



Escuela de Negocios Mineros

Dirección de Postgrado

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE MINERALES OXIDADOS DE COBRE DE ALTA LEY, EN CIRCUITOS DINÁMICOS DE LIXIVIACIÓN Y SU COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO ALTERNATIVO

*Proyecto de tesis para optar al grado
académico de Magíster en Gestión Minera*

Profesor Guía: Andrés Reghezza.

Rodrigo Guerra Corrales

Verónica Salina Pinto

Cristian Varas Medalla

Antofagasta, Diciembre de 2013

Dedicatoria

A nuestras respectivas familias, apoyo permanente y fundamental en la conclusión de esta especialización y al desarrollo de este trabajo.

Agradecimientos

A Minera Esperanza, Minera El Tesoro, a Antofagasta Minerals y a la Universidad Católica del Norte por permitirnos llevar adelante esta experiencia de desarrollo.

A don Andrés Reghezza, por apoyarnos de cerca y con convicción en el desarrollo de este documento.

RESUMEN

La extracción y acumulación de minerales silicatados de alta ley (valores sobre 10%), desde el yacimiento Mirador, en operación desde Julio de 2011 en Minera El Tesoro (MET), generó la discusión respecto a la mejor forma de tratamiento de este recurso, dada la imposibilidad de tratarlo en el circuito convencional de lixiviación, en forma eficiente.

Fueron analizadas técnicamente la fundición directa, la lixiviación por agitación y la lixiviación en pila dinámica de estos minerales, siendo únicamente la lixiviación en pila dinámica optimizada, en etapas, la única alternativa posible de ejecutar en minera El Tesoro, con posibilidad de éxito operacional.

Los principales resultados obtenidos de este estudio, fueron los siguientes:

- De las posibilidades analizadas como alternativa de tratamiento, lixiviación por agitación, fundición directa del mineral y lixiviación en pila dinámica, dada la característica silicatada de estos materiales, solamente es posible realizar el tratamiento en pila dinámica, como única alternativa de tratamiento de los minerales de alta ley provenientes del yacimiento Mirador en Minera El Tesoro.
- La lixiviación en pila dinámica, no podría ser realizada en una etapa, dada las dosis prohibitivas de ácido a nivel industrial, que deberían ser inyectadas en el tambor aglomerador, sólo por cálculo estequiométrico. Por lo anterior, la lixiviación dinámica necesariamente debiera ser realizada en etapas. Esto, a través de una secuencia de detención, embebido o macerado ácido, reposo y nueva puesta en servicio.
- Las pruebas de lixiviación arrojaron que el mecanismo controlante de la reacción es el paso de ácido sulfúrico a través del lecho de mineral. Desde este punto de vista, la optimización del proceso apunta a lograr la mayor razón de

lixiviación posible en el circuito de lixiviación dinámico. Para ellos debieron ser ajustadas la altura del lecho, la concentración de ácido en el refino y disminuir al máximo la alimentación de mineral al tambor aglomerador, de tal manera de lograr la máxima dosis de ácido que los sistemas de inyección que permitan los actuales equipos.

- Las prueba a nivel industrial, arrojan una recuperación de cobre de 78% para el tratamiento de minerales de alta ley puro, con una ley alimentada a proceso de 10%; con un consumo de ácido de 31,4 kg/TMS. Dejando en los ripios del material de salida, una ley de cobre total de 2,27%. Lo anterior, logrando una razón de lixiviación de 3,9 m³/TMS, que equivale a 2,2 veces la razón de lixiviación del material tratado usualmente en las pilas dinámicas de Minera El Tesoro.
- Las prueba a nivel industrial, arrojan una recuperación de cobre de 85% para el tratamiento de minerales de alta ley en mezclas, con una ley de cabeza de 5% de cobre total, con un consumo de ácido de 48 kg/TMS. Dejando en los ripios del material de salida, una ley de cobre total de 0,72%. Lo anterior, logrando una razón de lixiviación de 4,7 m³/TMS, que equivale a 2,9 veces la razón de lixiviación del material tratado usualmente en las pilas dinámicas de Minera El Tesoro.
- La evaluación económica indica que existe una importante ventaja en tratar los minerales en mezcla, diluyéndolos hasta un 5% de ley de cobre total, entregando un ripio de ley 0,72%, que aún es posible de reprocesar y lograr mejorar aún más el beneficio obtenido.
- El tratamiento de los minerales puros, no presenta una ventaja importante, a nivel económico, respecto a lo que sería el tratamiento en mezcla con materiales de dilución, alcanzando leyes habituales de alimentación, del orden de 1,5% de ley de cobre total. Eso sí, el ripio generado de los materiales de alta ley, poseería

una ley aún atractiva, del orden de 2%, que entregaría una importante ventaja, respecto a la mezcla anteriormente mencionada.

- Bajo estos criterios, la forma óptima de tratamiento de los minerales de alta ley, en el circuito de lixiviación actual de Minera El Tesoro, sería la mezcla con materiales de dilución hasta alcanzar un 5% de ley, cargados a una altura de 1 m., con la máxima dosis de ácido en el tambor aglomerador, que los sistemas de inyección permitan y con el riego con refino enriquecido en ácido y un ciclo de detención, macerado ácido, reposo y puesta en servicio. Esto permitiría además, recuperar mineral de baja ley, que hoy no es competitivo con el mineral alimentado regularmente a proceso.

- Dado que el tratamiento se realizaría siempre al interior de faena, no existirían interferencias externas, por lo que, las evaluaciones de impacto social no fueron desarrolladas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO I: TRATAMIENTO DE MINERALES OXIDADOS POR LIXIVIACIÓN EN MINERA EL TESORO.....	14
1.1. Entorno del planteamiento	14
1.2. Operación en Minera El Tesoro	16
1.2.1. Operación de planta hidrometalúrgica de Minera El Tesoro	21
1.3. Química del cobre y técnicas de Lixiviación.....	27
CAPÍTULO II: ANÁLISIS TEÓRICO DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA MINERALES SILICATADOS DE ALTA LEY.....	35
2.1. Minerales silicatados de cobre y su reacción en ácido	35
2.2. Alternativa de tratamiento de minerales silicatados de alta Ley	39
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE PLAN EXPERIMENTAL DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN PARA MINERALES DE ALTA LEY.....	46
3.1. Desarrollo de plan experimental a nivel de laboratorio	46
3.1.1. Plan Experimental Exploratorio Tesoro.....	46
3.1.2. Plan Experimental Optimización.....	51
CAPÍTULO IV: CARGA DE MÓDULOS INDUSTRIALES DE ALTA LEY.....	53
CAPÍTULO V: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE TRATAMIENTO OPTIMIZADO DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ALTA LEY EN MEZCLA.....	62
4.1. Parámetros para evaluación.....	62
CONCLUSIONES.....	65
REFERENCIAS BIBLIGRÁFICAS.....	68

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

Figura 1: Metodología de Trabajo.....	13
Figura 2: Ubicación geográfica de Minera El Tesoro.....	17
Figura 3: Producción anual de cátodos de Minera El Tesoro.....	19
Figura 4: Procesamiento de mineral y leyes promedios anual de Minera El Tesoro.....	19
Figura 5: Producción anual de cátodos, Caso Base 2013 - Minera El Tesoro.....	20
Figura 6: Procesamiento de mineral y leyes promedios anual de Minera El Tesoro, de acuerdo a caso base 2013.....	20
Figura 7: Planta de Chancado – Aglomerado Minera El Tesoro.....	22
Figura 8: Puente apilador - Minera El Tesoro.....	23
Figura 9: Pila dinámica de Lixiviación – Minera El Tesoro.....	24
Figura 10: Esquema de operación de un tren Planta SX – Minera El Tesoro.....	25
Figura 11: Nave de EW – Minera El Tesoro.....	26
Figura 12: Descripción gráfica simple del proceso de recuperación de cobre vía hidrometalurgia.....	30
Figura 13: Gráfico Energía de Gibbs v/s Temperatura para especies silicatadas.....	40
Figura 14: Solubilidad del cobre en soluciones acuosas ácidas, a diferentes condiciones de temperatura.....	41
Figura 15: Esquema de Operación de Lixiviación en n Etapas.....	45
Figura 16: Extracción de cobre respecto al tiempo, pruebas de lixiviación en columnas de 8 pulgadas.....	50
Figura 17: Extracción de cobre respecto a la razón de lixiviación, pruebas de lixiviación en columnas de 8 pulgadas.....	50
Figura 18: Extracción de cobre respecto al consumo bruto de ácido, pruebas de lixiviación en columnas de 8 pulgadas.....	50
Figura 19: Extracción de cobre respecto a la razón de lixiviación, módulos industriales 4446E (alta ley).....	61
Figura 20: Extracción de cobre respecto a la razón de lixiviación, módulos industriales 4447A (mezcla alta ley Marginal Esperanza).....	61

Figura 21: Extracción de cobre respecto a la razón de lixiviación, módulos industriales 4447B (mezcla alta ley marginal mirador).....	61
Tabla 1.1: Reservas de Minerales Alta Ley in situ y en stock	16
Tabla 1.2: Sales de cobre más comunes y su solubilidad en ácido e ión férrico en solución.....	28
Tabla 1.3: Comparación simplificada de los distintos métodos de lixiviación en su aplicación en la hidrometalurgia del cobre.....	34
Tabla 2.1 Caracterización química de minerales silicatados	38
Tabla 3.1: Pruebas de sulfatación, condiciones de carga y resultados obtenidos.....	48
Tabla 3.2: Pruebas de Lixiviación en Columnas de 8”, condiciones de carga y resultados obtenidos	49
Tabla 3.3: Pruebas de Lixiviación en Columnas de 8”, condiciones de carga y resultados obtenidos para set optimizado.....	52
Tabla 3.4: Pruebas de Lixiviación en módulos industriales, condiciones de carga.....	54
Tabla 3.5: Pruebas de Lixiviación en módulos industriales, condiciones de operación..	56
Tabla 3.6: Pruebas de Lixiviación en módulos industriales, Resultados finales prueba..	59
Tabla 3.7: Pruebas de Lixiviación en módulos industriales, Cierre de Pruebas por sólidos.....	60
Tabla 4.1: Parámetros para evaluación económica. Corresponden a una ponderación entre los índices obtenidos por minera El Tesoro, entre los meses de Marzo y Septiembre de 2013.....	63
Tabla 4.2: Evaluación económica Para minerales de alta ley en mezcla, para leyes de 1,5%, 5% y tratados en forma pura.....	64

INTRODUCCIÓN

A partir de Julio del año 2011, se inició en Minera El Tesoro, el tratamiento de minerales desde el Yacimiento Mirador. Este yacimiento, a diferencia de los yacimientos que hasta la fecha alimentaba la planta de proceso de la empresa (rajo Tesoro, rajo Tesoro Noreste), corresponde a un yacimiento skarn – pórfido, con materiales con característica de roca, en vez de características de grava, como los que se trataron desde el inicio de la operación.

