



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

**ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA EL AHORRO DE AGUA Y AUMENTO EN LA  
RECUPERACIÓN DE COBRE EN PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS**

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

**FELIPE ANDRE SAGREDO GÓMEZ**

**PROFESOR GUIA:  
IVÁN MIGUEL BRAGA CALDERÓN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
BRIAN KEITH TOWNLEY CALLEJAS  
RODRIGO ANDRES SOTO TORRES**

**SANTIAGO DE CHILE  
2021**

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE:** Magister en Gestión y Dirección de Empresas  
**POR:** Felipe Andre Sagredo Gómez  
**FECHA:** 21/07/2021  
**PROFESOR GUIA:** Iván Miguel Braga Calderón

## **ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA EL AHORRO DE AGUA Y AUMENTO EN LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS**

La limitada disponibilidad del recurso hídrico en la zona norte de Chile se ha posicionado como uno de los temas relevantes que conforman la agenda país. Para la minería, que seguirá siendo una de las actividades productivas de mayor importancia en Chile, la disponibilidad y gestión adecuada del agua es clave para sustentar la minería en el largo plazo. Por ello, el desafío es de gran envergadura y reviste la calidad de estratégico, ya que precisamente esta actividad se concentra en la zona norte del país, donde los periodos de escasez y sequía son recurrentes.

El presente trabajo fue realizado en la minera Radomiro Tomic de Codelco, con la finalidad de proponer una alternativa real que permita reducir el consumo de agua fresca en el proceso hidrometalúrgico, específicamente en el área de las pilas de lixiviación. Bajo este contexto, el uso del thermo film se plantea como una tecnología que permitirá reducir la evaporación de agua y adicionalmente, su uso genera condiciones favorables que mejoran el proceso de lixiviación de los sulfuros.

Dado lo anterior, se realizaron dos evaluaciones técnico - económicas a través de la implementación de las pruebas industriales y la factibilidad técnica en los semi módulo 25A y semi módulo 25B de las pilas dinámicas. La primera evaluación consideró solamente el efecto que logra el uso de thermo film en el ahorro de agua. La segunda evaluación además de la recuperación de agua considera el efecto que se consigue al incrementar la temperatura al interior de la pila. Es decir, el aumento en la recuperación de cobre de los sulfuros secundarios.

La primera evaluación económica arroja como resultado un VAN negativo, no siendo en primera instancia, un proyecto atractivo para su inversión. Sin embargo, esta perspectiva podría ser cambiada si se consideran los factores de relevancia en la industria de la minería mundial como lo son las comunidades y la sustentabilidad del medio ambiente.

Para la segunda opción, la evaluación económica involucra el ahorro de un 81,6% de agua y la recuperación de cobre de un 1% por el aumento de la temperatura interna, revelando un valor actual neto inicial cercano a los US\$4.649.202. Además de este resultado económico positivo, la inversión en esta tecnología destaca por el impacto positivo que trae a la comunidad dado la mejora en la gestión del agua utilizada en este proceso productivo. Con estos resultados, para la implementación del thermo film se recomienda elaborar políticas de manejo y disposición de residuos plásticos conforme a las actuales políticas medioambientales.

## DEDICATORIA

A mi familia y amigos

## **AGRADECIMIENTO**

Mis agradecimientos a Codelco división Radomiro Tomic por la oportunidad de poder desarrollar este trabajo, proponiendo alternativas en la industria que buscan desafiar a las organizaciones.

Un especial agradecimiento a mis profesores guías Iván Braga y Manuel Rojas por su comprensión, compromiso y rigurosidad, que me orientaron, para que este trabajo lograra generar valor en la industria minera.

Agradezco a todos los miembros del equipo del MBA minero de la Universidad de Chile que hicieron posible que yo forme parte de esta casa de estudios y por el tremendo compromiso y excelencia académica que mostraron todos los docentes y directivos.

En especial agradezco a mi Gerente de Plantas Rodrigo Soto Torres por su apoyo irrestricto y absoluto a mi labor como persona, estudiante y profesional, él ha sido clave para poder terminar este trabajo.

Finalmente, a mi esposa e hija, por todo el apoyo por estos dos años de mucha paciencia y motivación, siempre estuvieron presente y acompañándome en todo momento.

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	4
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.3. ALCANCE.....	5
<b>2. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....</b>	<b>5</b>
2.1. COMPRENSIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	5
2.2. IDEAR SOLUCIONES .....	6
2.3. DESARROLLAR UNA PROPUESTA.....	6
<b>3. MARCO CONCEPTUAL .....</b>	<b>6</b>
3.1. PROCESO PRODUCTIVO DEL COBRE OXIDADO .....	6
3.2. LIXIVIACIÓN EN PILAS .....	8
3.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LIXIVIACIÓN.....	9
3.4. ALTERNATIVAS DE MERCADO EN LA INDUSTRIA MINERA .....	9
3.5. DESIGN THINKING.....	11
3.6. VAN, TIR, PERÍODO DE RETORNO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	12
3.7. MAPA ESTRATEGICO CODELCO RADOMIRO TOMIC .....	13
<b>4. CONDICIÓN ACTUAL Y DESAFÍOS .....</b>	<b>14</b>
4.1. PROBLEMA A RESOLVER .....	14
4.2. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN .....	15
4.3. ADJUDICACIÓN.....	16
4.3.1. PROCESO GENERAL.....	16
4.3.2. HITOS DEL PROYECTO.....	17
4.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS TÉCNICOS DE LA PROPUESTA .....	17
<b>5. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....</b>	<b>21</b>
5.1. CONSIDERACIONES .....	21
5.1.1. TASA DE DESCUENTO.....	21
5.1.2. HORIZONTE DE EVALUACIÓN .....	21
5.1.3. INVERSIÓN .....	22
5.1.4. PRECIO DE VENTA DEL COBRE .....	22
5.1.5. AHORRO DE AGUA.....	22
5.2. ESTRUCTURA DE COSTOS.....	22

5.3.	CASOS .....	23
5.4.	ANALISIS DE SENSIBILIDAD .....	24
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>27</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>28</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>29</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXO A .....</b>	<b>32</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Consumo de agua total en la industria minera 2012 -2018 (fuente: COCHILCO) .....	2
Figura 2: Evolución consumo de agua por proceso 2012-2018 (fuente: COCHILCO) .....	3
Figura 3: Proceso productivo del cobre oxidado .....	7
Figura 4: Esquemas lixiviación en pilas .....	8
Figura 5: Thermo Film .....	10
Figura 6: Barrier Ball (Fuente: EXMA) .....	10
Figura 7: Mapa estratégico Codelco División Radomiro Tomic (Fuente: CODELCO) .....	14
Figura 8: Pruebas SM 25B con thermo film .....	18
Figura 9: Grafico de tasa de evaporación en pruebas fuente: Codelco Radomiro Tomic .....	19
Figura 10: Resultados de la temperatura de las pruebas fuente: Codelco Radomiro Tomic .....	20
Figura 11: Sensibilidad del VAN .....	26
Figura 12: Distribución de la simulación .....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Plazos involucrados.....	17
Tabla 2: Condiciones operacionales de las pruebas .....	18
Tabla 3: Orientaciones Comerciales Codelco Radomiro Tomic .....	21
Tabla 4: Orientaciones Comerciales Codelco Radomiro Tomic .....	22
Tabla 5: Costos thermo film (fuente: Codelco Radomiro Tomic) .....	22
Tabla 6: Evaluación económica Caso I; Solo ahorro de consumo de agua fresca.....	23
Tabla 7: Parámetros Caso II.....	24
Tabla 8: Evaluación económica Caso II; Ahorro de consumo agua fresca y recuperación Cu .....	24
Tabla 9: Variables simuladas .....	25
Tabla 10: VAN simulado.....	25

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería es uno de los principales motores en los que se sustenta el desarrollo económico y social de Chile. Entre los años 2012 y 2017, la industria minera logró exportar en torno a los US \$ 38,7 mil millones, representando en promedio un 10,61% del PIB (SONAMI, 2017). Bajo este contexto, la región de Antofagasta es la que cuenta con mayor actividad minera del país, produciendo el 54% del cobre a nivel nacional. Este alto nivel de producción, sin embargo, ha generado una problemática por la disminución y agotamiento de los recursos hídricos (COCHILCO, 2018).

Si bien, el uso del agua en la industria minera representa solo el 3% del suministro de agua de Chile (Atlas del agua DGA 2016), muchas de las concesiones y operaciones mineras se ubican en zonas donde la escasez de agua es un factor limitante para el desarrollo regional. Al analizar el tema hídrico geográficamente, se puede visualizar que el norte de Chile es una de las áreas más secas del planeta. Los recursos hídricos superficiales son escasos y existe una demanda creciente de agua por parte de los usuarios industriales, locales, las comunidades y el medio ambiente (COCHILCO, 2018).

Por otro lado, existen propuestas de manejo de agua en donde la reutilización, el reciclaje de las aguas y la búsqueda de fuentes alternativas constituyen un punto importante de cambio para la aplicación de medidas sustentables. En este sentido, las propuestas concuerdan con el compromiso real de las empresas, la responsabilidad social empresarial y con su territorio. Así, las compañías están comprometidas con el uso responsable y la implementación de técnicas eficaces de gestión del agua, considerando la existencia de otros usuarios en las cuencas hidrográficas donde operan. Debido a la creciente demanda de agua y al hecho de que ésta, a menudo, no está disponible en cantidades suficientes donde se necesita, la problemática es de suma importancia para las mineras y para las comunidades de interés. La sustentabilidad de las operaciones depende de la habilidad de cada una de las mineras para obtener la cantidad y calidad apropiada de agua y utilizar este recurso de manera responsable (Barrick Gold, 2012; Yamana Gold, 2012).

Dentro del contexto de crisis hídrica a nivel mundial, Chile no está ajeno. Según el estudio Actualización del Balance Hídrico Nacional de la Dirección General de Aguas (DGA), la disponibilidad de agua ha disminuido hasta en un 37% en algunos sectores del país y las precipitaciones se han ido reduciendo gradualmente en todo el país en comparación con 1987, año en que se realizó el balance anterior. La disminución de un 37% en el suministro de agua corresponde a la zona central del país, entre el Aconcagua y el Maule, y detalla que las precipitaciones a nivel nacional han disminuido en un 30% desde la última medición (DGA, 2017).

