### 7.1 Gravedad específica

La Tabla 7.1 muestra el resumen de los compósitos seleccionados como representativos para el análisis.

**Tabla 7.1. Densidad de sólidos**

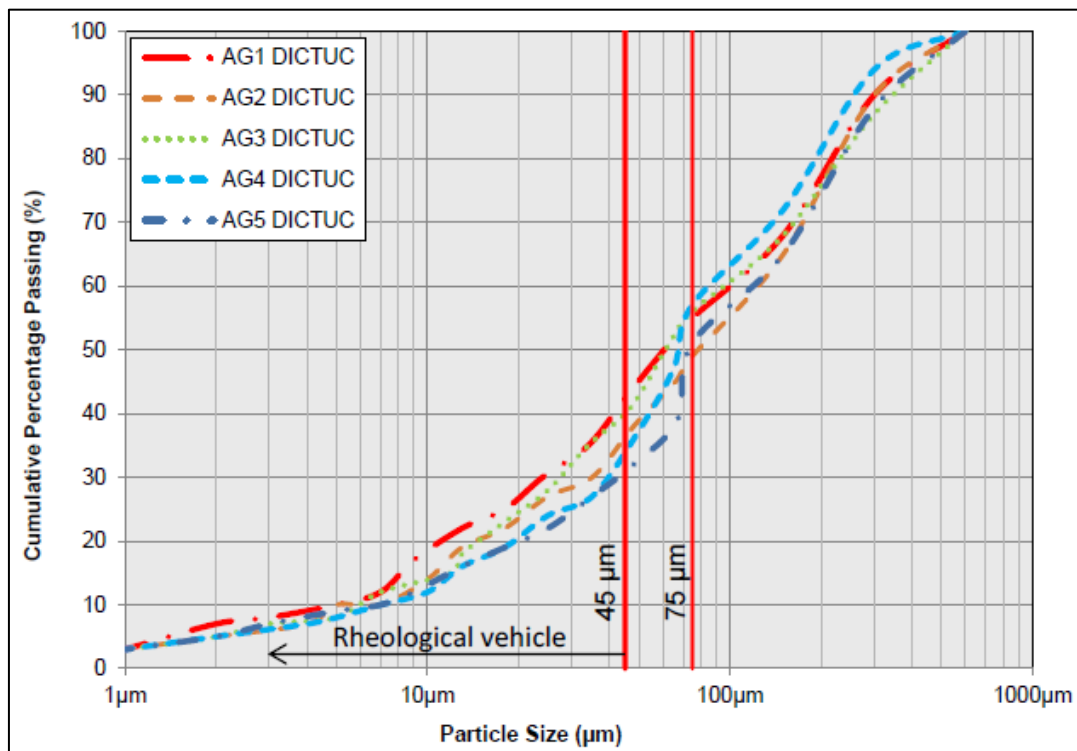
Muestra/ Compósito	Gs
C1	2,65
C2	2,65
C3	2,63
C6	2,66

### 7.2 Distribución granulométrica de partículas

La Tabla 7.2 muestra el resumen de los compósitos seleccionados como representativos para el análisis. La Figura 7.1 muestra la distribución granulométrica de las muestras estudiadas. Estos análisis fueron llevados a cabo por la empresa Dictuc.

**Tabla 7.2. Tamaños característicos y % de finos**

Muestra/ Compósito	d <sub>90</sub>	d <sub>80</sub>	d <sub>50</sub>	d <sub>20</sub>	d <sub>10</sub>	% < 75 μm	% < 45 μm
C1	292	226	85	18	3	47	34
C2	284	215	74	14	2	51	35
C3	272	212	78	17	3	49	33
C6	284	218	81	12	2	48	36



Ref.: (Codelco, 2014)

**Figura 7.1. Distribución granulométrica de los sólidos, para los compósitos definidos**

### 7.3 Velocidad de Sedimentación

La Tabla 7.3 muestra el resumen de los resultados de la velocidad de sedimentación, aplicando una dosis de 15 g/t de diferentes proveedores de floculante.