Esta variación en la fuente de alimentación provocó un importante cambio en la cultura del tratamiento de los minerales, partiendo por la especie mineralógica contenida (Crisocolas y óxidos negros predominantes en los yacimientos de Mirador, por sobre atacamita de los minerales desde los yacimientos de Tesoro), la dureza del material procesado, parámetros asociados a granulometría, consumo de ácido y razones de lixiviación. Este cambio en las variables, trajo asociado una importante cantidad de cambios en el tratamiento del mineral, en un período de ajuste que tardo alrededor de 6 meses.

Mientras se avanzaba en la explotación de yacimiento Mirador, fueron apareciendo frentes de alta ley y muy alta ley; valores por sobre 10% de contenido de cobre total. Ante este hallazgo, inesperado dentro de los programas y modelos de bloques geológicos existentes, no se contaba con una logística para el tratamiento de materiales con este nivel de leyes, por lo que, estos fueron almacenándose, mientras se buscaba una solución para su tratamiento. La acumulación de este stock superó, luego de un año de operación, las 200.000 toneladas, con leyes de cobre total por sobre 10%, compuestos principalmente de crisocola, lo que genera un stock de cobre fino de más de 20.000 toneladas, equivalente a casi 2 meses de alimentación, suficiente para mantener por un período similar la producción de cátodos, de acuerdo a presupuesto.

En la operación actual de Minera El Tesoro no existe tecnología implementada para lograr una recuperación eficiente de este recurso, siendo lo más cercano, el tratamiento por mezclas, lo cual trae asociado así, la dificultad de altos valores de variabilidad, producto de una baja homogenización de los recursos alimentados y que atenta contra un rendimiento de recuperación de lixiviación óptimo, además de generar la posibilidad de productos en abandono aún con altos contenidos de cobre, lo que generaría una inmensa pérdida de oportunidad de este recurso.

Ante esta problemática, surgen las consultas: ¿Es posible lograr un rendimiento óptimo de la lixiviación con el circuito y tecnología actual de tratamiento? ¿Existen tratamientos distintos a la lixiviación, que logren un mayor rendimiento económico de estos minerales? ¿Son sustentables estas alternativas de tratamiento?

Con ello, el objetivo general de este trabajo consiste en evaluar y proponer una metodología de tratamiento de este mineral de alta ley, que permita obtener la máxima rentabilidad de este recurso, por medio del equilibrio de la mayor extracción de cobre, con los recursos empleados en esta operación, de manera sustentable y respetando los criterios y políticas de responsabilidad social, cuidado medioambiental y estrategia de Minera El Tesoro.

Para esto, se debe cumplir con los siguientes objetivos específicos:

1. Optimizar el actual proceso de lixiviación de Minera El Tesoro, de tal modo que, por medio del ajuste de parámetros, el tratamiento de minerales de alta ley logre un rendimiento óptimo, respecto a lo que sería el uso de la tecnología convencional.
2. Estudiar tratamientos alternativos a la lixiviación. Determinar las ventajas y desventajas de estos tratamientos y evaluar conceptualmente el uso de estos, ya sea dentro o fuera de Minera el Tesoro.
3. Evaluar económicamente el mejor tratamiento logrado en lixiviación, contra las alternativas estudiadas.

4. Complementar el criterio económico con las políticas de sustentabilidad, responsabilidad social, cuidado medioambiental y estrategias de Minera El Tesoro y proponer el mejor tratamiento, desde la visión global.

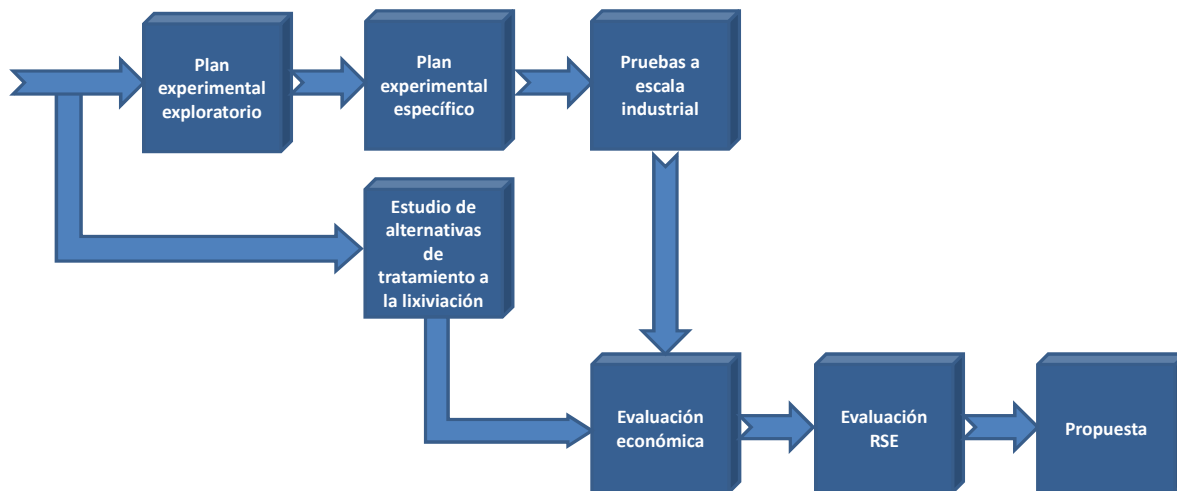
Para el cumplimiento de cada uno de estos objetivos, la metodología empleada consistirá en los siguientes pasos:

Desarrollar un Plan Experimental exploratorio, que permita determinar los valores de recuperación y consumo de ácido del recurso mineral de alta ley, bajo los mismos parámetros de la operación convencional de la planta de procesos. Para ello, se desarrollará un set de pruebas en columnas unitarias de lixiviación, que conservarán, dentro de su escala, los parámetros de la lixiviación semindustrial.

Desarrollar un segundo Plan Experimental Específico, en el que se realice un ajuste de los parámetros de lixiviación, de acuerdo a los datos entregados por el primer plan experimental, que permitan mejorar los valores exploratorios, principalmente asociados a la recuperación de cobre desde este recurso. Esto se realizará también a través de estudios de columnas de lixiviación.

Conocido el resultado de las pruebas anteriores, aquella combinación de parámetros que entreguen los mejores valores de recuperación, serán escalados a una prueba industrial, en la cual se validarán los valores obtenidos. Los resultados de esta prueba serán considerados como el primer punto de referencia para la evaluación final. Sobre estos resultados, será realizada la primera evaluación económica, que será utilizada como la referencia a superar por los tratamientos alternativos que serán explorados.

Estudiar métodos alternativos a la lixiviación dinámica. Para ello, se deberá realizar consulta bibliográfica, consultas a especialistas y visitas a terrenos a faenas que posean procesos de tratamiento para minerales de características similares. Se deberá lograr conciliar, a través de benchmarking, una unidad económica que sea comparable al tratamiento por lixiviación dinámica. Además, deberán evaluarse los impactos del uso o implementación de estas tecnologías (ya sea por arriendo o por venta de los minerales) sobre el proceso y las políticas de sustentabilidad que rigen a Minera El Tesoro.

Figura 1: Metodología de Trabajo

Como se muestra en la Figura 1, el trabajo comenzará con los pilotajes exploratorios y específico. Simultáneamente serán estudiadas alternativas de tratamiento a través de consulta experta y bibliográfica.

Se realizará un pilotaje a nivel industrial y posteriormente una evaluación económica, cerrando el proceso con una evaluación de RSE, si se decide como mejor alternativa los tratamientos externos a Minera El Tesoro. El proceso se cierra con la entrega de una propuesta.

CAPÍTULO I: TRATAMIENTO DE MINERALES OXIDADOS POR LIXIVIACIÓN EN MINERA EL TESORO

1.1. Entorno del planteamiento

Minera El Tesoro es una empresa dedicada a la exploración, explotación y tratamiento de minerales oxidados de cobre. Posee un sistema de tratamiento de mineral por proceso hidrometalúrgico, con lo que los minerales son lixiviados en medio ácido para generar, como producto final, cátodos de cobre de alta pureza y calidad.

Dentro del programa de desarrollo y sustentabilidad de Minera El Tesoro, se considera la explotación de diferentes rajos de menas oxidadas, de acuerdo a un programa de alimentación, contenido en su caso base, que favorece el beneficio de aquellos que permitan copar la capacidad de la planta de procesos y generen el mayor retorno económico, bajo estrictos criterios de sustentabilidad.

La misión de Minera El Tesoro (2011) es:

Desarrollar y Gestionar negocios mineros que creen valor para los accionistas, el medioambiente y la sociedad, convirtiéndose en el año 2015 en el principal operador de recursos lixiviables del distrito de Sierra Gorda, a través de la consolidación de un gran Centro Minero Metalúrgico.(p. 14)

Bajo este esquema, Minera El Tesoro acepta el desafío de tratar en sus instalaciones, los diferentes minerales alimentados, desde los distintos yacimientos que conforman el distrito minero en el que se encuentra inserto.

A partir de Julio del año 2011, se inició en Minera El Tesoro, el tratamiento de mineral desde el yacimiento Tesoro Mirador. Este mineral, a diferencia de los anteriores asociados a minerales exóticos, corresponde a un depósito mixto (pórfido y skarn) principalmente con crisocolas y óxidos negros. De acuerdo a (Reghezza, 2012b, p.10), estas especies, donde predomina el silicato, tienen una característica refractaria, es decir, son de difícil y lenta solubilidad en ácido sulfúrico. En busca de optimizar el proceso, ha sido necesario realizar algunos ajustes en el proceso convencional de lixiviación en pila

dinámica, cuya perturbación más importante corresponde al aumento en la razón de riego y en los tiempos de lixiviación de 1,9 a 2,6 m³/ton mineral seco lixiviada y de 35 a aproximadamente 45 días de riego en pulsos (es decir, 90 días de riego efectivo).

Este mineral, a diferencia de los tratados anteriormente en la operación de Minera El Tesoro, se caracteriza por poseer altos contenidos de cobre, los cuales deben ser mezclados, para su dilución y posterior tratamiento en pila dinámica, por los métodos convencionales corregidos (mencionados anteriormente).

Durante la explotación del yacimiento Mirador, se han encontrados frentes de muy alta ley, las que son acumuladas, dada la imposibilidad operativa y eficiente de mezclarlos (pues sería proporciones muy altas de mezcla, del orden de 1:10). Se ha acumulado al cierre del año 2012, 206.000 toneladas que fluctúan entre leyes de 11% hasta 15% de cobre total.