Según el estudio de la Sonami en el año 2017, la gran minería del cobre que equivale al 96% de la producción de cobre del país, se abastece en su mayoría, mediante agua recirculada de la misma operación, la que suministra el 76,5% del consumo total de agua. En menor medida, el recurso hídrico es abastecido por fuentes subterráneas con 9,6% y superficiales con 7,8%, seguido por agua de mar con 4,8% y agua de terceros con 1,2%. Al considerar exclusivamente las aguas provenientes de fuentes continentales, el mayor porcentaje de abastecimiento es suplido por agua de origen superficial, seguido por el agua de pozo. Ambas fuentes representan el 41,9% y el 41%, respectivamente. En menor medida, el agua continental que se utiliza en la operación de la gran minería del cobre proviene de las aguas del minero y de agua abastecida por terceros. Estas fuentes representan el 10,5% y 6,6% del consumo de agua continental, respectivamente.

En la Figura 1 se muestra el consumo de agua en metros cúbicos de la industria minera entre los años 2012 al 2018. Se puede observar la tendencia de los consumos globales en la minería. El agua continental se mantiene estable en los últimos años, el agua de mar se observa una tendencia al alza y el agua recirculada, por otra parte, mantiene variaciones año a año.

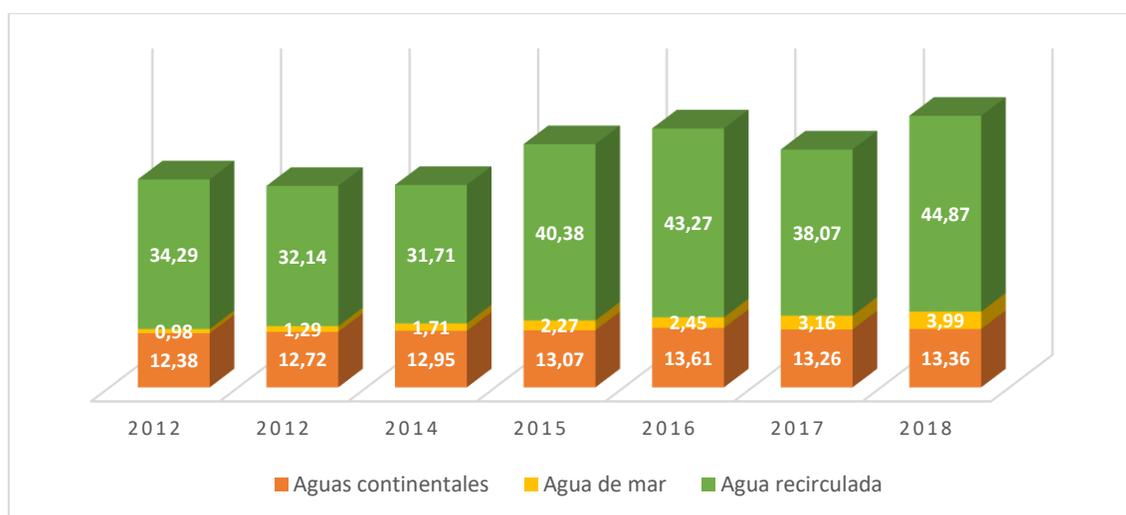


Figura 1: Consumo de agua total m<sup>3</sup>/s en la industria minera 2012 -2018 (fuente: COCHILCO)

Según el estudio de COCHILCO durante el 2018, el principal consumo de agua en la minería del cobre fue en el proceso de concentración de minerales sulfurados para la obtención de concentrados. Este representa el 60% de las aguas continentales utilizadas en la minería del cobre. Le sigue el ítem otros o servicios varios, que durante el 2018 llegó a representar el 16%. En este punto se contabilizan las aguas utilizadas en campamentos, para riego y otros procesos de menor consumo de agua. En tercer lugar, se ubica el proceso de hidrometalurgia para la obtención de cátodos a partir de minerales oxidados. Este proceso alcanzó el 13% del total de aguas continentales. Por otra parte, está el área mina que alcanzó el 5%. Finalmente, el área de fundición y refinación que representa el 4% del consumo de aguas continentales (Figura 2).

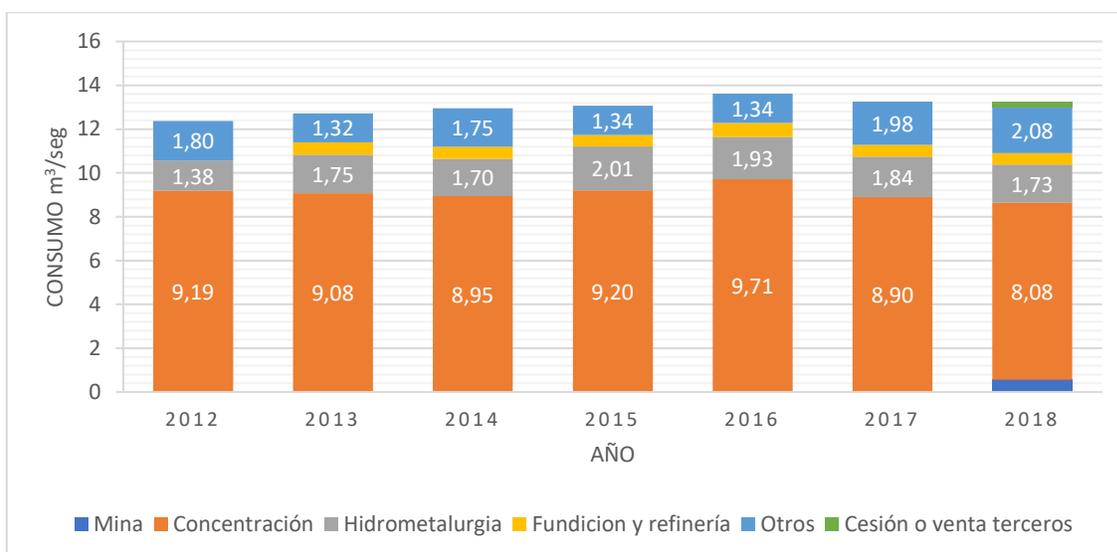


Figura 2: Evolución consumo de agua por proceso 2012-2018 (fuente: COCHILCO)

Las plantas concentradoras tienen un alto consumo de agua, como también dificultades para establecer tranques de relave, lo que ha motivado a las compañías buscar alternativas de procesamiento de sulfuros. En la actualidad, a través de un proceso hidrometalúrgico es posible lixiviar sulfuros secundarios, tales como calcosina y covelina con buenos resultados operacionales. Sin embargo, los sulfuros primarios tales como calcopirita y bornita siguen siendo un gran reto para la industria. Las principales empresas mineras que operan en el país se encuentran trabajando en innovar en la lixiviación de sulfuros primarios. Una de las alternativas más estudiadas es la lixiviación con sal y biolixiviación. Este proceso, además, acrecienta sus expectativas de resultado si se logra aumentar la temperatura de la pila de lixiviación (Levenspiel, 2004).

Actualmente, el ahorro de agua en los procesos mineros está enfocado en la capacidad de recirculación. Los excedentes de agua pueden ser reutilizados dentro de un mismo proceso, en etapas diferentes, o enviadas desde y hacia procesos distintos, de acuerdo con los requerimientos de calidad y cantidad de cada uno de ellos. En ambos casos, se produce un ahorro importante por efecto de la optimización del uso del recurso y la reducción en los volúmenes de aguas que deben ser tratadas previo a su descarga (COCHILCO 2018).

Son escasos los estudios existentes a nivel nacional para cuantificar la reducción de evaporación y consumo de agua por uso de coberturas plásticas en pilas de lixiviación. A pesar de ello, investigaciones realizadas en operaciones de lixiviación Glencore-Xstrata Lomas Bayas en el 2011, muestran una evaporación de riego con aspersión de 9,8 l/día/m<sup>2</sup> y una evaporación por goteo de 4,5 l/día/m<sup>2</sup>. De esta manera, la evaporación con aspersión es 2,17 veces la de riego por goteo. Asimismo, el estudio indica que la evaporación con cobertura plástica en la pila es de 1,5 l/día/m<sup>2</sup>, con lo que se obtiene un 76% de reducción de evaporación respecto a riego con goteo sin cobertura.

Es importante considerar que, al usar una cobertura plástica en las pilas se genera un aumento de temperatura en su interior. De acuerdo con la literatura actual, no ha sido posible obtener estudios particulares con evidencia detallada. Sin embargo, existen algunas investigaciones empíricas hechas en faenas mineras relacionadas a este aumento de temperatura. En estos análisis empíricos, se ha evaluado el efecto de la temperatura en las pilas respecto a la cinética y recuperación de cobre. Estas investigaciones han arrojado resultados positivos en diferentes magnitudes dependiendo de cada faena y considerando condiciones operacionales, mineralogía, entre otras.

Desde una mirada de mercado, la empresa Biohydro, quien han desarrollado un thermo film desde el año 1997, ha evidenciado que es posible lograr una diferencia de hasta 8°C con el uso de un producto de film a 1,5 metros de profundidad de la pila. Esto permite aumentar la velocidad de extracción de los minerales oxidados y sulfuros secundarios, y contribuye al aumento de extracción de sulfuros primarios en condiciones de lixiviación no convencional.

Esta tesis propone analizar una alternativa técnica para reducir el consumo de agua fresca en los procesos y generar una condición de temperatura en la pila que permita aumentar la recuperación de cobre. Para ello, se realizarán pruebas industriales en la División Radomiro Tomic de Codelco utilizando el thermo film como un mecanismo para obtener los primeros resultados de mejora en las condiciones de recuperación de cobre.

## **1.1. OBJETIVOS**

Evaluar la viabilidad de una alternativa real para reducir el consumo de agua fresca en el proceso de lixiviación, y adicionalmente, evaluar las condiciones que permitan aumentar la recuperación de cobre en dicho proceso.

## **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar la condición hídrica en zonas mineras y el efecto sobre el futuro de la industria.
- Analizar las alternativas existentes que promueven el ahorro de agua en procesos mineros.
- Estudiar el efecto de la temperatura en la recuperación de cobre en pilas dinámicas.
- Evaluar técnicamente el efecto de ahorro de agua por el uso del thermo film.

- Evaluar técnicamente el efecto de la temperatura en la recuperación de cobre en pilas dinámicas utilizando thermo film.
- Evaluar económicamente el uso de thermo film en pilas de lixiviación de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas industriales.