Tabla 7.3. Velocidades de sedimentación en m/h (15 g/t de floculante)

Muestra/ Compósito	AP- 2024	AP- 2020	A 2030	SNF 913	SNF 923	SNF 603	M <sup>5</sup> 1011	R <sup>6</sup> - DR 1050
C1	1,73	1,29	2,16	1,10	1,14	0,65	1,17	1,94
C2	1,74	1,68	2,40	1,49	1,60	1,51	1,83	1,37
C3	6,17	6,06	8,00	3,41	4,26	4,00	6,82	5,20
C6	4,63	3,90	5,63	2,93	4,18	4,26	3,50	4,32

### 7.4 Reología

En la Figura 7.2 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos reológicos de YS y viscosidad plástica en función del porcentaje de sólidos de los compósitos estudiados.

Es importante señalar que los compósitos 1 y 6 se comportan como los límites inferior y superior, respectivamente.

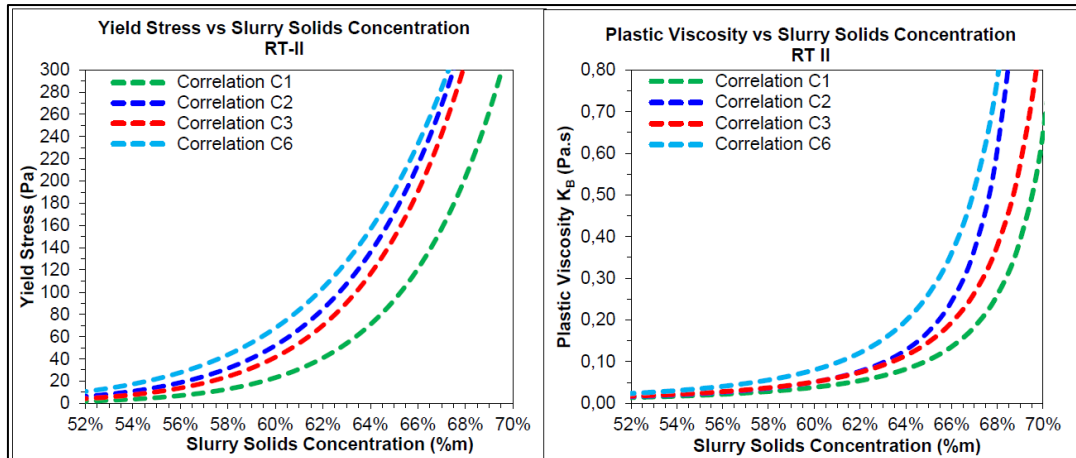
La muestra C1 corresponde a la muestra que logra el menor valor de YS para un valor de Cp dado. Por el otro lado, la muestra C6 es la que mayor YS obtiene para un Cp dado. Esto quiere decir que la muestra C6 es la que representa al material de mayor complejidad de recuperación de agua desde los relaves, siendo esta la que requiere de mayor energía para lograr un mayor Cp (mayor recuperación de agua).

De acuerdo a lo observado, es posible determinar además el tipo de tecnología aplicable a estos materiales, lo cual se muestra en la Figura 7.3. Las tecnologías indicadas se describen en el capítulo 5.2.3 del presente trabajo.