Este Recurso representa un potencial de más de 26.000 toneladas de cobre fino, los que, a una recuperación de 70%, implican un potencial de recursos recuperables de 20.000 toneladas de cobre, equivalentes a dos meses de producción nominal, con sólo un 30% del mineral tratado (lo habitual es por sobre 600.000 toneladas tratadas por mes, para conseguir un aporte de cobre cercano a las 10.000 toneladas).

Como se mencionó anteriormente, la combinación de lenta solubilización en ácido que poseen los minerales silicatados originarios del yacimiento Mirador, sumado al alto contenido de cobre de los mismos, harían impracticable un tratamiento eficiente de este recurso en el actual circuito de lixiviación, arrojando una baja recuperación y un ripio con aún un contenido muy alto en cobre (véase Tabla 1.1).

Tabla 1.1: Reservas de Minerales Alta Ley in situ y en stock

	Mineral Alta Ley (>10% CuT) Presupuesto 2013 (In situ)				
Banco	Tonelaje	CuT	CuS	CO3	Humedad
2197	31.145	11,11	10,75	1,42	7,98
2197	4.893	10,56	10,26	1,87	7,98
2190	21.329	11,73	11,27	1,12	8,32
Total	57.367	11,29	10,91	1,35	8,1

	Mineral Alta Ley (>10% CuT) Al 27 Diciembre (In situ)				
ORIGEN	TMS	CuT	CuS	CO3	Humedad
f1m220503	1.753	10,22	9,97		
Total	1.753	10,22	9,97		

	Mineral Alta Ley (>10% CuT) en Stock (MODULO I)				
Resumen	Tonelaje	CuT	CuS	CO3	Humedad
zona 1	20.781	15,29	11,23	1,22	7,87
zona 2	73.698	14,28	10,90	0,37	7,12
zona 3	27.630	13,91	12,13	0,52	9,98
T-F1-2205-05B	2.373	11,15	10,88	0,83	11,10
T-F1-2205-06B	12.542	11,58	11,26	0,62	9,56
T-F1-2205-B-oxc	8.833	11,08	10,77	0,56	9,44
T-F1-2205-05-E-oxc	1.495	11,88	11,62	0,83	11,1
Total	147.352	13,86	11,21	0,56	8,21

TOTAL GLOBAL	206.473	13,11	11,12
---------------------	----------------	--------------	--------------

Se busca con este estudio, lograr, ya sea por lixiviación u otra tecnología de extracción, obtener el máximo retorno de este mineral, a través de un criterio económico, pero también un criterio de sustentabilidad, en el cual se respeten criterios de seguridad, medio ambiente y responsabilidad social.

1.2. Operación en Minera El Tesoro

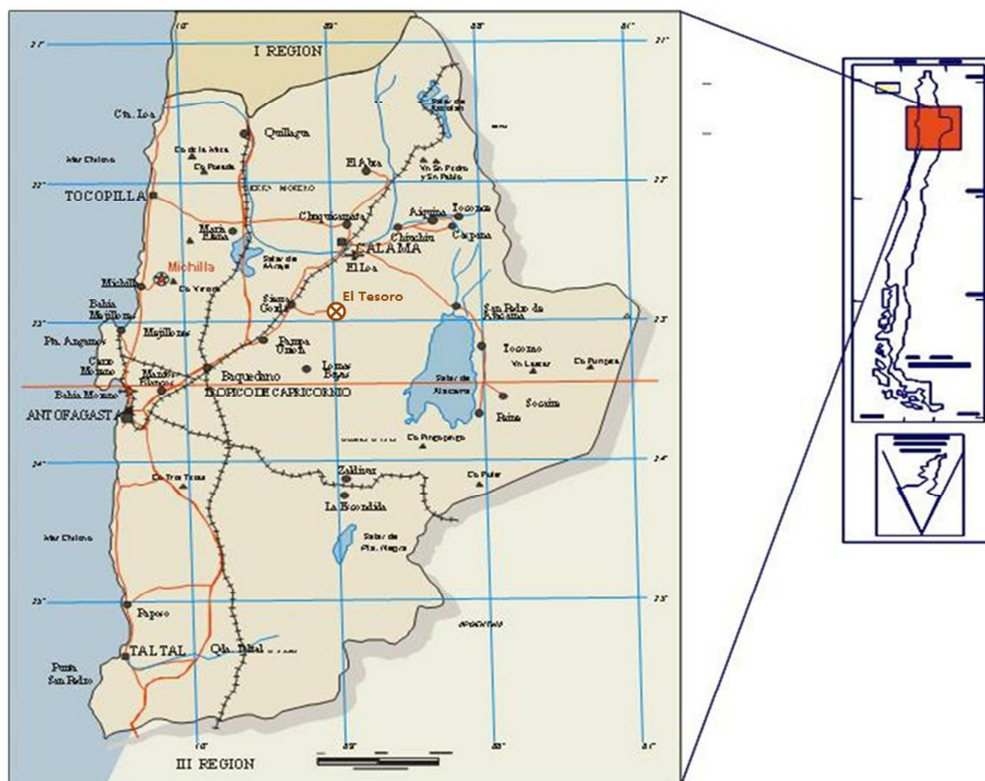
Minera El Tesoro forma parte del grupo minero Antofagasta Minerals S.A (AMSA), compañía productora de cobre que se encuentra entre las de más alto crecimiento a nivel mundial. Las operaciones de este grupo minero se encuentran compuesto por Minera Los Pelambre, localizada en la IV región y Minera El Tesoro, Minera Michilla y Minera

Esperanza, ubicadas en la región de Antofagasta. También en esta región se encuentra ubicada Minera Antucoya, proyecto que espera iniciar sus operaciones a partir del año 2015 (Minera El Tesoro, 2012).

La propiedad de Minera El Tesoro se encuentra constituida en un 70% por Antofagasta Minerals S.A., perteneciente a Antofagasta PLC y en un 30% a la firma japonesa Marubeni Corporation.

El yacimiento de Minera El Tesoro se encuentra ubicado en la Segunda Región (véase Figura 2), a 22 km al este de Sierra Gorda y a 2.300 msnm. La mina se encuentra a 162 km al noreste de la ciudad de Antofagasta por la ruta 25 y a 91 km al suroeste de la ciudad de Calama por la misma ruta.

Figura 2: Ubicación geográfica de Minera El Tesoro



Las temperaturas oscilan entre 0° y $33,5^{\circ}$ centígrados. Excepcionalmente se superan esos límites entre 1 a 3 grados.

Las direcciones predominantes del viento son norte y noroeste en el invierno y suroeste (29,7%) y noreste (21,9%) en el verano. Se observa una clara tendencia a un aumento de las velocidades del viento a partir del mediodía, para declinar en horas de la noche. Las velocidades promedio son de 2,8 metros por segundo, siendo las velocidades máximas del orden de 40 kilómetros por hora.

Desde el año 2001, la alimentación y beneficio de minerales, se sustenta a partir del yacimiento Tesoro Central, mineral de característica exótico, con contenido de gravas de característica arcillosa y alto contenido de finos bajo malla # 100 Tyler. El cobre es contenido principalmente en sales de atacamita y óxidos negros, asociados a manganeso. A partir del año 2009 se inicia casi en forma simultánea, la explotación y beneficio de minerales del yacimiento Tesoro Noreste, de similares características a Tesoro Central y el beneficio de minerales oxidados del yacimiento Esperanza, correspondiente al pre-stripping de la mina de sulfuros que alimenta actualmente a Mina Esperanza.

A partir del año 2011, se integra un cuarto yacimiento, que corresponde al rajo Mirador, yacimiento diametralmente distinto a los explotados hasta la fecha, siendo un yacimiento de características skarn – pórfido mineralizado en roca, con altos contenidos de cobre, con mayor dureza y cuyo contenido de cobre se encuentra en minerales de crisocola y óxidos negros, con una menor proporción de óxidos verdes, principalmente atacamita.

El área mina es explotada en modalidad rajo abierto y comprende tres yacimientos: Tesoro Central, Tesoro Noreste y Mirador. La capacidad anual de material es del orden de 70 millones de toneladas, a una razón lastre de mineral de 4,6.

Las dimensiones del rajo final de la explotación son de aproximadamente 1,6 kilómetros de largo, por 1,5 kilómetros de ancho y hasta 250 metros de profundidad.

La explotación es en bancos de 7,5 metros de mineral y 15 metros en lastre para la pala eléctrica. El ángulo de cara al banco es de 75° con pre-corte y ángulo inter-rampa de 62°, para obtener un ángulo global de 55°, con rampa de 30 metros.

El mineral explotado es transportado hacia la plataforma de chancado, canchas de acopio, stock de tránsito o tortas para su posterior alimentación a la planta de chancado.

La incorporación del mineral de Mirador, permitió alcanzar durante el año 2012, la mayor producción histórica de Minera El Tesoro (véase Figura 3 y Figura 4), superando las 105.000 toneladas de cobre fino en cátodos. En Mayo de ese mismo año, se logró alcanzar el millón de toneladas de cobre fino en cátodos producida por la empresa.

Figura 3: Producción anual de cátodos de Minera El Tesoro

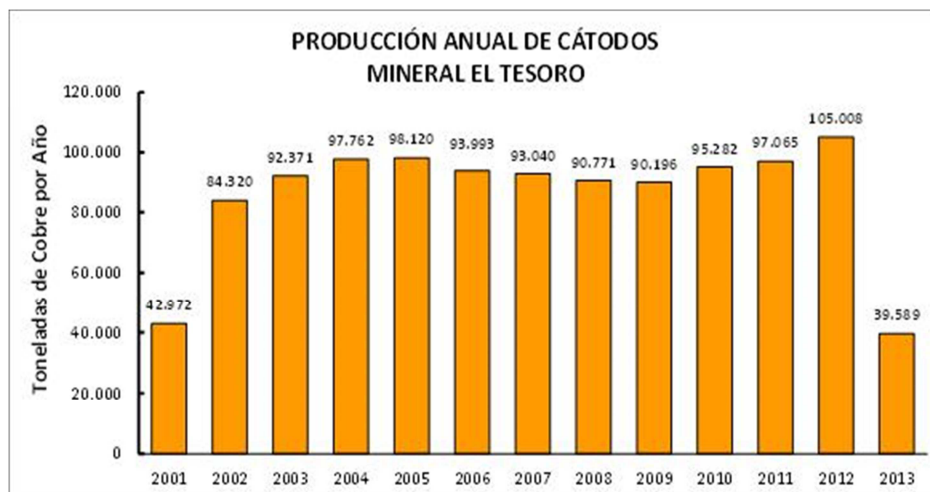
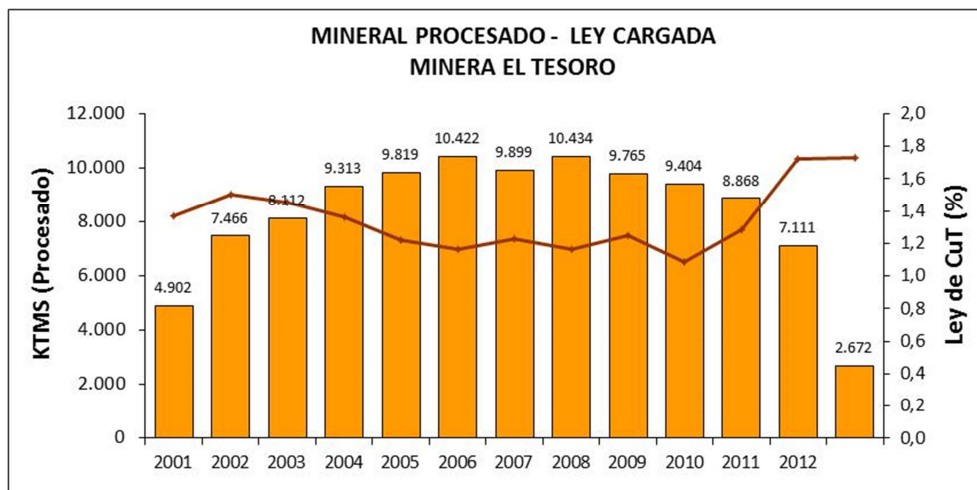