### **1.3. ALCANCE**

De acuerdo con los objetivos planteados, el alcance de esta tesis es establecer mediante la metodología Design Thinking, las oportunidades que existen al usar mecanismos como thermo film en la industria minera. Para ello, se analizarán los resultados obtenidos a escala industrial de la minera Radomiro Tomic de Codelco.

## **2. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

La metodología aplicada se basa en el sistema Design Thinking, en el cual se debe comprender el problema, definirlo, idear soluciones y desarrollar una propuesta (Burdick, 2011).

### **2.1. COMPRENSIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La industria minera del país presenta diferentes desafíos que deberá afrontar para mantener su liderazgo mundial en el futuro. Entre ellos se puede mencionar la promoción de la innovación, sustentabilidad, productividad y el mejoramiento de la relación con las comunidades. Por otra parte, uno de los aspectos claves que la industria debe abordar es la de asegurar los recursos hídricos para satisfacer la producción, y a su vez, promover la optimización del recurso en sus procesos y plantas (COCHILCO, 2017)

Dado lo anterior y considerando la preocupación de los organismos medioambientales y la comunidad por la disminución de los recursos hídricos a nivel mundial, es preciso que la industria minera focalice sus esfuerzos en la búsqueda de alternativas que permitan mejorar sus procesos en cuanto a la utilización y recuperación del agua. Esto con lleva a la reducción en el consumo hídrico y, por ende, la disminución en el impacto ambiental y en la comunidad.

## **2.2. IDEAR SOLUCIONES**

Una alternativa que se vislumbra y se plantea en esta tesis a nivel exploratorio, es la utilización de thermo film en las pilas de lixiviación. Su utilización inicial busca disminuir el consumo de agua fresca desde la cordillera y conseguir beneficios complementarios adicionales con su implementación. Además de la utilización del thermo film, existe otra alternativa llamada Barrier Ball. Esta alternativa corresponde a una cubierta flotante para superficies líquidas compuesta por esferas plásticas cargadas con agua. Su utilización resulta principalmente en el ahorro de agua, pero no trae beneficios adicionales relevantes como si lo hace el uso de thermo film. Por esta razón, el uso de la cubierta flotante Barrier Ball no es evaluado en esta tesis.

## **2.3. DESARROLLAR UNA PROPUESTA**

La propuesta sugerida corresponde a la prueba piloto e implementación de la solución de thermo film en pilas dinámicas. Para ello, se obtienen los resultados de pruebas industriales, los cuales se evalúan considerando:

- Control de operacional de variables
- Evaluación económica
- Recomendaciones

## **3. MARCO CONCEPTUAL**

### **3.1. PROCESO PRODUCTIVO DEL COBRE OXIDADO**

El proceso productivo de minerales oxidados para la obtención de cobre refinado comienza con la extracción del mineral desde los yacimientos. Los minerales oxidados son sometidos a operaciones de trituración a través de chancadores, logrando reducir el tamaño de los fragmentos de roca mineralizada a un diámetro máximo de media pulgada.

Posterior a la extracción de mineral, continua el proceso de recuperación del cobre a través de un proceso hidrometalúrgico que consta de tres etapas:

- Lixiviación en pilas: Recuperación de los metales presentes en la roca mineralizada mediante la aplicación de agua y ácido sulfúrico. Con esto se obtiene una solución homogénea llamada sulfato de cobre.
- Extracción por solvente: Purificación y concentración del sulfato de cobre obteniendo una solución concentrada de cobre.
- Electro-obtención: Recuperación del cobre a partir de una solución electrolítica rica en iones ( $\text{Cu}^{+2}$ ) generando como producto cátodos de cobre de alta pureza.

La Figura 3 muestra a través de un diagrama el proceso productivo del cobre oxidado desde su extracción en los yacimientos hasta finalizar con la obtención de cátodos de cobre con una pureza del 99.9%.

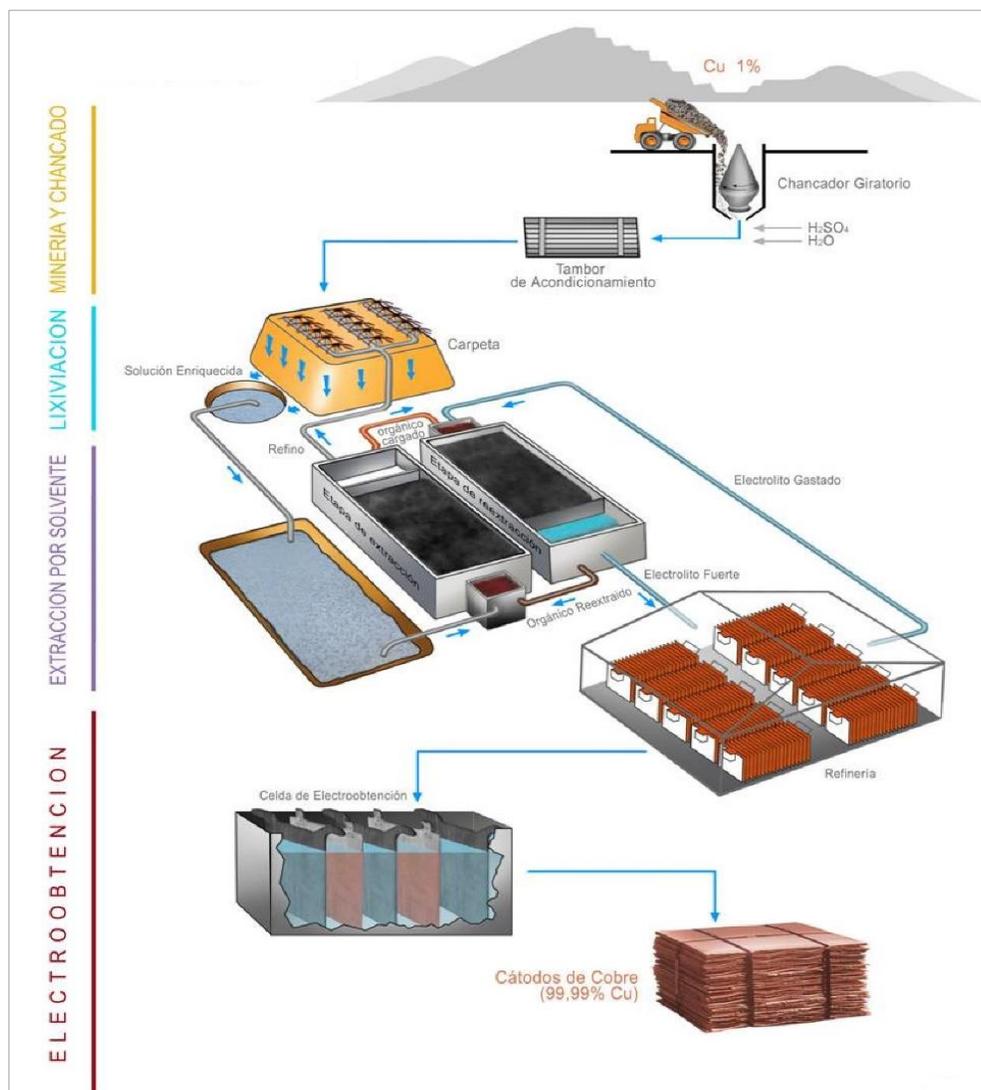


Figura 3: Proceso productivo del cobre oxidado

### 3.2. LIXIVIACIÓN EN PILAS

La lixiviación es la principal operación en el proceso hidrometalúrgico de minerales de cobre. Existen diferentes tipos de lixiviación los que dependen de la ley del mineral, la mineralogía y la granulometría, entre otros factores. Una de las más utilizadas es la lixiviación en pilas (Codelco, 2018).

Las pilas son las acumulaciones de material mineralizado que se realiza en forma mecanizada proveniente del material chancado movilizado por correas transportadoras. Durante el traslado, las rocas mineralizadas se rocían con una solución de agua y ácido sulfúrico para comenzar rápidamente la lixiviación (conocido como etapa de curado). El material acumulado forma una especie de torta o terraplén continuo de 6 a 8 m de altura, que se denomina pila de lixiviación. La pila de lixiviación está levemente inclinada para permitir el escurrimiento y captación de las soluciones. Se utiliza un mecanismo de aspersión o goteo con la mezcla de agua y ácido sulfúrico en la parte superior del terraplén, solución que se encarga de disolver el cobre contenido en los minerales oxidados, formando una emulsión de sulfato de cobre (Figura 4).

Para recolectar el cobre se encuentra canaletas al costado de cada pila que recuperan las soluciones resultantes del riego dividida en dos secciones, una destinadas a los líquidos de bajo contenidos en cobre y, otra, para los que tiene mayor concentración de mineral. Estas emulsiones recogidas se llevan primero a piscinas desarenadoras para ser clarificadas y luego a diferentes piletas según la calidad de la solución. El riego o lixiviación dura entre 45 a 65 días para intentar diluir la cantidad máxima de cobre. El material restante o ripio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer más metal. (Codelco, 2018).

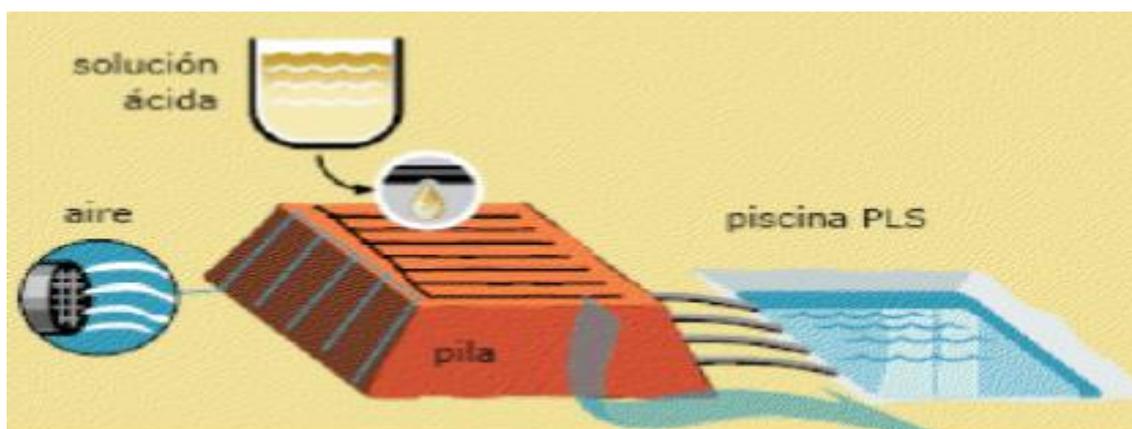


Figura 4: Esquemas lixiviación en pilas

Las pilas de lixiviación son importantes en el proceso hidrometalúrgico dado que pueden ser usadas para tratar minerales de baja ley, sulfuros secundarios y minerales de

desecho. También son aplicables a yacimientos pequeños y son capaces de reprocesar soluciones obtenidas.