---

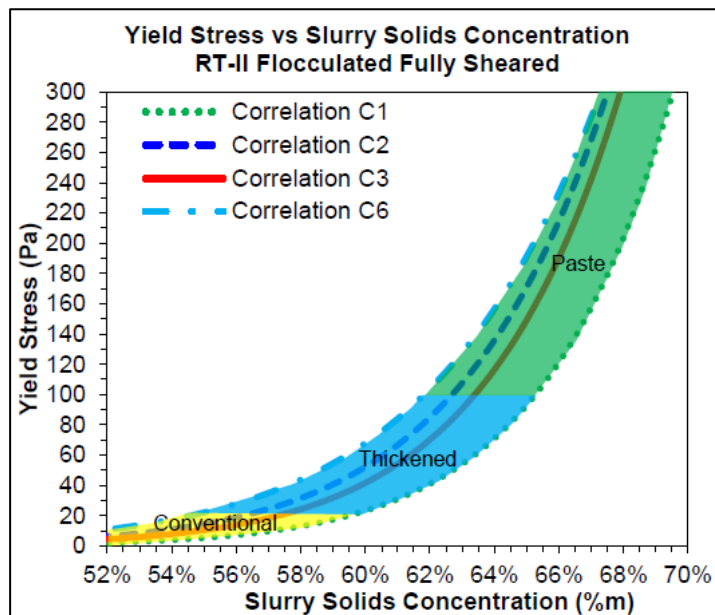
<sup>5</sup> Magnafloc

<sup>6</sup> Rheomax



Ref.: (Codelco, 2014)

Figura 7.2. Parámetros reológicos en función del porcentaje de sólidos



Ref.: (Codelco, 2014)

Figura 7.3. Tecnología espesamiento según YS

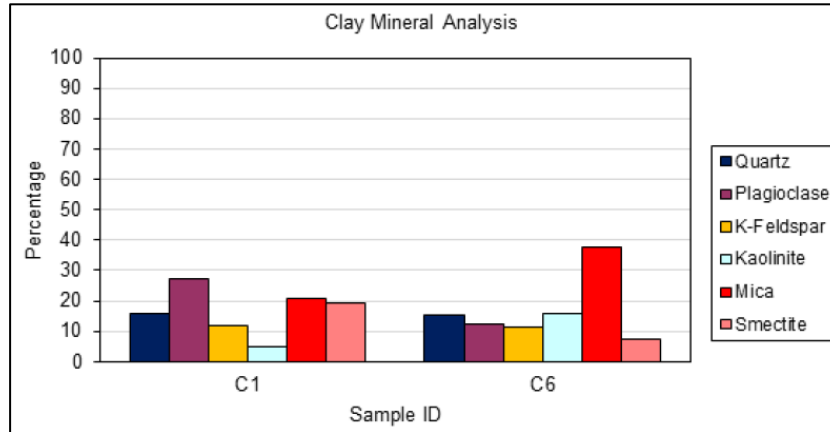
### 7.5 Comportamiento coloidal.

Con el objetivo de conocer las características principales de la propiedad que condiciona directamente el comportamiento reológico de las muestras que se ubican en los límites inferior y superior (C1 y C6), se llevaron a cabo ensayos



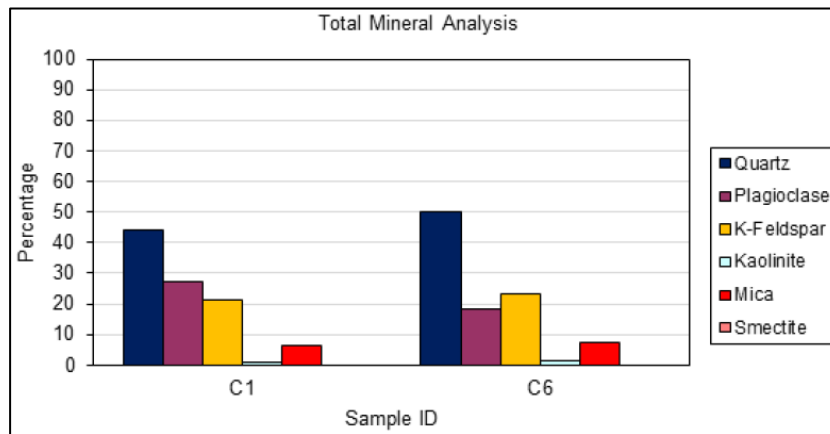
de comportamiento coloidal, el cual corresponde a estudiar los coloides que conforman las arcillas del relave.

Estos ensayos específicos se desarrollaron en los laboratorios de la empresa Paterson & Cooke, en Sudáfrica.