Figura 4: Procesamiento de mineral y leyes promedios anual de Minera El Tesoro



La vida útil de Minera El Tesoro, de acuerdo a su caso base 2013, se extiende con producción hasta el año 2023, produciéndose una disminución importante en la producción

de cátodos a partir del año 2015, dado un escenario de minerales beneficiados con menores contenidos de cobre (véase Figura 5 y Figura 6).

Figura 5: Producción anual de cátodos, Caso Base 2013 - Minera El Tesoro

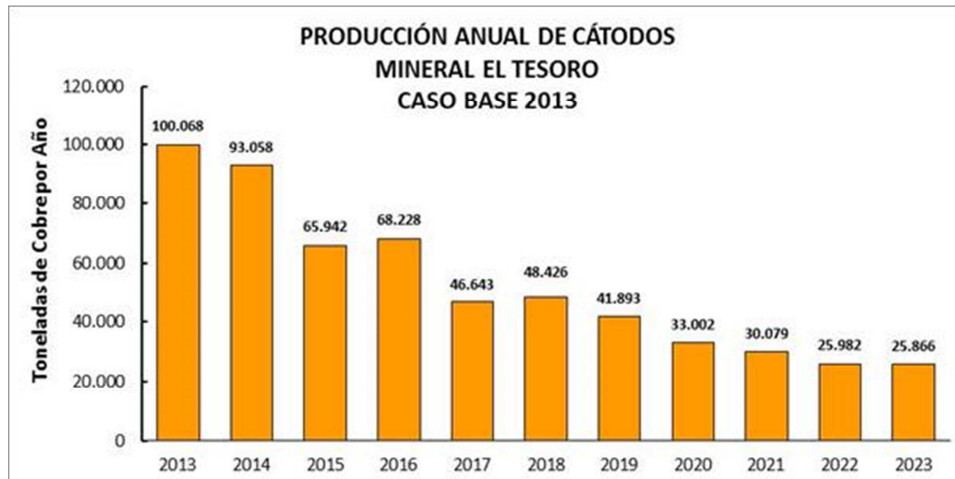
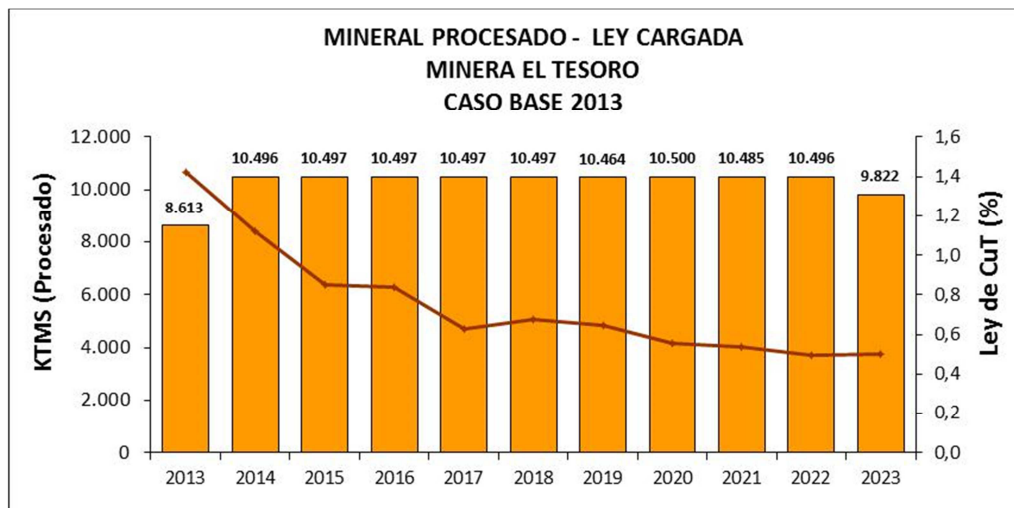


Figura 6: Procesamiento de mineral y leyes promedios anual de Minera El Tesoro, de acuerdo a Caso Base 2013



Existen alternativas a partir del año 2016 para copar capacidad de planta, estando entre las principales el tratamiento de ripios, el tratamiento de minerales desde Mirador NW

(yacimiento contiguo a Mirador), pero principalmente el proyecto Encuentro, el cual consiste en una planta de chancado lixiviación, que se ubicará a 30 km de Minera El Tesoro y que suministrará 55.000 toneladas por año, a través de soluciones ricas de pila dinámica y pila ROM (PLS).

1.2.1. Operación de planta hidrometalúrgica de Minera El Tesoro

El mineral es alimentado a la planta de procesos, vía la descarga directa de camiones sobre la tolva del chancado primario. No obstante, a partir del segundo semestre del año 2012, la alimentación de mineral a planta se realiza a través del sistema de tortas. Esto consiste en la construcción de plataformas de distinta altura, una sobre otra, de acuerdo al contenido de cobre del mineral, de tal manera de ponderar una ley óptima para su alimentación. Este sistema ha dado gran regularidad a la alimentación de mineral a la planta de chancado, permitiendo un producto uniforme, de baja variabilidad de las leyes de cobre, lo que optimiza su recuperación y consumo de ácido al momento de la extracción en el circuito de lixiviación.

Lo usual, es usar de 2 a 4 plataformas u hojas, para la conformación de estas tortas, con un contenido promedio de 100.000 toneladas, cada una.

La planta de chancado (véase Figura 7) posee un circuito primario de reducción, compuesto por chancador modelo Svedala, 50-Superior MK-II Gyratory, 50 pulgadas abertura alimentación, con giro de 178 RPM. Su capacidad nominal es de 1.600 ton/H y la capacidad de diseño de 2.000 ton/H; un domo de traspaso, que corresponde a un edificio estructural cerrado, con capacidad viva de 6.850 toneladas. Su diámetro es de 53 metros y una altura de 20 m. El domo descarga hacia 4 alimentadores de correa de velocidad variable.

Posee además un circuito de chancado fino, compuesto por un circuito secundario de chancado, que posee harneros Scalpers de 2.400x7.315 mm y chancadores modelo SvedaladHP700SX 54 Pulgadas y un circuito terciario compuesto por harneros Nordberg 2.400x7.320 y chancadores Nordberg modelo MP 800 short head.

Este circuito se completa con un sistema de correas transportadoras, que trasladan los productos triturados de un equipo a otro. La planta puede recibir tamaños de hasta 48 pulgadas y entrega a la salida un producto de 95% bajo malla $\frac{3}{4}$ de pulgada, a un rendimiento que fluctúa entre 1.300 (minerales de mayor dureza) hasta 1.700 toneladas de mineral seco por hora.

El circuito se completa con una torre de muestreo y cortador de muestra que entrega un incremento de aproximadamente 4 kilos cada 10 minutos, lo que permite acumular muestras para análisis de cobre total, cobre soluble, carbonato, nitrato y humedad, entre lo más importante. La muestra se acumula cada 2.000 toneladas.

Figura 7: Planta de Chancado – Aglomerado Minera El Tesoro.



Los principales insumos y recursos utilizados en la planta de chancado son:

- Energía eléctrica.
- Corazas y planchas de desgaste.
- Correas transportadoras.
- Paneles de poliuretano inyectado para mallas de harneros
- Aceites de lubricación.
- Aceite hidráulico.

La planta de aglomeración está dividida en dos líneas de similares características. Dos tambores aglomeradores marca Eral, de capacidad 850 ton/H cada uno, con diámetro de 3,5 metros y largo de 9 metros, lo que permite un tiempo de residencia de 45 segundos. Cuenta

con un sistema de inyección de ácido y agua, ésta última, con la posibilidad de ser reemplazada por refino o electrolitos de descartes, bombeados desde la planta de extracción por solventes.

El producto de la Planta de Chancado es alimentado a los tambores aglomeradores, por medio de correas transportadoras, con una granulometría de 95% bajo $\frac{3}{4}$ de pulgada y una humedad que fluctúa de 4 a 7%, dependiendo del origen del mineral alimentado. La dosis de ácido es suministrada de acuerdo a cada mezcla de mineral y fluctúa de 15 hasta 40 kilogramos de ácido por tonelada de mineral seca alimentada. La dosis de agua (o solución refino o electrolito) se dosifica para alcanzar un 8% de humedad a la salida de cada equipo. El mineral reducido y acondicionado es enviado a través de correas transportadoras a las pilas dinámicas para su proceso de lixiviación (véase Figura 8).

Figura 8: Puente apilador - Minera El Tesoro.



Minera el Tesoro cuenta con dos pilas dinámicas de lixiviación (véase Figura 9), cada una dividida en 51 módulos de 28x240 metros. Las pilas se encuentran impermeabilizadas en su base por un sistema de carpetas de HDPE de 1,5 mm de espesor y sobre ésta, una capa de material protector, denominado cover, que corresponde a mineral estéril, con granulometría 100% bajo 3 pulgadas.

El circuito de apilamiento avanza en el sentido de las manecillas del reloj. El sistema de correas y puente apilador son de marca RAHCO. La altura de carga máxima es de 3,5 metros. Su capacidad de carga es de 1900 TMS.

Al final del ciclo de lixiviación, el mineral tratado de los módulos es retirado, para reutilizar la cancha, por medio del uso de una rotopala. Este equipo es de marca FAM, con un diámetro de 6 metros y una capacidad instantánea de 1.940 ton/H. Además del sistema de correas para el transporte, este equipo se complementa con un esparcidor de ripios, en el sector de botaderos, de la misma marca.