### **3.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LIXIVIACIÓN**

La temperatura tiene un claro efecto sobre la cinética de lixiviación química de los minerales sulfurados, tanto primarios como secundarios. Las altas temperaturas incrementan las velocidades de reacción, según se deduce de la ecuación de Arrhenius (Levenspiel, 2004).

Las reacciones exotérmicas de oxidación de minerales, que generan calor dentro de una pila, aumentan su temperatura y favorecen las reacciones de oxidación y la velocidad de solubilización del cobre (Franzmann et al., 2005).

En otro sentido, las principales reacciones de oxidación, que determinan la recuperación del cobre a partir de minerales sulfurados, son fuertemente dependientes de la temperatura. Por ejemplo, la calcopirita es muy sensible a la temperatura en cuanto a su lixiviación (Córdoba et al., 2009): su velocidad de reacción es muy lenta y, por tanto, la temperatura determina, en gran medida, el tiempo de lixiviación en pilas. Estos tiempos, normalmente, superan el año y pueden llegar incluso a 18 meses en algunos casos (Dixon, 2003). Por último, la generación de calor en la pila, que depende en gran medida de las condiciones ambientales y de la composición del mineral, como ejemplo su contenido en pirita cuya disolución genera una mayor temperatura. Para disminuir las pérdidas de calor en la pila, se han incorporado importantes cambios en el sistema de riego de éstas, modificando los sistemas de goteo de la disolución de riego y, en casos extremos, incluso, enterrando las líneas de goteo e incorporando termo películas protectoras en la superficie de la pila (Dixon, 2003; Aguirre et al., 2015).

En este contexto, la altura de la pila juega un rol importante en la conservación de calor; la experiencia adquirida en la planta industrial de Minera Escondida, en el Norte de Chile, demuestra que la temperatura subió a medida que aumentó la altura de las pilas (Demergasso et al., 2005; Soto et al., 2013). En el caso de la generación de calor, la presencia de pirita permite también un incremento en la temperatura, la cual no necesariamente se produce de forma homogénea debido a que se pueden generar microambientes dentro de la propia pila (Dixon, 2003; Demergasso et al., 2005).

### **3.4. ALTERNATIVAS DE MERCADO EN LA INDUSTRIA MINERA**

Hoy en día, la industria minera cuenta con algunas alternativas tecnológicas que favorecen el ahorro del recurso hídrico en el proceso hidrometalúrgico.

- Thermo film corresponde a una película transparente, lisa y brillante de PVC, que se instala en la pila para aislar ambientes fríos o temperatura ambiente (Figura 5). Esto facilita el mantenimiento de la temperatura deseada a un nivel constante con menor consumo de energía. Generalmente éste viene con goteros incorporados dentro de la lámina. Cuando esto ocurre se le llama manto irrigador. En esta tesis, sólo se considera la película transparente de PVC, sin los goteros incorporados. En el Anexo A se muestra las principales características mecánicas, tolerancia y normativa al thermo film asociado.



*Figura 5: Thermo Film*

- Barrier Ball corresponde a esferas de material reciclado de tuberías y material plástico, que se instalan en las piscinas de solución para minimizar el efecto de la evaporación, tal como se observa en la Figura 6.



*Figura 6: Barrier Ball (Fuente: EXMA)*

La principal diferencia entre estas alternativas es que el thermo film se instala en las pilas de lixiviación, permitiendo además contener la temperatura al interior de la pila. Para ambos casos se debe tener una política y estrategia de manejo de residuos, esto porque ambos elementos son plásticos y de recambio con una frecuencia relativa dependiendo de la faena y las condiciones climáticas del lugar.

### 3.5. DESIGN THINKING

La definición de este concepto según lo establece el libro “Design Thinking; Innovación en los negocios”, es frecuentemente asociado a la calidad y/o apariencia estética de productos, el design como disciplina tiene por objetivo máximo promover bienestar en la vida de las personas. Sin embargo, es la manera como el designer percibe las cosas y actúa sobre ellas que llamo la atención de gestores, abriendo nuevos caminos para la innovación empresarial.

El designer ve como un problema todo aquello que perjudica o impide la experiencia (emocional, cognitiva, estética) y el bienestar en la vida de las personas (considerando todos los aspectos de la vida, como trabajo, esparcimiento, relaciones, cultura etc.). Eso hace que su principal tarea sea identificar problemas y generar soluciones.

El entiende que problemas que afectan el bienestar de las personas son de naturaleza diversa, y que es preciso analizar la cultura, los contextos, las experiencias personales y los procesos en la vida de los individuos para tener una visión más completa y así identificar mejor las barreras y generar alternativas para transponerlas. Al invertir esfuerzos en ese análisis, el designer logra identificar las causas y las consecuencias de las dificultades y ser más afirmativo en la búsqueda de soluciones.

El designer sabe que para identificar los problemas reales y solucionarlos de manera más efectiva, es preciso abordarlos bajo diversas perspectivas y ángulos. Así, prioriza el trabajo de colaboración entre equipos multidisciplinares, que traen puntos de vista diversos y ofrecen interpretaciones variadas sobre la cuestión y, de esta forma, soluciones innovadoras.

Trabaja en un proceso de múltiples fases y no lineal – llamado Fuzzy Front End – que permite interacciones y aprendizajes constantes. Eso hace que el designer este siempre probando nuevos caminos y abierto a nuevas alternativas: el error genera aprendizajes que le ayudan a trazar direcciones alternativas e identificar oportunidades para la innovación.

Además, como el nombre ya dice, el Design Thinking se refiere a la manera de pensar del designer, que utiliza un tipo de raciocinio poco convencional en el medio empresarial, el pensamiento deductivo. En esta forma de pensar, se busca formular interrogantes a través de la aprehensión o comprensión de los fenómenos, o sea, son formuladas preguntas para responder a partir de las informaciones recolectadas durante la observación del universo que rodea el problema. Así, pensando de manera deductiva, la solución no se deriva del problema: ella encaja en él.

La utilización de esta metodología busca abrir el espectro de alternativas clásicas como lo son el cubrimiento de piscinas y mejoras operacionales, incorporando en la evaluación posterior, elementos tales como el impacto en políticas de sustentabilidad de cada empresa con las comunidades.

### **3.6. VAN, TIR, PERÍODO DE RETORNO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Los parámetros financieros que son comúnmente utilizados para la evaluación de proyectos son el VAN o VPN (Valor Actual Neto), TIR (tasa interna de retorno) y Payback o Periodo de retorno. Con estas variables financieras es posible determinar si un proyecto es o no, viable de desarrollar. Para esta tesis se utilizan las tres variables, el VAN, TIR y el Payback para la evaluación del proyecto. Adicionalmente se utilizan la simulación de Montecarlo para el análisis de sensibilidad con software Crystal Ball.

El flujo de caja es la acumulación de activos líquidos en un determinado periodo, lo cual viene a ser un importante indicador de liquidez. Sin duda el estudio de los flujos de caja puede ser utilizado para analizar la viabilidad de proyectos de inversión u optimización y la rentabilidad de este. Tal como establece Glenn A. Welsh en el libro Planificación y Control de Desembolsos de Capital, “Si la diferencia monetaria calculada entre la inversión neta de efectivo (el efectivo pagado representado por el valor actual de la inversión) y el valor actual calculado de los flujos netos de entradas de efectivo de la inversión es favorable (es decir, positiva) a los flujos netos de entradas de efectivo, el proyecto generará una mayor renta que la producida por la tasa neta de rendimiento. Si la mencionada diferencia no es favorable a los flujos netos de entradas de efectivo, el proyecto no devengará la tasa neta de rendimiento.”

La Tasa de Interna retorno también se utiliza para la evaluación de proyectos, tal como lo define Nassir y Reinaldo Sapag en su libro; Preparación y Evaluación de Proyectos, “Representa la tasa de interés más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero, si todos los fondos para el financiamiento de la inversión se tomaran prestados y el préstamo (principal e intereses acumulados) se pagaran con las entradas en efectivo de la inversión a medida que se fuesen produciendo”.

Otro parámetro financiero que se utiliza en la evaluación de proyectos es el PR, Payback o Periodo de retorno, el cual “Determina el número de periodos necesarios que tarda en recuperar la inversión inicial, o bien sus equivalentes de efectivo en tiempo cero” tal como lo define Roberto Solé Madrigal en su libro de Ciencias Económicas.

El análisis de sensibilidad en los proyectos se reduce a la expresión de los flujos de efectivo en términos de las principales variables del proyecto y al cálculo de las consecuencias de posibles errores de estimación en las variables. Obliga a los administradores a identificar las subyacentes, indica donde sería más útil la información adicional y ayuda a evidenciar los pronósticos confusos o inapropiados, según se lo define Franklin Allen. Stewart C. Myers. Richard A. Brealey en su libro *Principio de Finanzas Corporativas*.

Una herramienta muy utilizada para el análisis de sensibilidad es la simulación de MonteCarlo, el cual a través de *un método que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad que tienen los computadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos*.

El Modelo de Monte Carlo simula los resultados que puede asumir el valor actual neto - VAN – mediante la asignación aleatoria de un valor a cada variable pertinente del flujo de caja.” David B. Hertz (1964 y 1968), incorpora el análisis de riesgo en las decisiones de inversión de la empresa. Para ello, utiliza el Método de Monte Carlo para obtener el valor medio más probable y la dispersión de un proyecto de inversión.

Es importante determinar cuáles serán las variables fundamentales que ayudarán a definir el problema. David B. Hertz considera nueve factores clasificados en tres categorías; Análisis de mercados, precios de venta, crecimiento del mercado, cuota de mercado, costos fijos y variables, vida útil de la inversión, costos de inversión y valor residual de la inversión. Lo que Hertz propone con el Método Monte Carlo es determinar los posibles valores de estos factores. Posteriormente, con las probabilidades determinadas, se selecciona al azar un valor específico para cada variable. El proceso se repite varias veces para lograr varias combinaciones de factores seleccionados y de rentabilidades, y con ello obtener una distribución de frecuencia donde el VAN esperado se pueda determinar, así como su desviación típica.