Ref.: (Codelco, 2014)

**Figura 7.4. Resultados difracción rayos X sobre fracción arcilla (bajo 5 mm)**



Ref.: (Codelco, 2014)

**Figura 7.5. Resultados difracción rayos X sobre fracción arcilla (bajo 1 mm)**

Los resultados mostrados en las Figura 7.4 y Figura 7.5, permiten observar que la muestra C1, contiene mayor cantidad de esmectitas y plagioclasa, para las partículas bajo 5 mm. Para el caso de las partículas bajo 1 mm, no se detectaron esmectitas pero sí cuarzo y feldespatos.

En definitiva, estos tipos de minerales son los que condicionan el procesamiento de recuperación de agua, por lo que el estudio define que debe evaluarse en mayor profundidad, de manera de poder limitar el contenido de

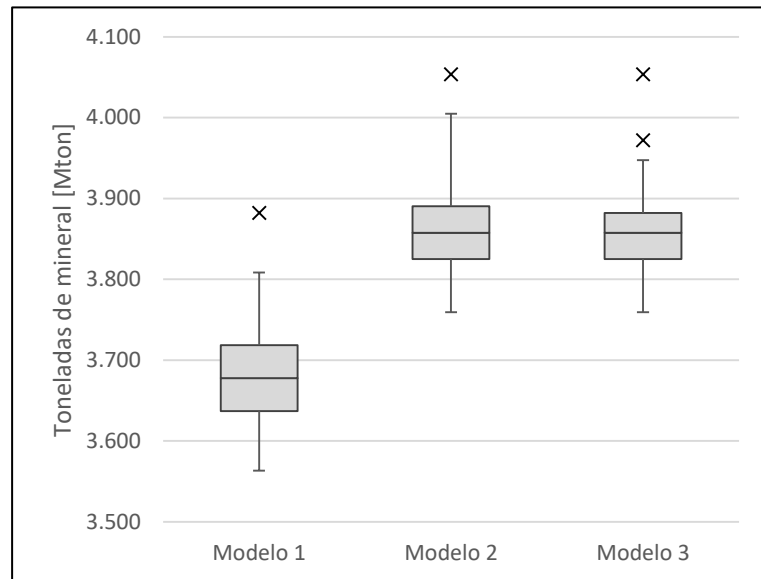
estos materiales en la planta concentradora, y planificar su ingreso al proceso. De esta manera, lograr que la recuperación de agua desde los relaves se logre de acuerdo a lo esperado, en función de un modelo de este tipo de materiales, en específico de las arcillas al igual que los modelos de recursos minerales (mena).

## 8 ANÁLISIS DEL EFECTO EN EL NEGOCIO MINERO DE LA PMIR

### 8.1 Cubicación mineral

Respecto a las toneladas de mineral posibles de procesar, considerando los distintos modelos de valorización, es posible evidenciar la influencia que tienen los parámetros económicos de recuperación mineral y de agua.

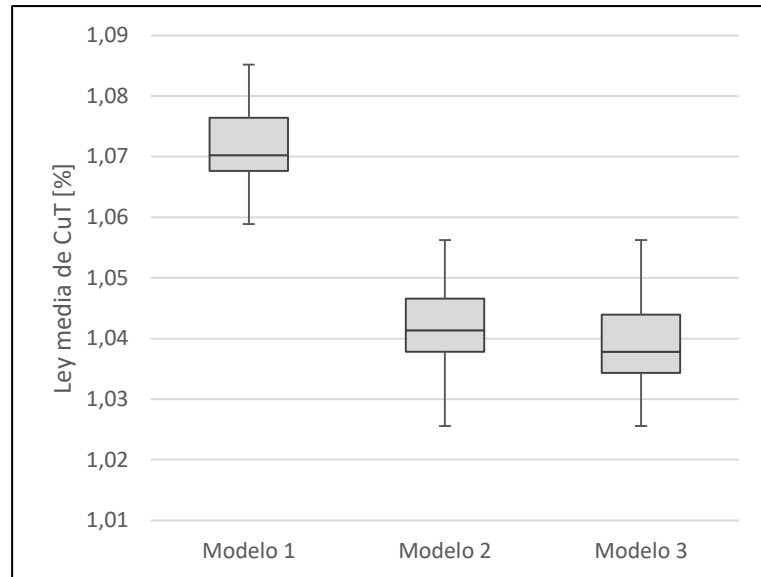
En la Figura 8.1 se observa la diferencia resultante de los 3 modelos evaluados. El Modelo 1, muestra que comparativamente es menor a los Modelos 2 y 3 en más de 150 Mton aproximadamente. La tendencia es coherente con lo esperado, es decir, tomar en consideración las restricciones de la planta concentradora (Modelo 2) y de la planta recuperadora de agua (Modelo 3), permiten definir una secuencia extractiva más apropiada y coherente con el sistema existente y no se genera el cuello de botella que pudiese provocarse en el caso contrario de planificar la extracción sin considerar las capacidades reales de las instalaciones existentes (Modelo 1).