El ciclo de lixiviación de la pilas dinámicas es de 80 días, con riego intermitente y una tasa de riego de $8,0 \text{ l h/ m}^2$. El ácido en riego es de 12 gpl. Las recuperaciones alcanzadas son del orden de 75% sobre el Cobre Total contenido en el mineral, como promedio histórico.

El sistema de riego es principalmente por gotero, acompañado por aspersion, principalmente en taludes.

Figura 9: Pila dinámica de Lixiviación – Minera El Tesoro.

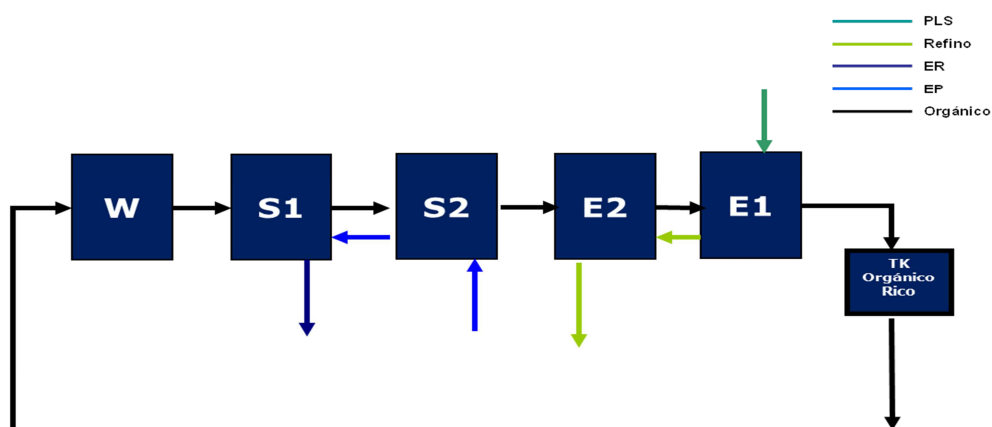


La planta de SX es convencional de tecnología de agitación lightning, con dos trenes configurados en 2E2S, con dos equipos de extracción cada tren, una etapa de lavado y dos de stripping o descarga, con un estanque de orgánico cargado entre las etapas E1 y lavado

(véase Figura 10). El medio de transferencia del cobre desde las soluciones de lixiviación, a las soluciones electrolíticas es el orgánico cargado, compuesto por 12% de extractante cetoxima Lix 84 IC y 10% extractante aldoxima NR – 10 y en 78% por diluyente Shellsol AR 2046.

El inventario de orgánico es de alrededor de 2.000 m³ por tren y se repone mensualmente, dada las pérdidas por arrastre principalmente en el refino que sale de la planta de SX y es enviado a lixiviación.

Figura 10: Esquema de operación de un tren Planta SX – Minera El Tesoro.



A la planta es posible alimentar hasta 2.200 m³/h de PLS provenientes desde las pila dinámicas.

El cobre concentrado en el electrolito es llevado a la nave de EO, en donde mediante el paso de una corriente continua forzada, se produce la electro - depositación del cobre en forma de cátodos.

La nave está compuesta por 284 celdas, con 60 cátodos y 61 ánodos (véase Figura 11). Su alimentación eléctrica es por medio de cuatro tranfo - rectificadores, capaces de suministrar hasta 47.000 ampere de corriente continua.

El despegue de cátodos se realiza en una máquina automática, con apoyo de puente grúa, grúa horquilla, equipo enzunchador, para formar paquetes de 2 toneladas de peso.

Figura 11: Nave de EW – Minera El Tesoro.



El transporte de cobre desde faena a puerto es en camiones de 30 toneladas.

Los principales suministros del proceso hidrometalúrgico, son:

- Agua, proveniente de pozos desde Calama, además de agua de cordillera (aproximadamente 100 l/s)
- Energía eléctrica, proveniente de SIN.
- Ácido sulfúrico, de distintos orígenes, con un consumo de 23.500 toneladas por mes.

1.3. Química del Cobre y Técnicas de Lixiviación

Si bien el cobre es uno de los pocos elementos que se presenta en la naturaleza en su estado metálico puro, en la mayoría de los casos no es así. Dependiendo de la génesis de los yacimientos y de su altura geográfica, el cobre se encuentra en la naturaleza, en su gran mayoría en forma de sales, las que son:

- Sales oxidadas.
- Sales sulfuradas (primarias y secundarias).
- Sales complejas.

Las sales oxidadas por lo general se encuentran en la parte más alta de los yacimientos o en forma superficial. Las sales complejas y sulfuradas secundarias se encuentran en la parte intermedia y las sales sulfuradas primarias en la parte final del yacimiento. Generalmente en la interface de estos estratos es posible hallar cobre nativo (cobre metálico natural).

Las sales oxidadas son comúnmente solubles en ácidos, por lo cual su forma de tratamiento por lo general es la lixiviación, siendo el ácido sulfúrico el medio ideal para realizar dicha disolución (dado su precio, muy bajo respecto a otros agentes reductores).

Las sales sulfuradas secundarias y sales complejas en general son parcialmente solubles en ácido. Para estas sales, por lo general, el proceso de lixiviación ácida es complementado con un proceso de lixiviación bacteriana. Este proceso consiste en oxidar el ión ferroso a férrico, utilizando la bacteria como catalizador, ión que en medio ácido es un potente agente oxidante del cobre. Si bien esta reacción en el papel es altamente eficiente, la acción bacteriana por lo general es muy lenta, generando elevados tiempos de lixiviación, por lo que este proceso es considerablemente más lento que el primero.

Las sales sulfuradas primarias en general son poco solubles en ácido o en ión férrico, por lo que se prefiere para la recuperación del cobre el proceso de flotación. Dado que las sales de azufre son generalmente aerofílicas, el proceso de flotación es altamente eficiente para recuperar el metal precioso de estos compuestos, dado que el proceso es sólo de algunas horas, para llegar desde la sal al concentrado (que por lo general alcanza valores alrededor del 30% de concentración de cobre y recuperaciones por sobre 80% del cobre total).

De acuerdo a Reghezza (2000, p. 11-12) en “Fundamentos de la Lixiviación”, la solubilidad de las sales de cobre, a distintos parámetros de lixiviación, son las señaladas en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2 Sales de cobre más comunes y su solubilidad en ácido e ión férrico en solución.

Mineral	Granulometría	Lixiviante	% Extracción	Tiempo	T°C	Ea (Kcal/mol)	$\Delta G - 25^\circ C$ (Kcal)	Mecanismo Controlante
Azurita	-100 + 200 m	1 - 5 % H ₂ SO ₄	100	1 hora	ambiente	4	-26,5	Transferencia de Masa
Malaquita	-100 + 200 m	1 - 5 % H ₂ SO ₄	100	1 hora	ambiente	4	-17,7	Transferencia de Masa
Tenorita	-100 + 200 m	1 - 5 % H ₂ SO ₄	> 90	1 hora	ambiente	10 - 12	-10,4	Mixto
Paramelaconita	- 200 m	H ₂ SO ₄	60	7 horas	ambiente	18,4		Químico
	- 200 m	H ₂ SO ₅	70	1 hora	50°C			
Crisocola	+ 4 m	5 % H ₂ SO ₄	100	30 horas	ambiente	8 - 12	-7,6	Diferencia de producto
	-10 + 28 m	5 % H ₂ SO ₄	90	6 horas	ambiente			
Atacamita	- 100 m	H ₂ SO ₄	95	1 hora	ambiente	4	-20,3	Transferencia de Masa
Cuprita	- 100 m	5 % H ₂ SO ₄	71	1 hora	35°C	15	-25,4	Químico
	- 100 m	Fe ⁺³ / H ⁺	100	6 horas	35°C			
Dioptasa	-10 + 28 m	1% H ₂ SO ₄	79 hasta 95	60 días	ambiente	10 - 12	- 7	Mixtos
	-10 + 28 m	2,5 % H ₂ SO ₄		60 días	ambiente			
Antlerita	- 100 m	H ₂ SO ₄	100	1 hora	ambiente	3 - 4	-12	Transferencia de Masa
Brochantita	- 100 m	H ₂ SO ₄	100	1 hora	ambiente	3 - 4	-12	Transferencia de Masa
Calcosina	-100 + 200 m	Fe ⁺³ / H ⁺	50	24 horas	35°C	6	-18,7	Transferencia de Masa
	-100 + 200 m	Fe ⁺³ / H ⁺	100	21 horas	35°C			
Bornita	-100 + 200 m	Fe ⁺³ / H ⁺	95	14 días	ambiente	5 - 7	-59,4	Diferencia de producto
	-100 + 200 m	Fe ⁺³ / H ⁺	85	3 días	50°C			
Covelina	-100 + 200 m	Fe ⁺³ / H ⁺	35	11 días	35°C	22	-7,1	Químico
	-100 + 200 m	Fe ⁺³ / H ⁺	70	13 días	50°C			
Calcopirita	-100 + 200 m	Fe ⁺³ / H ⁺	2	43 días	ambiente	17 - 20	-28,6	Químico
	- 325 m	Fe ⁺³ / H ⁺	45	14 días	50°C			
Energita	-100 + 200 m	Fe ⁺³ / H ⁺	90	146 días	25°C	13 - 15	-28 - 30	Químico

Fuente: *Fundamentos de la Lixiviación*. (Reghezza, A. 2000, p. 11- 12)

Conocida la especie mineralógica, el tratamiento de extracción va a ser determinado por el orden de magnitud del yacimiento y su ubicación geográfica. Para yacimientos masivos superficiales se preferirá los rajos abiertos, mientras que para yacimientos subterráneos y de menor tamaño, se preferirá la explotación por cámaras. En la medida que los yacimientos presenten distintas génesis, también se mezclará la forma de dichos tratamientos.

En general, las sales oxidadas de cobre son tratadas por lixiviación, usando un agente ácido. Para favorecer la acción del ácido, los minerales son reducidos de tamaño, por medio del proceso de chancado; esto permite tener más área de contacto entre el mineral y la acción del ácido. Para mejorar su percolación, los minerales chancados son aglomerados con agua y ácido, produciéndose su sulfatación y formación de un lecho poroso percolable.

Si bien una parte importante de la recuperación de cobre del proceso de las sales oxidadas se realiza en el tambor aglomerador, esta recuperación está sujeta a la posibilidad del medio acuoso que se encuentra en el interior del tambor (es decir la mezcla de agua y ácido) de solubilizar las sales contenidas en el mineral, característica que es limitada. El resto del tratamiento se realiza en el proceso de lixiviación, el cual se realiza, en la gran mayoría de los casos sobre pilas de mineral (permanentes o dinámicas), en el caso de las menas de baja ley de cobre.

Las soluciones drenadas se recuperan a través de sistema de canaletas y son purificadas por el proceso de extracción por solventes, proceso altamente selectivo, en el cual aprovechando la diferencia de densidades de un líquido orgánico, puesto en contacto con el acuoso que trae el cobre, hace recuperación de éste.