### **3.7. MAPA ESTRATEGICO CODELCO RADOMIRO TOMIC**

El mapa estratégico de la división (Figura 7) considera dentro de sus pilares el quiebre tecnológico (innovación). Esto se sustenta en el desafío que tiene la división por mantener sus niveles de producción y excedentes a la corporación.

Las reservas que tiene Radomiro Tomic le permiten mantener los niveles de producción actuales por 50 años más. Esto sólo será posible en la medida que se pueda procesar sulfuros borníticos y/o calcopiriticos a través de un proceso hidrometalúrgico o con la aprobación por parte del directorio de Codelco de la construcción de una concentradora por 100 mil o 200 mil toneladas. A la fecha se encuentra en revisión.

Uno de los pilares fundamentales en la propuesta de valor de la división y la corporación dice relación con cumplir los compromisos ambientales y desarrollar relaciones colaborativas y respetuosas con las comunidades (CODELCO). Para ello debe existir la excelencia en la operación y la innovación continua en los procesos. El uso de thermo film es un medio apalancador de los desafíos de la división en para lograr obtener procesos productivos con mejores estándares, una creciente mejora en las relaciones con las comunidades y un menor uso de recursos hídricos alineado con los objetivos estratégicos de las corporaciones.



Figura 7: Mapa estratégico Codelco División Radomiro Tomic (Fuente: CODELCO)

## 4. CONDICIÓN ACTUAL Y DESAFÍOS

### 4.1. PROBLEMA A RESOLVER

La división actualmente tiene autorizado un consumo de agua para sus procesos de aproximadamente 290 l/s. Ésta es obtenida de dos aducciones, San Pedro e Inacaliri, el primero es una aducción de agua que debe ser tratada en la planta de osmosis inversa para luego ingresar al proceso. En el caso de Inacaliri, es agua limpia que se utiliza directo a los procesos. La proporción actual de uso de recursos hídricos es 70% San Pedro y un 30% Inacaliri. De esta manera, el 100% del agua que se utiliza en la división proviene de la cordillera (DGA, 2017).

Es posible que en un futuro no lejano la autoridad solicite reducir los consumos de agua para la industria minera que se obtienen desde la cordillera o napas subterráneas, para ello la división debe estar preparada para no poner en riesgo la continuidad operacional, pero al mismo tiempo cumplir con los compromisos ambientales y comunidades respecto al consumo de agua.

Finalmente, la división está viviendo un cambio importante en su ley de mineral, pasando de óxidos a sulfuros. De ahí nace el proyecto RT fase II, que considera la construcción de una planta concentradora. No obstante, dado los acontecimientos vividos en el último tiempo en el mundo y el país, la decisión todavía se encuentra en revisión, por lo que obliga a la división a innovar en sus procesos para poder mantener la continuidad operacional de las plantas.

#### **4.2. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN**

En la industria minera existen dos grandes alternativas probadas que ayudan a disminuir la evaporación de agua, estas son, Thermo Film y Barrier Ball.

Ambas alternativas tienen el mismo objetivo principal que es la reducción de la evaporación de agua en los procesos operacionales de la minería. No obstante, éstas no son comparables o sustituibles entre sí, sino más bien, pueden ser consideradas complementarias dentro del proceso macro de la hidrometalurgia y su objetivo primordial de ahorro del recurso hídrico.

En primer lugar, la principal utilización del mecanismo de Barrier Ball es en las piscinas de soluciones (PLS/ILS/Refino). Son hechas de material plástico, y pueden ser fabricadas a partir de productos reciclados. Son diseñadas en forma de esfera y en su interior son cargadas con agua. Estas esferas son capaces de cubrir el 91% de la superficie formando una barrera que reduce la interfaz líquido-gaseosa y favorece la disminución del ingreso de la luz solar, por ende, elimina el espejo de agua. Tienen una resistencia de vientos hasta 190 km/hr y su vida útil estimada es de 15 años. Con la utilización de las esferas, se logra una reducción de evaporación de hasta un 85% y minimizan el consumo de energía en un 75%. El ámbito más relevante de esta alternativa es la comodidad en la manejabilidad en su instalación en las piscinas, utilizando recursos mínimos mecanizados y de personal, favoreciendo la seguridad de las faenas y repercutiendo directamente en la disminución de los costos de su instalación.

Por otra parte, el mecanismo de thermo film se usa en las pilas de lixiviación generando condiciones operacionales atractivas para la lixiviación de sulfuros secundarios. Al igual que la alternativa anterior, su material es en base a plástico. El diseño es parte de una carpeta plástica delgada, como se describió en el apartado 3.2. Se debe considerar condiciones climáticas y del terreno para su instalación, esto dado por la estabilidad en el material de relleno y la geometría de las pilas de lixiviación. Estas condiciones involucran mayores recursos mecanizados y de personal, lo que implica incrementos en tiempos y costos asociados a su montaje. No obstante, el thermo film, tal como se explicó anteriormente, no solo permite disminuir la evaporación de agua, sino también, genera condiciones favorables para mejorar el proceso de lixiviación con sulfuros secundarios. Por esta razón, la alternativa de interés de esta tesis es estudiar la viabilidad e

implementación del mecanismo de thermo film en el proceso productivo y evaluar su impacto.

### **4.3. ADJUDICACIÓN**

Actualmente, en el mercado existen distintas compañías que se encuentran trabajando en los diferentes procedimientos involucrados en las pilas de lixiviación. Múltiples de estas empresas cuentan con una amplia experiencia y dominio en el trabajo relativo a las pilas de lixiviación. Por consiguiente, dicha experiencia las faculta como compañías capaces de desarrollar la implementación del thermo film en las pilas de lixiviación de Codelco.

#### **4.3.1. PROCESO GENERAL**

Antes de llevar a cabo una licitación, se definen las bases del procedimiento de revisión para poder asegurar que todos los aspectos evaluados cumplan con el estándar o criterio mínimo establecido. Una vez definido los parámetros y mecanismos que se utilizarán para precalificar y evaluar las ofertas técnicas y económicas de las empresas ofertantes (proponentes), se realiza el llamado público a licitación.

La licitación está a cargo de una comisión evaluadora, dividida en 3 aspectos fundamentales, técnico, económico, y seguridad.

En primera instancia se realiza una precalificación en donde se consideran antecedentes económicos y financieros, comerciales y laborales y finalmente, técnicos. La Comisión estudiará los antecedentes de precalificación de todos los proponentes y precalificarán si cumplen a cabalidad con los parámetros mínimos exigidos para este punto. La comisión podrá solicitar aclaraciones a los proponentes con el objeto de complementar su información.

Posteriormente, se evalúan las ofertas técnicas de los proponentes, en donde calificará "Cumple" o "No Cumple" y para finalizar el proceso se evalúan las ofertas económicas de los proponentes que calificaron "Cumple" en la evaluación de las ofertas técnicas.

Una vez determinada la mejor oferta técnico - económica y habiendo negociado según corresponda, la comisión evaluadora recomendará adjudicar el encargo, a la(s) empresa(s) que haya(n) presentado la(s) oferta(s) más conveniente. La comisión evaluadora podrá adjudicar de forma parcial o total los servicios licitados, según sea más beneficioso para Codelco.

Para el proceso de adjudicación del desarrollo de la prueba industrial, Codelco y en específico la División Radomiro Tomic realizan una licitación acorde a lo expuesto anteriormente.

#### 4.3.2. HITOS DEL PROYECTO

En referencia el proceso realizado para esta iniciativa en el marco de la tesis, la siguiente tabla permite apreciar los plazos involucrados en las principales actividades a desarrollar desde la toma de decisión hasta la puesta en marcha de la prueba industrial (Tabla 1).

<b>Etapas del proyecto</b>	<b>Plazos (días)</b>
Definiciones y alcances del estudio	14
Base técnica para licitación	21
Llamado a licitación	14
Recepciones antecedentes de precalificación	7
Evaluación precalificación	5
Resultados precalificación	1
Publicación aviso de llamado a propuesta	1
Recepción propuesta técnica y económica	28
Calificación técnica	14
Calificación económica	14
Negociación	21
Recomendación adjudicación	7
Envío carta pronto inicio	1
Inicio servicio	60

*Tabla 1: Plazos involucrados*

#### 4.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS TÉCNICOS DE LA PROPUESTA

Para estudiar y analizar el real beneficio del uso del mecanismo de thermo film en las plantas de lixiviación, se realizaron pruebas industriales en planta Radomiro Tomic de Codelco.

Las condiciones operacionales de las pruebas a nivel industrial se pueden ver en la Tabla 2. En ella, se puede identificar que el semi modulo 25A fue el blanco, es decir, condiciones de operación normal, y el 25B semi modulo al cual se le instaló thermo film. Ambos semi módulos en condiciones mineralógicas similares al igual que ley de cobre total y ley de cobre soluble.

RESUMEN CONDICIONES OPERACIONALES		
PRUEBA	1	2
Operación	LIX PRIMARIA	LIX PRIMARIA
Tipo de Prueba	INDUSTRIAL	INDUSTRIAL
Pila	PILA DINAMICA	PILA DINAMICA
Modulo	25-A	25-B
Granulometría	P80 1"	P80 1"
Opera con Thermo film	NO	SI
Superficie cubierta en corona	N/A	18.000 m <sup>2</sup>
Superficie cubierta en talud	N/A	1.000 m <sup>2</sup>
Angulo de pendiente de subida	40°	35°
Duración ciclo Lixiviación	55 días	55 días

Tabla 2: Condiciones operacionales de las pruebas

Las pruebas hechas tuvieron una duración de 55 días, periodo que dura el ciclo de lixiviación. Durante las pruebas se midieron una serie de variables, tales como: temperatura con sensores instalados en la pila, tasa de evaporación de agua, cinética de lixiviación y al finalizar el ciclo, la recuperación de ambos semi módulos.

En la Figura 8 se aprecia el thermo film instalado en Radomiro Tomic, CODELCO.



Figura 8: Pruebas SM 25B con thermo film

De las pruebas efectuadas se obtuvieron los siguientes resultados para la evaporación de agua (Figura 9).