Elaboración propia

**Figura 8.1. Tonelaje de mineral procesado**

De esta misma manera, y en forma coherente con lo esperado como resultado comparativo entre los modelos, la Figura 8.2 muestra la ley media de cobre total procesado según las restricciones de cada Modelo. Era de esperar que la ley media para el Modelo 1 fuera mayor, ya que precisamente ese es el foco del modelo, el de considerar sólo esa variable como restricción de procesamiento e ignorar cualquier otra. En cambio, los Modelos 2 y 3 generan valores de leyes medias menores del orden del 2,5 y 2,9%, respectivamente.



Elaboración propia

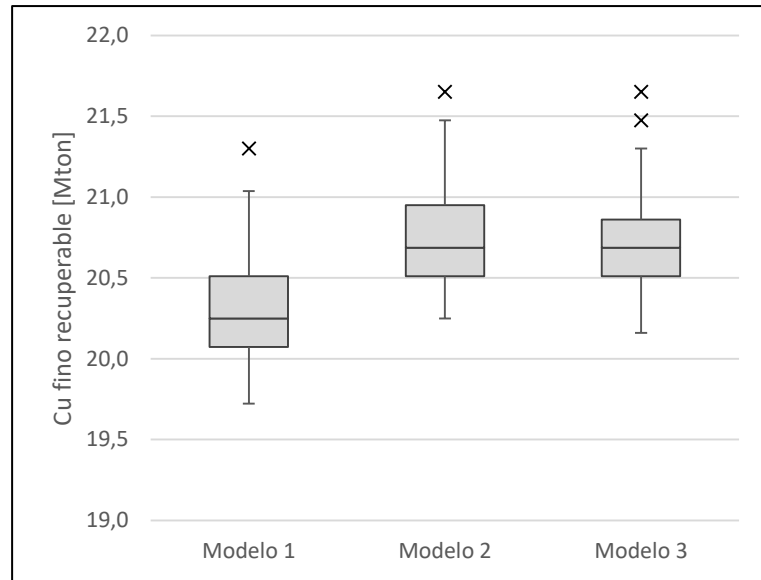
**Figura 8.2. Ley media de cobre total**

En ambos casos, el de tonelaje de mineral procesado y en el de ley media de cobre total, las diferencias relevantes se generan entre los Modelos 1 y los otros 2. La diferencia existente entre los Modelos 2 y 3 son completamente despreciables y, aunque existe una coherencia de la tendencia entre sus diferencias, estas podrían ser una coincidencia.

Por lo tanto, la conclusión de este análisis, permite establecer que el modelo de ley de cobre es el que genera principalmente a restricción de procesamiento de mineral y que esto se ha verificado como plausible y verosímil, con la demostración que la ley media de cobre total es mayor para dicho Modelo.