Este orgánico se pone en contacto nuevamente con un acuoso, ahora puro, que sólo contiene agua, ácido y cobre, solución ideal para la depositación, conocida como electrolito.

Finalmente, el proceso es llevado a su reducción por electrólisis. Por medio de una corriente forzada, el cobre en solución de Cu^{+2} es precipitado a cobre metálico Cu^0 (véase Figura 12).

Figura 12: Descripción gráfica simple del proceso de recuperación de cobre vía hidrometalurgia.



De acuerdo con Benavente (2010, p. 37-58), las principales técnicas para lixiviar el cobre (véase Tabla 1.3), son las siguientes:

Lixiviación in situ

La lixiviación in-situ (en el lugar) consiste en la aplicación de soluciones directamente sobre el mineral que está ubicado en el yacimiento, sin someterlo a labores de extracción minera. Existen dos modalidades de lixiviación in-situ, según la ubicación del mineral respecto del nivel freático. Debido a sus bajos costos de inversión es una técnica factible para la recuperación de metales desde materiales de muy baja ley, no explotables económicamente por otros métodos.

i) Gravitacional

Lixiviación de cuerpos mineralizados situados cerca de la superficie y sobre el nivel de las aguas subterráneas. Se aplica en las zonas ya explotadas de minas viejas o en zonas que han sido fracturadas hidráulicamente o con explosivos. En la Lixiviación in-situ gravitacional las soluciones se mueven por gravedad, lo que requiere de condiciones de alta permeabilidad o de una fragmentación previa, como es el caso de los yacimientos ya fracturados por una explotación minera anterior, con accesos operativos en los niveles inferiores para recolectar las soluciones. Por ejemplo aquellas minas sometidas a explotación subterránea del tipo de hundimiento por bloques ("block caving").

ii) *Lixiviación in-situ forzada*

Se aplica a yacimientos, ubicados debajo del nivel freático, en cuyo caso se hace uso de la permeabilidad interna de la roca y de las temperaturas y altas presiones que se generan a varios cientos de metros de profundidad. Las soluciones lixiviantes inyectan a través de pozos inyectoras del tipo usado en la explotación del petróleo y se succiona desde otra batería de pozos cosechadores, dispuestos de forma alternada. Esta técnica se ha usado en la recuperación de diversas sales fácilmente solubles, NaCl, KCl, minerales de uranio, y fosfato.

Lixiviación en botaderos

La lixiviación en botaderos consiste en el tratamiento de minerales de bajas leyes, bajo la ley de corte económica para la planta principal, conocidos como estéril mineralizado o marginal. Estos marginales se acumulan normalmente en cañones o quebradas cercanas a la mina. Alcanzan alturas de 100 metros o más y el sustrato basal no siempre es el más adecuado para recoger soluciones, sin embargo se le aplica solución en la parte superior y colectándose en un piscinas de intersección en la roca impermeable más próxima.

El método requiere poco capital de inversión y operación. Sin embargo, se obtienen recuperaciones bajas y la cinética es lenta (años).

Lixiviación en pilas

La lixiviación en pilas, se aplica a minerales de cobre, uranio, oro y plata de baja ley, que no presentan problemas de extracción. La aplicación de lixiviación en pilas en el tratamiento de óxidos de cobre es conocido desde el año 1752, sin embargo, su aplicación en el tratamiento de minerales preciosos comienza sólo en 1967, con los trabajos desarrollados en el U.S. Bureau of Mines. A diferencia de los botaderos, en este caso el mineral tiene una mayor ley y, por lo tanto, económicamente paga por un tratamiento de una planta de chancado, tipo secundario y/o terciario. Cuando se usa una granulometría más fina, entonces se hace recomendable el aglomerado para mejorar la permeabilidad del lecho del mineral. Adicionalmente la aglomeración agrega ácido concentrado, para efectuar el

curado ácido. Con este método se logra también inhibir la disolución de algunas especies indeseables como el aluminio y la sílice (SiO_2). Para determinar la factibilidad de la aplicación de la lixiviación en pilas a un mineral particular se deben realizar pruebas a escala de laboratorio y piloto. Una ventaja importante de la lixiviación en pilas, es su flexibilidad. Puede ser aplicada a minerales ROM, chancados, e incluso a relaves y materiales relativamente finos. La planta puede ser bastante simple con baja inversión de capital, puede incluir chancado, aglomeración, uso cíclico de canchas, etc.

Las pilas pueden ser dinámicas, tipo on-off en las que el mineral se remueve, se envía a botadero después de la lixiviación y la base de la pila se puede reutilizar, o bien pueden ser permanentes, en que las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores, aprovechando o no la impermeabilización existente.

Para la lixiviación en pilas, el tiempo de tratamiento es, en general, de varios meses, de acuerdo con el tipo de mineral tratado, sus leyes y la granulometría que se utilice.

Lixiviación por percolación.

La lixiviación en bateas, “vat leaching”, fueron utilizadas desde inicios del Siglo XX, en la industria del salitre con el nombre de cachuchos y consiste en circular una solución, a través de un lecho de mineral, previamente chancado. Se aplica principalmente a minerales de cobre, uranio, oro y plata que son fácilmente solubles y que presentan buenas características de permeabilidad. El proceso puede durar entre 2 y 14 días, con recuperaciones hasta del 90 %. Las principales ventajas de la lixiviación en bateas son:

- a) No se requiere de etapas de molienda y separación sólido-líquido.
- b) Las etapas de lixiviación y lavado cuentan con estanques de almacenamiento intermedios, lográndose más flexibilidad que en un proceso continuo.
- c) Se obtienen soluciones concentradas que pueden ir directamente a EO. Esto es debido a la baja relación sólido/líquido.
- d) Los costos de inversión y operación son más altos que los de la lixiviación in situ, en botaderos, en pilas, pero menores que en la agitación.

Las desventajas de la lixiviación en bateas, son:

- a) Es un proceso batch, al no ser continuo se forman reacciones indeseables.
- b) La recuperación máxima es de 65-90 %.
- c) La aplicación es limitada a minerales con contenido de finos menores que 8 a 12 %-200. (En algunos casos podrá aglomerarse el mineral).
- d) Se requiere más entrenamiento de operadores, el sistema tiene poca automatización.

Lixiviación por Agitación

La lixiviación por agitación requiere que el mineral esté finamente molido, aumentando el área expuesta. La agitación disminuye el espesor de la capa límite y maximiza el área de la interfase gas-líquido. Se utiliza preferentemente para minerales no porosos o que produzcan muchos finos y especialmente en la disolución de especies que requieren drásticas condiciones de operación. Se aplica a minerales de leyes altas, que justifican la molienda, o bien a concentrados o calcinas de tostación, que por sus menores volúmenes permiten justificar el gasto de una agitación, a cambio de una mayor recuperación y de un menor tiempo de proceso. Durante la agitación se logran tres objetivos:

- a) Dispersar los sólidos en una emulsión, formando una suspensión homogénea.
- b) Dispersar burbujas de gas en la solución.
- c) Acelerar velocidades de disolución, incrementando la transferencia de masa. La agitación puede realizarse por medios mecánicos o usando con aire.

Ventajas de la lixiviación por agitación:

- a) Se obtienen mayores recuperaciones.
- b) La cinética de extracción es más rápida.
- c) Es posible una gran automatización.
- d) Se minimiza problemas de finos.

Desventajas de la lixiviación por agitación:

- a) Altos costos de inversión y operación.
- b) Requiere molienda clasificación y separación sólido-líquido.

Tabla 1.3 Comparación simplificada de los distintos métodos de lixiviación en su aplicación en la *hidrometalurgia del cobre*.

Rangos de Aplicación y Resultados	Métodos Alternativos de Lixiviación			
	En Botaderos	En Pilas TL	Por Percolación	Por Agitación
Ley de los Minerales	muy bajas leyes	leyes bajas a medias	leyes medias a altas	leyes más bien altas
Tonelaje Tratado ton/día	sólo grandes tonelajes	amplio. grande a pequeño	está limitado, por instalaciones existentes, no es flexible	limitado por molienda
Inversiones de Capital	menores	medianas	media a alta	más bien altas
Granulometría	tal como sale de la mina	chancado hasta muy fino	chancado medio a fino	molienda fina en húmedo
Recuperaciones Típicas	40 a 60%	70 a 85%	70 a 85%	80 a 95%
Tiempos de Tratamiento	de 1 a varios años	de 1 a varios meses	de 1 a 2 semanas	de 6 a 24 horas
Calidad de Soluciones	diluidas (1 a 2 g/l)	diluidas a medias (2 a 7g/l)	medias a concentradas (10 a 20 g/l)	medianas (5 a 15 g/l)
Problemas Principales en su Aplicación	recuperación incompleta reprecipitación Fe y Cu canalizaciones pérdidas de evaporación pérdidas por infiltración soluciones son diluidas	recuperación es función del tipo de mineralogía requiere de grandes áreas canalizaciones reprecipitaciones por pH evaporación puede ser alta	bloqueo por finos/arcillas mayor inversión inicial manejo de materiales necesidad de control permanente y continuo personal debe estar muy bien entrenado	molienda es cara lavado o filtrado en contracorriente tranque de relaves inversión es alta suele requerir más agua control sofisticado: proceso es rápido

Fuente: *Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones* (Domic, E., 2011, p.181)

CAPÍTULO II: ANÁLISIS TEÓRICO DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA MINERALES SILICATADOS DE ALTA LEY

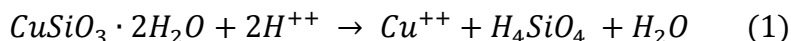
2.1. Minerales Silicatados de Cobre y su reacción en ácido

Como se mencionó en el capítulo anterior, el mineral de cobre se encuentra en forma de sales oxidadas, sulfuradas y mixtas. En el caso de las sales oxidadas, es posible encontrar el óxido en compuestos silicatados (Reghezza, 2012b).

De acuerdo a Reghezza (2012a), existen tres grupos estructurales para este tipo de compuestos:

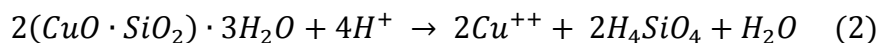
1. Del tipo silicato hidratado
2. Del tipo alúmino silicato arcilloso y,
3. Como multicompuesto en matriz silícea.

Como silicato hidratado, ya en el año 1911, se planteaba la estructura antes señalada, que se disuelve en medio sulfúrico según:

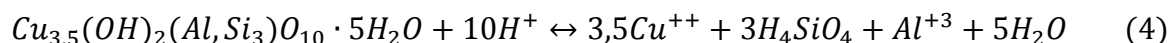
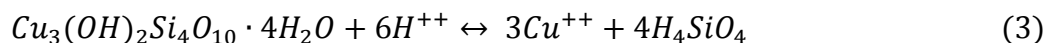


Diferentes estudios realizados entre los años 1913 y 1963 consolidan tal estructura, variando sólo el agua de cristalización o la relación molar Cu:Si en ella.