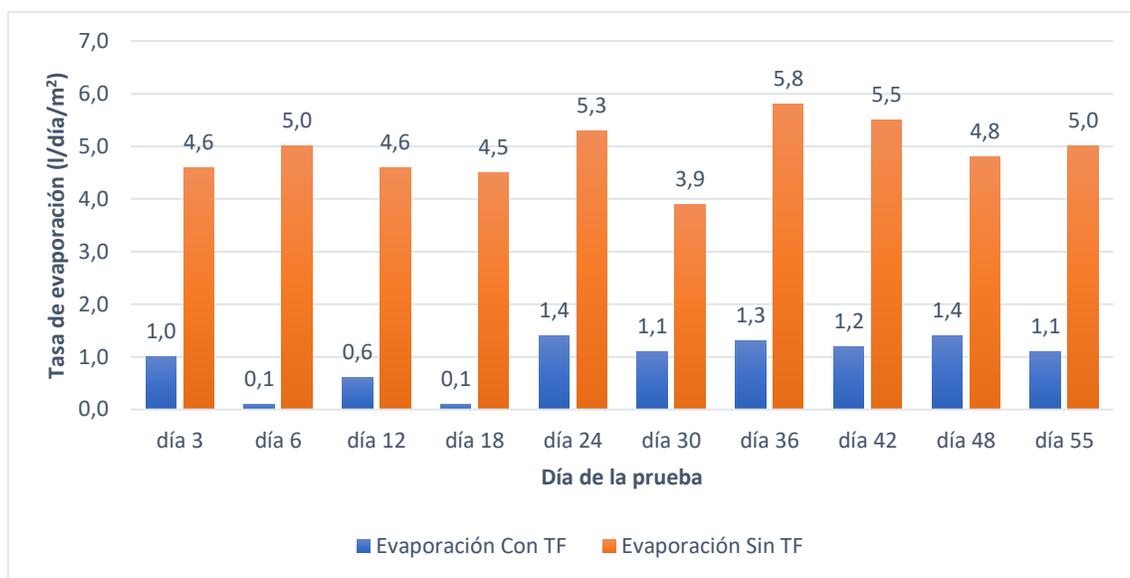


Figura 9: Grafico de tasa de evaporación en pruebas fuente: Codelco Radomiro Tomic

Como se observa en la figura, la tasa de evaporación en los módulos con thermo film en promedio alcanzan los 0,9 l/día/m<sup>2</sup>, versus una tasa de 4,9 l/día/m<sup>2</sup> en módulos sin thermo film. Así pues, menores tasas de evaporación reflejan una mejoría en el proceso de lixiviación.

Para poder estimar el porcentaje de ahorro se realiza el siguiente calculo:

- Evaporación SM 25-A (Sin Thermo film) =  $4,9 \text{ l/día.m}^2 \cdot 55 \text{ días} \cdot 18.000 \text{ m}^2 = 4.851 \text{ m}^3$
- Evaporación SM 25-B (Con Thermo film) =  $0,9 \text{ l/día.m}^2 \cdot 55 \text{ días} \cdot 18.000 \text{ m}^2 = 891 \text{ m}^3$

Al comparar los resultados, el ahorro por evaporación alcanza el 81,6%.

Otra variable que se mide en la prueba es la temperatura al interior de la pila. La importancia de esto es su relación con la generación de condiciones oxidantes para los sulfuros secundarios y el mejoramiento de la cinética de lixiviación.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 10 se observan los resultados de la temperatura en la prueba.

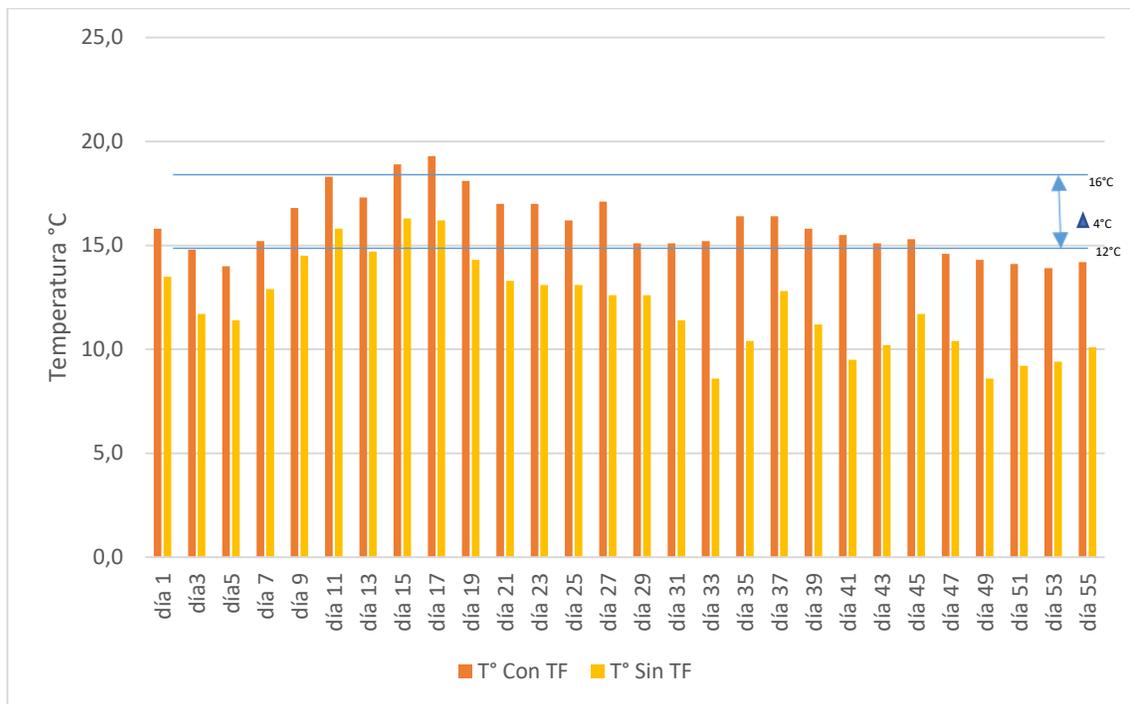


Figura 10: Resultados de la temperatura de las pruebas fuente: Codelco Radomiro Tomic

Como se aprecia en la Figura 10, existe una diferencia de temperatura al interior de la pila en promedio 4 °C mayor en el semi modulo con thermo film. La prueba se realiza durante el tiempo en que dura el ciclo de lixiviación.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la temperatura al interior de la pila, se deduce que es posible alcanzar 1% de recuperación adicional de cobre. Esto se compara con la medición de la recuperación de cobre obtenida por los módulos SM25A y SM25B una vez terminado su ciclo, obteniendo para el caso del SM25A un 66,1% recuperación y en el SM25B un 68,4% de recuperación.

Respecto a la implementación del thermo film, inicialmente se consideró el uso de un equipo minicargador a lo largo del semi módulo. A raíz de la irregularidad del terreno y, por ende, la posibilidad que el equipo se hundiera se debió sustituir por la instalación manual con personal. Esto generó un tiempo mayor al proyectado inicialmente.

Por otro lado, se subestimó la proyección de sujeción del thermo film con relación a la capacidad de soportar los fuertes vientos experimentados en la zona de prueba. No obstante, se tuvo que realizar pequeñas mejoras tales como, mayor afianzamiento de lo proyectado para garantizar la totalidad de impermeabilización de la zona de prueba. Adicionalmente, se colocó debajo del talud un pretil con material de lastre para evitar el ingreso de vientos entremedio de la pila y la carpeta, evitando el levantamiento por succión.

## 5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

El uso del thermo film en las pilas de lixiviación ha proporcionado importantes resultados iniciales en lo que se refiere al ahorro del recurso hídrico. En particular, la empleabilidad del plástico logra reducir hasta en un 81,6% el consumo de agua por el efecto de disminución de la evaporación. Adicionalmente, la instalación del thermo film sobre las pilas permite calentar el lecho bajo el film y con ello un aumento de recuperación de cobre en hasta 1%.

El próximo paso considerando lo anterior, es realizar una evaluación económica que determine la viabilidad de su implementación a nivel industrial.

### 5.1. CONSIDERACIONES

#### 5.1.1. TASA DE DESCUENTO

La tasa de descuento a utilizar corresponde a un 8%, valor que fue proporcionado por la Superintendencia de ingeniería y Control de Procesos Planta de División Radomiro Tomic.

#### 5.1.2. HORIZONTE DE EVALUACIÓN

El proyecto se evaluó considerando que su implementación se realizará a comienzos del año 2021 y que la planta de lixiviación y extracción por solventes estará operativa hasta el 2026.

La Tabla 3 muestra las orientaciones comerciales y de producción proyectadas por Codelco Radomiro Tomic, según el Plan de Negocio y Desarrollo (PND) del año 2020.

	2021	2022	2023	2024	2025	2026
% Recuperación PND	71,17	65,20	58,24	61,44	59,72	55,18
CuF (Ton) PND	178.391	178.728	155.461	208.497	201.874	145.315

Tabla 3: Orientaciones Comerciales Codelco Radomiro Tomic

### 5.1.3. INVERSIÓN

La inversión es de aproximadamente US\$2.600.000, de los cuales US\$2.300.000 corresponden a la adquisición de activos (thermo film, fijadores, etc.) y US\$ 300.000 corresponden a la instalación.

### 5.1.4. PRECIO DE VENTA DEL COBRE

El precio de venta del cobre fino corresponde al fijado por la Bolsa de Metales Londres (en inglés London Metal Exchange, LME). Estimaciones realizadas por el banco mundial del precio para el periodo 2021 – 2026.

	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Precio Cu (US\$/Ton)	6.900	6.834	6.856	6.834	6.945	6.790

Tabla 4: Orientaciones Comerciales Codelco Radomiro Tomic

### 5.1.5. AHORRO DE AGUA

La disminución de la pérdida de agua por el uso del thermo film para un 80% de la pila de lixiviación cubierta, corresponde a un 67%, es decir, 28,1 l/s. Del mismo modo, un ahorro máximo de agua significa un 82% con 35,2 l/s (Codelco, 2020).

## 5.2. ESTRUCTURA DE COSTOS

Los costos asociados a estas evaluaciones se dividen en costos fijos y variables. Acorde a la Tabla 5, se puede apreciar que en cuanto a los costos fijos relativos al proyecto se encuentran el contrato para la instalación y costo por manejo de residuos. Dentro de los costos variables, es posible de considerar los costos de insumos, en este caso costo del thermo film por área acorde a la producción. También se debe considerar el costo por el agua requerida por la producción. Además, existe un costo por la disposición del residuo en función del peso del thermo film utilizado. La relación peso thermo film por área es de 0,15 Kg/m<sup>2</sup>.