Finalmente, con respecto al cobre fino recuperable, también existen diferencias entre los Modelos. El Modelo 1 es el que nuevamente se aleja de los otros dos, en este caso en 700 kton aproximadamente, lo cual es esperable después de haber visto las diferencias de las variables anteriores. Finalmente, el cobre fino recuperable tiene que ver con el tonelaje de mineral procesado y el % de recuperación. Para cualquier modelo el % es el mismo, la diferencia se produce debido a la cantidad de mineral posible de procesar. Obviamente a menor tasa posible de procesar, menor cobre recuperado se obtiene.

Este demuestra el efecto positivo en el negocio el considerar las variables que realmente inciden en el proceso de recuperación de cobre y de agua, y el efecto negativo de ignorarlas.



Elaboración propia

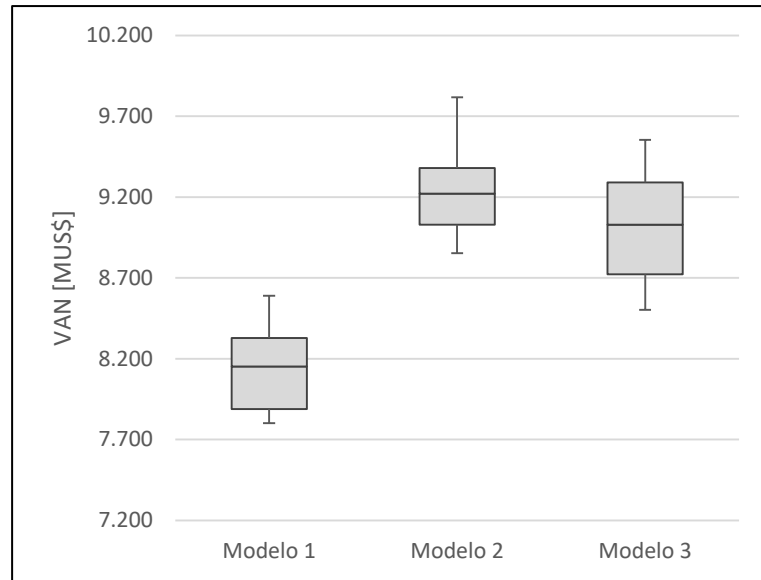
**Figura 8.3. Cobre fino recuperable**

## 8.2 Valor económico

Desde el punto de vista del negocio, los modelos analizados tienen efectos directos en el valor económico total.

Los modelos permiten obtener un valor esperado de beneficio (en MUS\$) los cuales se muestran en la Figura 8.4. En esta, es posible observar cómo el modelo de recuperación de cobre es el que representa el mayor valor, seguido por el modelo de recuperación de agua y por último el modelo de ley de cobre. La diferencia en el VAN entre estos modelos puede llegar a ser de casi 1.000 kUS\$, lo que es muy significativo en el negocio.

Es decir, el modelo que se enfoca exclusivamente a la ley de corte, aunque permite procesar los minerales de mayor ley, al no lograr procesar todo el *throughput* (capacidad de producción), no obtiene el mejor valor. En cambio, el modelo de recuperación de cobre, si bien no es el que logra los mayores leyes, sí permite procesar mayor cantidad en la planta y por ende obtener un mayor valor económico. Lo mismo sucede finalmente con el modelo 3, de recuperación de agua, en donde al otorgarle además un valor al agua recuperada, genera un mayor valor esperado total para el negocio, aunque sigue siendo menor al modelo 2.



Elaboración propia

**Figura 8.4. Valor esperado actualizado**

Estos resultados demuestran que al sensibilizar el precio del agua, el valor esperado del negocio total puede llegar a ser incluso mayor al del modelo de recuperación de cobre. Esto es muy relevante, y lógico también, si se piensa en operaciones mineras ubicadas en sectores con escasa y compleja posibilidad de obtención de agua de proceso, en donde requerirá fuente de agua de mar y deba transportara distancias importantes para su abastecimiento. Esto es lo que sucede en las grandes mineras ubicadas en el norte del país, en donde por estas razones, el costo del agua de proceso puede llegar a costar US\$ 8 el m<sup>3</sup>.