Una formulación alternativa en este contexto está dada por la siguiente ecuación:

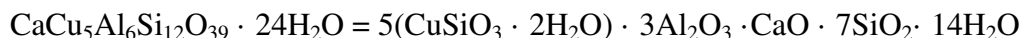


En una nueva estructura, geólogos rusos sugieren que la especie puede ser clasificada como un mineral cupriarcilloso del grupo de la esmectita con Aluminio como principal impureza, y se plantean las siguientes reacciones de lixiviación:

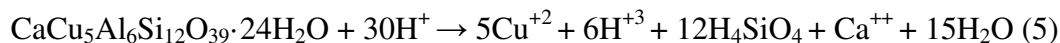


En esta familia de los alúmino silicatos arcillosos se incorpora la pilarita, procedente de Chile y caracterizada mineralógicamente por Kramberger en el año 1882, mineral que por su coloración, dureza y gravedad específica presenta una gran similitud con la crisocola, y cuya formulación incorpora, además de Cu, Si, Al, O y H₂O, calcio en su estructura, el que hace más engorrosa su disolución por la formación de capas sólidas pasivantes en dicha fenomenología.

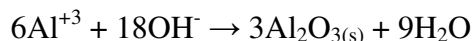
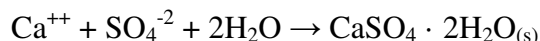
La pilarita queda definida por:



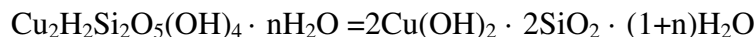
Y su reacción disolutiva es:



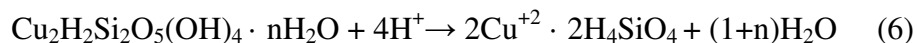
Y otras reacciones secundarias del tipo:



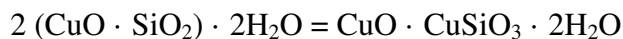
Más recientemente, en el 2006, estudios realizados con “crisocolas” de diferente procedencia la redefinen como un compuesto de spertinita (hidróxido de cobre) asociado a sílice amorfa y agua de hidratación, del tipo:



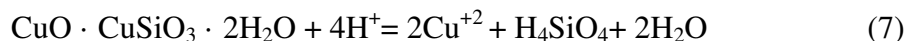
Y su reacción de disolución es:



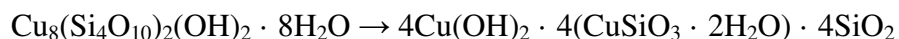
Finalmente, como multicompuesto en una matriz silíceas, se plantean estructuras como el óxido-silicato hidratado de cobre, del tipo:



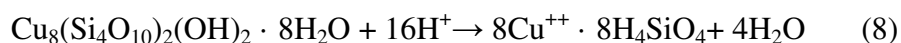
Que se disuelve según:



Van Dosterwyck en 1970, asocia la spertinita a la crisocola y a sílica, formando un compuesto del tipo:

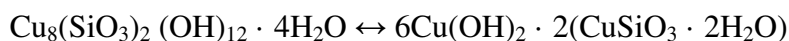


Cuya reacción de lixiviación es:

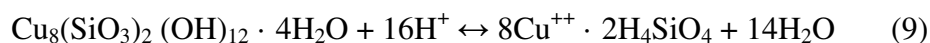


Pohlman y Olson, en 1976, en una definición más realista, incorporan a la estructura de spertinita y crisocola, la presencia de impurezas, como Al, Ca y Mg.

Sin embargo, una fórmula simplificada de dichos centros, se asemeja a la planteada por Van Dosterwyck seis años antes, que postula lo siguiente estructura:



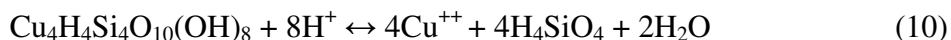
Y que se disuelve según:



Un estudio más reciente, de Klein y Huribat de 1997, plantea un compuesto del tipo oxisilicato de cobre asociado a sílice, del tipo:



Cuya disolución en medio ácido ocurre a través de la siguiente reacción:



Un resumen de las estructuras planteadas que caracterizan químicamente el grupo familia de las crisocolas se presenta en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Caracterización química de minerales silicatados.

Reacción	CuO:	SiO ₂ :	H ₂ O	%CuO	%SiO ₂	%H ₂ O	%Al ₂ O ₃	CuO/SiO ₂	H ₂ SO ₄ :Cu	H ₂ SO ₄ :especie
	Molar							Másico		
(1)	1	1	2	45,3	34,3	20,5	-	1,32	1;1	1:01
(2)	2	2	5	47,7	36,1	16,2	-	1,32	1;1	2:01
(3)	3	4	4	43,3	43,6	13,1	-	0,99	1;1	3:01
(4)	3,5	3	6	45	29,2	17,5	8,3	1,54	1,43;1	5:01
(5)	5	12	24	24,7	44,8	26,8	19	0,55	3;1	1,5:1
(6)	2	2	4	45,3	34,2	20,5	-	1,32	1;1	2:01
(7)	2	1	2	62,3	23,5	14,1	-	2,65	1;1	2:01
(8)	8	8	12	47,7	36	16,3	-	1,32	1;1	8:01
(9)	8	2	10	67,1	12,8	19,2	-	5,3	1;1	8:01
(10)	4	4	6	47,7	36,1	16,2	-	1,32	1;1	4:01

Fuente: *Lixiviación de Óxidos Silicatados de Alta Ley de Cobre (Reghezza, A. 2012b, p. 10)*

En la tabla 2.1 pone de manifiesto la alta variedad de los contenidos de CuO, SiO₂ y H₂O de cristalización, para las especies tipo “crisocolas”, notándose también que los requerimientos de ácido son en extremo diferentes y función de la especie específica que se trate este último punto es de especial relevancia y explica por qué, en algunos casos, la extracción de cobre es tan dependiente de la cantidad de ácido agregando al sistema y por qué, en otros casos, su impacto es significativamente menor.

Las reacciones (1) a (10) representan la acción del ácido disuelto sobre las especies consideradas, esto es, sin la acción previa del ácido concentrado sobre el mineral en la etapa de curado ácido. Puede notarse que, independiente de las estructuras definidas para los minerales silicatados de cobre, las ecuaciones planteadas representan reacciones químicas, función sólo de la acidez del sistema (o del pH del mismo), no requiere de la presencia de ningún otro tipo de agente lixivante (reductor u oxidante) y como producto de reacción el cobre disuelto está como Cu⁺² y la sílice, como H₄SiO₄.

2.2. Alternativa de tratamiento de minerales silicatados de alta Ley

Como se menciona al inicio de este documento, las reservas de mineral de alta ley acumuladas, corresponde a minerales de crisocola, que corresponde a una especie silicatada. Esta condición, como se vio en el apartado anterior, ofrece desafíos adicionales, pensando en el proceso de lixiviación.

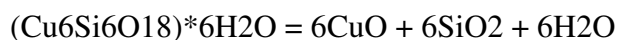
Para el tratamiento de minerales de alta ley, por lo general se utilizan las siguientes tecnologías:

- Fundición directa, utilizando el recurso como carga fría.
- Lixiviación por agitación, de tal modo de lograr el máximo de recuperación de cobre.
- Lixiviación en Pila dinámica en 1 etapa.
- Lixiviación en Pila dinámica en n etapas

No obstante, para el caso de los minerales silicatados, la operación de fundición no es posible, dado restricciones termodinámicas que no es posible de superar.

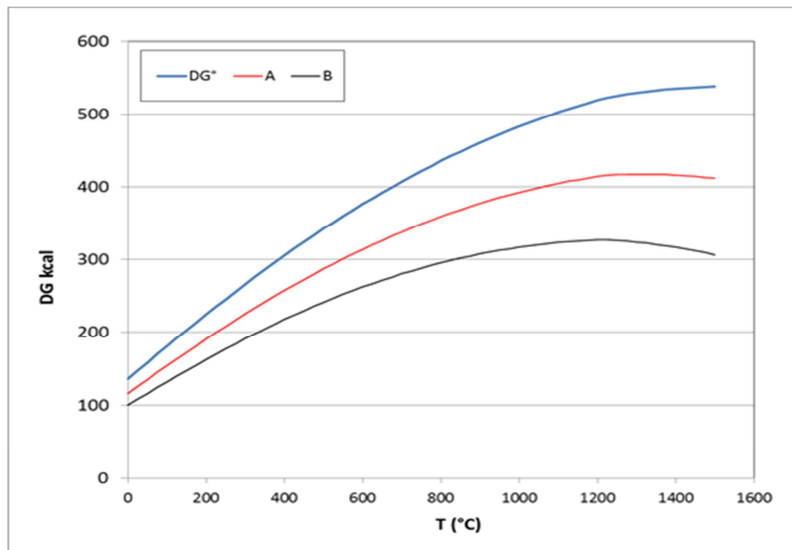
De acuerdo a Parra, R. (2012), la evaluación del procesamiento de la crisocola en algún reactor de los que conforman el proceso productivo de una fundición de concentrados de cobre debe analizarse en la perspectiva de identificar las transformaciones y reacciones posibles de ocurrir en un medio altamente oxidante a alta temperatura y la interacción de esta especie con las fases fundidas del proceso: ejes, matas y escoria.

El procesamiento se puede identificar como buscar el aporte de Cu a la fase metálica y la liberación de SiO₂ que pasa a la escoria. La primera parte de un mecanismo será la descomposición:



Sin embargo, el gráfico contenido en la Figura 13, indica que no es factible lograr esta descomposición.

Figura 13: Gráfico Energía de Gibbs v/s Temperatura para especies silicatadas.



Fuente: Análisis termodinámico del comportamiento de la crisocola en reactores de fusión y/o conversión (Parra, R. A. 2012, p. 1)

La curva azul muestra un ΔG° extremadamente positivo, el cual incluso para condiciones extremas de bajas actividades de CuO , SiO_2 y muy baja H_2O (A y B), llegando incluso a condiciones de vacío, no puede ser disminuido a valores negativos.

Bajo este punto de vista teórico, las especies silicatadas no serían posibles de tratar por fundición, lo que descartaría definitivamente esta tecnología, como alternativa de tratamiento. La sílice asociada a la crisocola es muy estable y no participa como fundente. Para ello debe desarmarse la estructura silicatada de cobre y esto, se demuestra, no es fácil. La data termodinámica usada fue el software HFC de Outokumpu, que reconoce a esta especie como la más cercana a la crisocola.

Respecto a la lixiviación como alternativa de tratamiento, ya sea por agitación, como en pilas, esta está sujeta a la solubilidad del cobre contenido en el medio que será lixiviado.