Estructura de costos		
Costos Variables	Valor	Unidad
Thermo film por m <sup>2</sup>	0,9	US\$/m <sup>2</sup>
Disposición residuo	3,2	UF/Ton
Agua desalada	5,7	US\$/m <sup>3</sup>
Costos Fijos	Valor	Unidad
Contrato	947.368	US\$/año
Traslado residuo	353.684	US\$/año

Tabla 5: Costos thermo film fuente: Codelco Radomiro Tomic

### 5.3. CASOS

Para este proyecto se realizan dos evaluaciones económicas. La primera considera sólo el efecto que logra el thermo film en el ahorro de agua y la segunda considera adicionalmente, el efecto que puede lograr en la recuperación de cobre.

#### 5.3.1. CASO I: SOLO AHORRO DE AGUA

La Tabla 6 presenta el flujo de caja del proyecto considerando ingresos sólo por la recuperación del recurso hídrico en las pilas. Los resultados indican que para una inversión de US\$2.600.000 y una tasa de descuento de 8%, el VAN obtenido es de US\$4.653.688 y un TIR no definida, por lo que el proyecto en este caso no sería rentable.

	Año						
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Inversión	-\$2.600.000						
Costos Fijos		-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368
Costos Variables		-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000
Ingresos	Agua	\$4.793.472	\$4.793.472	\$4.793.472	\$4.704.704	\$4.704.704	\$5.059.776
<b>Flujo de Caja</b>	<b>-\$2.600.000</b>	<b>-\$533.896</b>	<b>-\$533.896</b>	<b>-\$533.896</b>	<b>-\$622.664</b>	<b>-\$622.664</b>	<b>-\$267.592</b>
<b>VAN (US\$)</b>	<b>\$-4.653.688</b>						
<b>TIR</b>	<b>N/A</b>						
<b>PAYBACK</b>	<b>Nunca</b>						

Tabla 6: Evaluación económica Caso I; Solo ahorro de consumo de agua fresca

A pesar de los resultados expuestos, existe un elemento que no fue cuantificado en esta evaluación económica y que puede lograr revertir el VAN. Este es el efecto en las comunidades y la señal política medioambiental de la división. En otros términos, que el VAN resulte negativo al invertir en thermo film sólo por concepto ahorro de agua, no implica que no pueda ser atractivo de invertir. Se debería incorporar la variable antes mencionada “comunidad y sustentabilidad”. Cuantificar ese efecto amerita un análisis más acabado y que no lo considera el alcance de esta tesis.

#### 5.3.2. CASO II: AHORRO DE AGUA Y AUMENTO RECUPERACIÓN CU

El siguiente caso incorpora además del ahorro de agua como beneficio base, el aumento en la recuperación del cobre originado por el incremento de la temperatura al interior de la pila.

Para poder desarrollar la evaluación económica en este caso, se considera que la temperatura 4°C, tiene un efecto en la recuperación de cobre solo de 1% en el 25% de

altura del semi módulo. Dicho de otra manera, se considera aumentar la recuperación sólo hasta los 2,3 metros de altura del semi módulo, considerando que un SM tiene 9,5 metros de altura. La Tabla 7 muestra los parámetros adicionales requeridos para realizar los cálculos relativos a la recuperación del cobre en la evaluación económica.

Parámetros	Valor	Unidad
Incremento en T° interior de la pila	4	°C
Cantidad thermo film anual	4.866.667	m <sup>2</sup>
Aumento %R estimado	0,75	%
Tasa evaporación sin T.F.	4,9	l/día/m <sup>2</sup>
Tasa evaporación con T.F.	0,9	l/día/m <sup>2</sup>

Tabla 7: Parámetros Caso II

Los resultados obtenidos para este caso muestran la viabilidad de este proyecto. La Tabla 8 presenta el flujo de caja proyectado en donde el valor actual neto es positivo y por tanto se recomienda invertir en el proyecto de estas características.

	Año						
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Inversión	-\$2.600.000						
Costos Fijos		-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368
Costo Variables		-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000
Ingresos	Agua	\$4.793.472	\$4.793.472	\$4.793.472	\$4.793.472	\$4.793.472	\$4.793.472
	Rec. Cu	\$1.919.775	\$2.079.551	\$2.031.242	\$2.574.053	\$2.605.975	\$1.984.822
<b>Flujo de caja</b>	<b>-\$2.600.000</b>	<b>\$1.385.878</b>	<b>\$1.545.655</b>	<b>\$1.497.346</b>	<b>\$2.040.157</b>	<b>\$2.072.078</b>	<b>\$1.450.925</b>

<b>VAN (US\$)</b>	<b>4.649.202</b>
<b>TIR</b>	<b>56%</b>
<b>PR (Años)</b>	<b>1,8</b>

Tabla 8: Evaluación económica Caso II; Ahorro de consumo agua fresca y recuperación Cu

Además de este resultado económico, la inversión en esta tecnología destaca por el impacto positivo que trae a la comunidad dado la mejora en la gestión del agua utilizada en este proceso productivo.

## 5.4. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Para cuantificar y visualizar la sensibilidad del proyecto frente a variaciones de las variables más significativas, se realiza un análisis de sensibilidad mediante el software

de simulación Crystal Ball. La Tabla 9 muestra las variables y sus medias utilizadas en la simulación de Montecarlo para el caso II.

Medias	
Recuperación de cobre %	1,00
Precio Cu (US\$/Ton)	6.800
Agua, US\$/m <sup>3</sup>	5,7

Tabla 9: Variables simuladas

Los resultados obtenidos de la simulación muestran un VAN positivo con una TIR de 29% y un payback de 3,5 años (Tabla 10).

	Año						
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Inversión	-\$2.600.000						
Costos Fijos		-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368	-\$947.368
Costo Variables		-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000	-\$4.380.000
Ingresos		\$5.059.776	\$5.059.776	\$5.059.776	\$5.059.776	\$5.059.776	\$5.059.776
		\$383.955	\$831.820	\$1.218.745	\$2.059.243	\$2.605.975	\$2.381.786
<b>Flujo de caja</b>	<b>-\$2.600.000</b>	<b>\$116.363</b>	<b>\$564.228</b>	<b>\$951.153</b>	<b>\$1.791.650</b>	<b>\$2.338.382</b>	<b>\$2.114.194</b>
<b>VAN (US\$)</b>	<b>3.975.918</b>						
<b>TIR</b>	<b>29%</b>						
<b>PR (Años)</b>	<b>3,5</b>						

Tabla 10: VAN simulado

La Figura 11 muestra que tan sensible es el VAN respecto a cada uno de las variables mencionadas anteriormente y utilizadas en la simulación. Lo que más impacta en el VAN es el precio y la recuperación del cobre. Esto se sustenta en que el PND va decreciendo a lo largo del periodo de evaluación, salvo los años 2024 y 2025. Vale decir, al disminuir la producción se necesita que el precio del cobre se mantenga en la banda establecida en el PND al igual que la recuperación de cobre, con la salvedad que este último debe incrementar su recuperación en 1%.

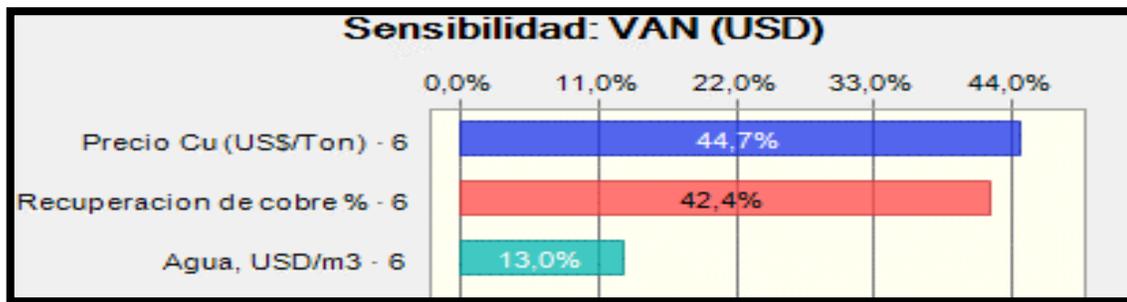


Figura 11: Sensibilidad del VAN

Se puede apreciar la distribución obtenida para la simulación en la Figura 12.

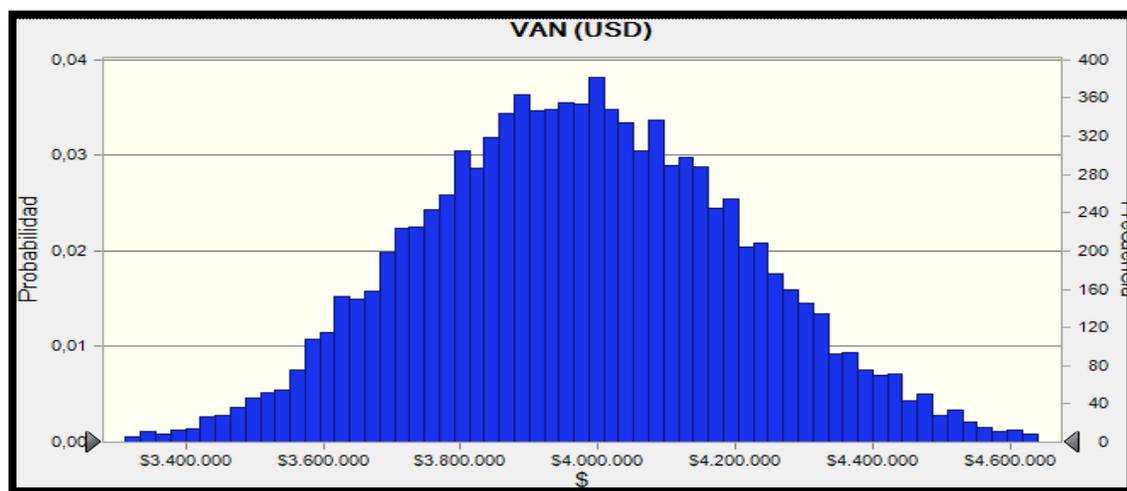


Figura 12: Distribución de la simulación

Como se observa en la figura, la distribución es normal, e indica que el VAN probable se mueve entre los 3,4 y los 4,6 millones de dólares. El proyecto se mantiene rentable frente a las diferentes variaciones de las variables. Así pues, si se evalúa un escenario en donde el porcentaje de recuperación del cobre disminuye a un 0,7%, el VAN resultante es cercano a 3,2 millones de dólares. El punto crítico de recuperación del cobre ocurre cuando el porcentaje se aproxima a un 0,38% haciendo que el VAN se vuelva cero.