En esos casos, ya no es posible obviar el costo del agua y debe incorporarse al modelo de negocio, ya que como se observa en este análisis, el no considerarlo (modelo 1) implica una afectación directa al valor esperado.

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 Conclusiones

Este trabajo se enfocó a establecer conceptualmente, con un ejercicio simple, cuánto puede llegar a incidir ciertas variables relacionadas con la recuperación de agua desde los relaves, cuando se incorpora al proceso productivo un sistema intensivo de recuperación de agua desde éstos, de manera similar a como se consideran variables de recuperación mineral. El beneficio obtenido es similar al que se ha logrado al implementar metodologías PMI y demuestra que no considerarla genera una afectación al negocio.

La incorporación de la variable de recuperación de agua a un modelo integrado de planificación minera, permite que para el caso de la mina de RT se logre un total de mineral procesado en planta mayor a 150 Mton, en comparación de lo que se lograría si se toma sólo en consideración la variable de ley mineral. Esto es significativo en el aprovechamiento de la capacidad instalada en planta y en el cumplimiento de las promesas de procesamiento anual de la división.

Asimismo, el cobre fino recuperable puede llegar a ser mayor a 700 kton respecto a lo logable considerando solo la ley mineral.

Al considerar sólo el parámetro de ley de mineral en la planificación minera no se observan las restricciones que afectan principalmente en la capacidad de procesamiento o *throughput*, debido a la formación cuellos de botella en el proceso, que no permiten lograr el procesamiento del mineral que la planta podría lograr según las características de su diseño.

En directa relación a la capacidad de procesamiento, el beneficio económico puede llegar a ser en un beneficio en el VAN de 1.000 kUS\$.

### 9.2 Recomendaciones

El estudio presentado corresponde a un análisis conceptual que demuestra el efecto de considerar la variable de recuperación de agua en el proceso en el valor económico de una operación minera. A partir de este análisis, es totalmente recomendable profundizar el efecto que existe en el negocio, cuando se incorpora un proceso exhaustivo de recuperación de agua desde los relaves.

Los relaves corresponden al 97% aproximadamente del material que se procesa en la planta recuperadora de cobre y es en donde se encuentra prácticamente el 99% del agua utilizada en el proceso.

Las iniciativas de optimización en la recuperación de agua desde los relaves aumentarán y desafiarán a la industria, por lo que es altamente recomendable desarrollar estudios en distintas áreas técnicas y económicas, las cuales deben ir íntimamente ligadas y no pueden desarrollarse de manera separada.

Las áreas de desarrollo, investigación y estudios son:

- **Caracterización geometalúrgico de minerales ganga.** Esto se refiere a estudiar la caracterización de los minerales que no tienen el valor económico (ganga) los cuales conforman los relaves en conjunto con el agua de proceso utilizada. La caracterización de estos minerales permitirá desarrollar los diseños apropiados para estos sistemas de recuperación de agua y pronosticar con alta confiabilidad el desempeño de los equipos.
- **Desarrollo de modelos de arcilla, para la correcta planificación y gestión minera.** En base a los estudios de caracterización de minerales ganga, el desarrollo de modelos de arcilla y de otros componentes y/o propiedades geometalúrgicas debe realizarse de manera que dicha información resulte útil para los planificadores y administradores del negocio. Esta información permitirá que los planes sean cumplibles y que los desarrollos de crecimiento sean confiables desde el punto de vista de los riesgos estimados y promesas de valor.
- **Modelo de valorización económica.** En función de los estudios mencionados anteriormente, también se ve necesario profundizar y desarrollar modelos de valorización económica que consideren estas nuevas restricciones. Incluso estos modelos pueden ser extensivos a restricciones ambientales, comunitarias, etc. Todo esto apunta al sentido de eliminar el concepto de *commodity* en el cobre y otorgarle características diferenciadoras que permitan influir de manera más directa en el mercado.



## BIBLIOGRAFÍA

- Araneda, O. (2016). *Fundamentos del Negocio Minero*. Santiago, Chile: MBA Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile, 6° Versión Minera.
- Camus, P., & Hajek, E. R. (1998). *Historia ambiental de Chile*. Santiago: Andros Impresiones.
- Cochilco. (2015). *Factores clave para el desarrollo de la minería en Chile*. Santiago, Chile.
- Cochilco. (2016). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016*. Santiago de Chile.
- Codelco. (2014). *Informe técnico Estudio de Relaves RT II*.
- Codelco. (2016). *Metodología de Clasificación de Recursos y Reservas*. Santiago: Gerencia de Recursos Mineros.
- Codelco NCC-31. (2015). *Norma Corporativa NCC N°31 "Categorización de Recursos y Reservas"*. Codelco, Gerencia de Recursos Mineros.
- Coward, A., Vann, J., & Stewart, M. (17-19 de August de 2009). The Primary-Response Framework for Geometallurgical. *Seventh International Mining Geology Conference*, págs. 109-113.
- David, M. (1982). *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Montreal Quebec: Elsevier Scientific Publishing Company.
- ELAW. (2010). *Guidebook for evaluating mining project EIAs*. Eugene, USA: Environmental Law Alliance Worldwide.
- Fréaut C., R. (2016). *Evaluación de Proyectos*. Santiago, Chile: MBA Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile, 6° Versión Minera.
- Fundación Chile. (2016). *Desde el cobre a la innovación - Roadmap tecnológico 2015-2035*. Santiago, Chile: Fundación Chile y Programa Alta Ley.
- Google Earth. (2017). Obtenido de [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com)
- Hajek, E. R. (1993). *La conciencia ambiental en Chile*. Buenos Aires: Contribuciones.
- Horsley, T. P. (2002). Dollar Driven Mine Planning: The Corporate Perspective to Operational Mine Planning. *AMC Reference Material*.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine, Planning & Design* (Vols. 1 - Fundamentals). CRC Press.
- Jewell, R. (2006). Introduction. En A. C. Geomechanics, R. Jewell, & A. Fourie (Edits.), *Paste and Thickened Tailings - A Guide* (2 ed., págs. 3-9). Western Australia, Australia.
- JORC. (2012). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code)*. The Joint Ore Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientist and Minerals Council of Australia.
- Kinross Gold Corporation. (2017). *Kinross*. Recuperado el octubre de 2017, de [www.kingross.com](http://www.kingross.com)
- Lane, K. (2016). *The Economic Definition of Ore, Cut-Off Grades in Theory and Practice*. COMET Strategy Pty Ltd.
- León A., I. (2001). *Contaminación de la Bahía de Chañaral por el Mineral El Salvador*. Trabajo de investigación, Universidad de Santiago, Santiago.
- McKee, D. J. (2013). *Understanding Mine to Mill*. St. Lucia, Brisbane, Australia: The Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction (CRC ORE).
- Ministerio de Minería, Gobierno de Chile. (2013). *Informe de tendencias del mercado del cobre*. Santiago de Chile.
- Muñoz, D., Pineda, N., Mora, P., Cortinez, J., & Bisso, C. (Julio de 2015). Optimizando la Planificación Estratégica Integrada Mina-Planta (Minera Los Pelambres). *Mineplanning 2015 (4th International Seminar on Mine Planning)*.
- Ortega, L. (1989). *Corfo: 50 años de realizaciones*. Santiago: Universidad de Santiago de Chile.

Outotec. (2016). *Debottlenecking of thickeners in a changing environment*. White paper.

Outotec. (s.f.). *Outotec*. Recuperado el octubre de 2017, de Outotec® High Rate Thickener:  
<http://www.outotec.com/products/thickening-and-clarification/high-rate-thickener/>

SEA. (2017). *Servicio de Evaluación Ambiental del Gobierno de Chile*. Obtenido de Procesos de Participación Ciudadana: [www.sea.gob.cl](http://www.sea.gob.cl)

SMA. (2017). *Superintendencia del Medio Ambiente*. Obtenido de Historia: [www.sma.gob.cl](http://www.sma.gob.cl)