Resumiendo, la evaluación económica ha validado la implementación del thermo film en las pilas de lixiviación a nivel industrial. Los resultados de rentabilidad obtenidos y su bajo nivel de riesgo dan cuenta de la factibilidad de esta alternativa.

## 6. RECOMENDACIONES

Los resultados técnicos y de operación obtenidos en la prueba del uso del thermo film en la pila de lixiviación primaria de la División Radomiro Tomic de Codelco, sugieren algunas consideraciones y desafíos para tener en cuenta en futuras instalaciones de estas soluciones del plástico impermeable.

En primer lugar, para asegurar la impermeabilización de la pila en su totalidad, es necesario verificar y adecuar las pendientes de los taludes con el fin de facilitar el ingreso de personal a cargo de la instalación.

Por otra parte, el viento juega un rol importante a la hora de instalar el thermo film. Esto porque el plástico puede ser desplazado por los vientos afectando su ubicación inicial y en consecuencia haciendo más complejo el amarre. Frente a esto, el método recomendado de instalación es realizar el despliegue del thermo film y su inmediata sujeción. Además, durante la instalación del plástico se requiere que los vientos no superen velocidades mayores a los 30 km/hr.

Del mismo modo, considerando que el thermo film es sometido en ocasiones a fuertes vientos en la zona norte del país (entre 80 y 100 Km/hr), se recomienda utilizar un thermo film de 180 micras de espesor. Con ello, no sólo será capaz de soportar las condiciones climáticas, sino que, además, permitirá un aumento más significativo de la temperatura del lecho y una posible reutilización de este.

Como desafío se vislumbra el uso y manejo de los desechos plásticos. Sí bien por un lado es capaz de mejorar una condición medio ambiental como es el uso del recurso hídrico y obtener mejores condiciones técnicas para los procesos mineros, su implementación genera residuos plásticos que deben ser manipulados y tratados con una política ambiental fuerte en cada faena minera.

## 7. CONCLUSIÓN

El objetivo fundamental de esta tesis fue evaluar la factibilidad técnica y económica del uso de Thermo film en el proceso de lixiviación de sulfuros. Específicamente, el trabajo abordó el uso del plástico en las pilas de lixiviación de la División Radomiro Tomic de Codelco.

La implementación del thermo film es una alternativa importante dentro de los compromisos de optimización de procesos e iniciativas ambientales de la División. Su ejecución permite reducir la evaporación de agua en las pilas, siendo esto último, uno de los focos de Codelco para la sustentabilidad de los recursos hídricos.

De acuerdo con los resultados técnicos obtenidos en las pruebas industriales efectuadas, se determina que hay una reducción en la tasa de evaporación de agua, alcanzando un ahorro de un 81,6%. Por otro lado, las pruebas industriales permitieron estimar una recuperación adicional de cobre de un 1% como resultado de las mejoras en las condiciones de temperatura al interior de las pilas de lixiviación.

Respecto a la evaluación económica realizada, los resultados obtenidos validan la implementación de esta alternativa considerando los ingresos generados por la recuperación tanto de agua como de cobre en el proceso hidrometalúrgico. Así, la inversión en thermo film alcanza rentabilidades positivas con un bajo nivel de riesgo. Específicamente, utilizando una tasa de descuento de un 8%, se obtuvo un VAN de \$4.649 millones. Las variables más sensibles en este proyecto son el precio del cobre y el porcentaje de recuperación de éste, sin embargo, dicha sensibilidad no consigue disminuir el VAN a valores negativos.

Finalmente, es importante mencionar el valor adicional que hay con la implementación de esta alternativa. El ahorro del recurso hídrico es fundamental en una minera ubicada en territorios desérticos y afectada por la creciente escasez del agua. Su importancia radica no sólo en la mayor eficiencia hídrica en sus operaciones, sino también, en el manejo responsable y adecuado del agua. Algo que, sin lugar a duda, es bastante significativo para los diversos sectores productivos y principalmente a la comunidad.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. ARAYA CORTÉS, C. ESPINOZA MARAMBIO, V. DUFEU SENOCIAIN, C. Reciclaje de Plástico thermo film por Ecofilm Company. Tesis para optar al grado de Magíster en Administración. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de economía y negocios.
2. BREALEY R. MYERS S. FRANKLIN A. 2015. Principios de finanzas corporativas. México, McGrawHill Education. 976p.
3. BURDICK, A., WILLIS, H., «Digital learning, digital scholarship and design thinking» Design Studies, 2011, vol. 32, no. 6, pp. 546-556, ISSN 0142-694X
4. CARDENAS F., DIAZ M., GUAGARDO C., OLIVA M., Lixiviación de materiales mediante pilas y bateas. Santiago, Universidad de Chile, Departamento de ingeniería en minas. 8 p.
5. CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA. 2015. La mega sequia 2010-2015 una lección para el futuro. Recuperado de: <http://www.cr2.cl/megasequia/>
6. COCHILCO. 2018. Consumo de agua en la minería del cobre 2017. Santiago, Ministerio de Minería.
7. DGA. 2017. Plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, región de Antofagasta. Realizado ARCADIS, S.I.T. N°379. Santiago, Ministerio de Obras Públicas.
8. INTRODUCCIÓN A LA HIDROMETALURGIA. Universidad de Atacama. 1 de junio, 2010.  
<http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/caceres/cursohidrometalurgia/Hidrometalurgia.pdf>
9. MARTINEZ BARRIOS, M. 2012. Calibración, validación y aplicación del modelo Heapsim para estimar la producción de cobre en los bronce y collahuasi. Memoria de Ingeniería Civil Química. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

10. PANTOJA CAMUS, D. 2016. Diseño de protocolo de gestión y planificación ambiental para servicios de inspección en faenas mineras. Magister en Gestión y Planificación Ambiental. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza.
11. PIZARRO CONTADOR, N. 2012, marzo. Agua recurso estratégico en Minería. [Diapositivas de PowerPoint].
12. REMONSELLEZ, F., GALLEGUILLOS, F., MORENO-PAZ, M., PARRO, V., ACOSTA, M., DEMERGASSO, C. 2009. Dynamic of active microorganisms inhabiting a bioleaching industrial heap of low-grade copper sulfide ore monitored by realtime PCR and oligonucleotide prokaryotic acidophile microarray. Microbiology and Biotechnology.
13. REDUCING WATER EVAPORACIÓN LOSSES IN MINERAL PROCESS. Authors: Yuri Zepeda Compañía Minera Glencore Lomas Bayas. Publicado en Seminario Internacional HydroCopper 2011.
14. SONAMI. 2017. Informe consumo de agua en minería 2017. Santiago, Sociedad Nacional de Minería.
15. VIANNA M. VIANNA Y. ADLER I. BRENDA L. BREATRIZ R. (2013). Design Thinking "Innovación en negocios". Brasil: MJ Press. 158p.
16. LEVENSPIEL O. 2004. Ingeniería de las reacciones químicas. Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Estado de Oregón. Editorial Reverté. Barcelona, España.
17. Franzmann P.D, Haddad C.M, Hawkes R.B, Robertson W.J., "Effects of temperature on the rates of iron and sulfur oxidation by selected bioleaching Bacteria and Archaea: Application of the Ratkowsky equation" Minerals Engineering, Volumen 18, Issues 13–14, Noviembre 2005, Paginas 1304-1314
18. Cordoba E.M., Muñoz J.A, Blázquez M.L, González F, Ballester A., "Passivation of chalcopyrite during its chemical leaching with ferric ion at 68 °C". Minerals Engineering. Volumen 22, Issue 3, febrero 2009, Pagina 229-235.

19. Dixon D.G, Nazari G., Dreisinger D.B., “Enhancing the kinetics of chalcopyrite leaching in the Galvanox™ process”. Hydrometallurgy. Volumen 105, Issue 3 – 4, Enero 2011. Paginas 251-258.
  
20. Demergasso C., Galleguillos P., Escudero L., Zepeda V., Castillo D., Casamayor E., “Molecular characterization of microbial populations in a low-grade copper ore bioleaching test heap” Hydrometallurgy. Volumen 80, Issue 4, diciembre 2005, paginas 241 – 253.

## 9. ANEXO A

FICHA TECNICA		
<i>Termofilm</i>		
CLIENTE	DRT	
CARACTERÍSTICAS DEL CMI	VALORES	UNIDADES
Espesor	180	micras
Ancho	6,0	metros
Largo	52	metros
Lastre Lateral	4 líneas sin emisor en ambos bordes	16 mm x 0.7 mm
Peso	56,5	kilogramos
Formato	Bobinas tipo Donuts	
Embalaje	Papel aluminizado- Film stretch	
Trazabilidad	Etiqueta de identificación en parte externa del embalaje e impresión.	
Transporte	Pallets de 1 x 1,2 mts	
Recomendaciones previas a uso	No golpear, arrastrar o rodar el producto. No exponer a fuego o chispas. Una vez retirada la cobertura protectora aluminizada, instalar a la brevedad. No dejar el producto enrollado bajo radiación directa del sol sin protección aluminizada	

Gerencia Plantas – Sup. Ing. y Control de Procesos Planta  
Febrero 2019

CARACTERÍSTICAS DEL FILM	VALOR	UNIDAD	TOLERANCIA/NORMA
<b>Espesor promedio</b>	140	micras	(+/-) 3 %
<b>Resistencia a la tracción DM</b>	> 9,0	kgf	Método ASTM882
<b>Resistencia a la tracción DT</b>	> 8,5	kgf	Método ASTM882
<b>Elongación DM</b>	> 650	%	Método ASTM882
<b>Elongación DT</b>	> 750	%	Método ASTM882
<b>Resistencia al punzonado</b>	> 9,5	kgf	DIN 51221-51302
<b>Elongación al punzonado</b>	> 5,5	Cm	DIN 51221-51302
<b>Estrés mecánico DM</b>	> 25	Mpa	Método ASTM882
<b>Estrés mecánico DT</b>	> 23	Mpa	Método ASTM882
<b>Aspecto</b>	Natural semi difuso		
<b>Durabilidad</b>	1 temporada solo contra radiación UV		
<b>Transmisión global de luz visible</b>	88 %		
<b>Retención Térmica</b>	75 %		
<b>Formulación</b>	Mezcla de polietilenos de baja densidad LDPE, LLDPE (100% virgen)		

Gerencia Plantas – Sup. Ing. y Control de Procesos Planta  
Febrero 2019