La solubilización del cobre en medio ácido (ácido sulfúrico) se realiza en forma de sulfato de cobre. Por lo tanto, la capacidad que tenga el medio lixivante para el cobre va a estar limitada por las condiciones de temperatura y concentración de ácido y sulfato de

cobre en la solución, que eviten la cristalización de esta sal, lo que entregará el dimensionamiento del proceso a elegir.

Los autores Meseguer, J., Lozano, L., y García, D. (1999)., entregan una ecuación obtenida empíricamente para la disolución de cobre, en un medio ácido, a diferentes niveles de temperatura:

$$[\text{Cu}^{+2}] = -190,4 + 229,1 \times \text{Log } T + (-0,45 + 4,64 (1/T)) \times [\text{H}_2\text{SO}_4]$$

Donde:

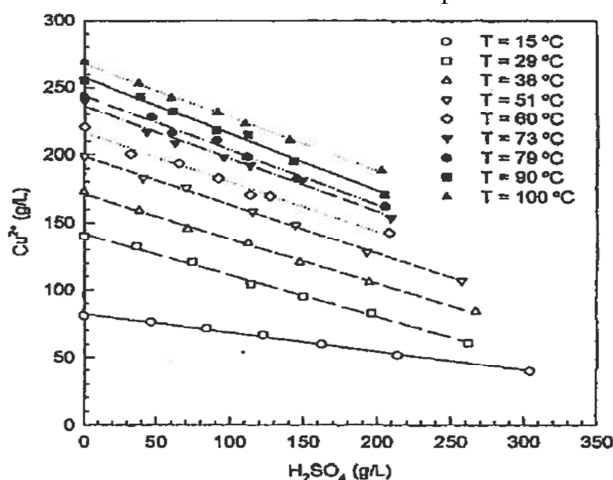
$[\text{Cu}^{+2}]$: Concentración de Cobre en g/l.

T: En grados Celsius °C

$[\text{H}_2\text{SO}_4]$: Concentración de ácido en g/l.

Como se puede observar en la Figura 14, gráficamente resulta lo siguiente:

Figura 14: Solubilidad del cobre en soluciones acuosas ácidas, a diferentes condiciones de temperatura.



Fuente: Una contribución al estudio de la solubilidad del $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en medio acuoso (Meseguer, Lozano y García, 1999)

Esto significa que, a condición de temperatura ambiente (15°C), sería imposible que la concentración de cobre superara los 80 gpl. en una solución ácida, pues se encontraría saturada a punto de la cristalización. Este concepto es fundamental, para dimensionar el proceso de lixiviación. En el caso de la lixiviación por agitación, en que el medio lixivante

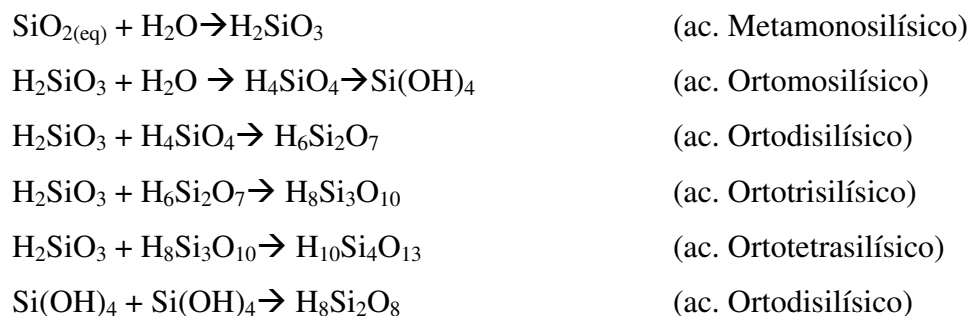
se mantiene en el orden de 150 gpl de ácido, la concentración máxima de cobre podría llegar a los 60 gpl. Para un mineral de 10%, de contenido de cobre total, que posee 100 kilogramos de cobre por cada tonelada, debiera al menos ser lixiviada con 1,6 m³, por cada tonelada de mineral procesado, para evitar un punto de cristalización (100 kg/1,6 m³ = 60 kg/m³ = 60 gpl). Esto entrega una idea del dimensionamiento que debiera tener la planta de agitación, para tratar el mineral procesado.

Para tratar una tonelada de mineral, que contenga 100 kg de cobre y no llegar a la cristalización, se debiera ocupar 1,6 m³. Pensando en una agitación de 30 minutos, existiría un potencial de tratamiento de sólo 48 toneladas por día, a la totalidad del recurso de 200.000 TMS, el tiempo de procesamiento sería de más de 4.000 días.

Aumentar 10 veces la capacidad, permitiría tratar la totalidad del recurso en 400 días; no obstante, el tamaño del estanque a utilizar sería de 16 m³. Si bien este tamaño no es prohibitivo para una operación de este tipo, los equipos accesorios, principalmente estanques decantadores serían de gran tamaño, poniendo en duda la rentabilidad de construcción de una planta de esta capacidad para el recurso con el que se cuenta.

A la lixiviación por agitación, se suma una dificultad adicional. Dado que los minerales son de tipo silicatados, es inherente la aparición de sílice coloidal en las soluciones de lixiviación.

Como se menciona en la ecuación (10) de la página 28, la disolución de la sílice produce ácido ortomono silícico, H₄SiO₄. De acuerdo a Reghezza (2012b), la presencia de este ácido, no excluye la presencia de otros ácidos débiles que pueden coexistir en fase acuosa diluida, en base a una serie de equilibrios, como los siguientes:

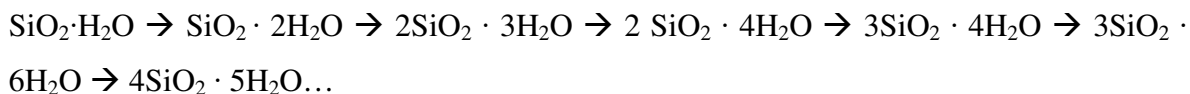




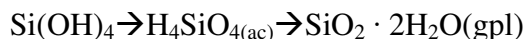
Y así,



Tal conjunto de reacciones expresan equilibrios o pseudo equilibrios de hidratación, concatenación o crecimiento de sílice monomolecular a polimolecular, polimerización y coalescencia como sílice con n moléculas de agua:



Si la presencia del ácido H_4SiO_4 alcanza su nivel de saturación, del orden de 150 a 200 ppm Si o 430 a 450 ppm SiO_2 , se formará un precipitado gelatinoso de SiO_2 :



Para el ácido metamonisilísico, H_2SiO_3 , se reporta una máxima solubilidad en solución de 250 a 270 ppm Si.

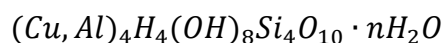
En el rango que se establece de saturación de Si, los coloides formados son de baja densidad y la velocidad y grado de polimerización es afectada por el pH, nivel de saturación, temperatura de la solución, salinidad o presencia de otros iones en solución y del “efecto semilla” de micropartículas en el sistema.

A pH cercano a 2, la sílice coloidal alcanza su punto cero de carga y a pH menor a 2, la polimerización se promueve fuertemente en función de la concentración de protones H^+ en el sistema.

Esta última propiedad explica el efecto exitoso que ha tenido el curado ácido y el empleo de etapas de maceramiento ácido en el ciclo de lixiviación para controlar el nivel de sílice disuelta en los sistemas hidrometalúrgicos industriales.

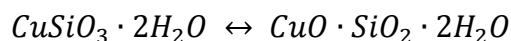
En el pasado, la gran complejidad para tratar estos acuosos estaba dado por la formación de sílice coloidal y geles de aluminosilicatos, que no sólo afectaban el proceso de lixiviación, sino también, podían hacer inviable la operación de SX o IX posterior.

Dentro de los compuestos silicatados, la crisocola es la más conocida, pero no la única cuya proto-estructura puede asimilarse al siguiente compuesto:



El cual posee de manifiesto la presencia de Aluminio como la impureza más frecuente presente en su estructura, notándose también, contenidos menores de Fe, Ca, Mg y en ciertos casos, Co, en la especie.

En forma más simplificada, la especie está caracterizada como un hidrogel o precipitado gelatinoso, cuyos componentes esenciales son el óxido de cobre, sílice y agua, con una estructura coloidal amorfa, de la siguiente formula aproximada:



Estos compuestos de tipo coloide son inmensamente dañinos en la etapa de extracción por solventes, ya que, provocan la formación de borras, lo que produce importantes pérdidas de orgánico por arrastres en la fase acuosa, generando esto pérdidas económicas, debido a la reposición del reactivo y a pérdidas en la capacidad de extracción, que incluso llevan este proceso a la inviabilidad.

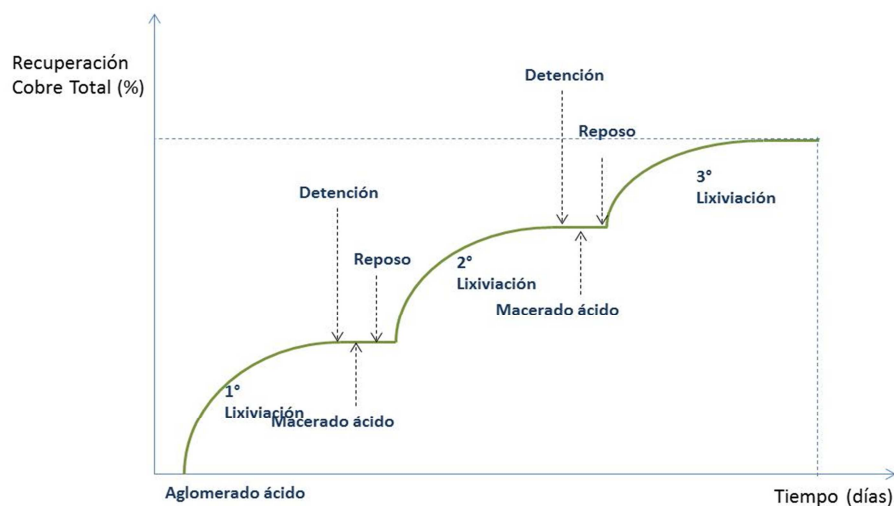
Bajo estos dos criterios, tamaño de planta e inevitable presencia de una cantidad nociva de sílice coloidal aportada a la planta de SX, la tecnología de lixiviación por agitación, se descarta como alternativa de tratamiento.

La posibilidad de tratar minerales silicatados de alta ley utilizando lixiviación dinámica en una etapa se ve imposibilitada, debido a las altas tasas de ácido que debieran adicionarse en el tambor aglomerador, para lograr la sulfatación adecuada del cobre.

Así, para un mineral de 10% de ley de Cobre, estequiométricamente deberían adicionarse 154 kilos de ácido por tonelada de mineral alimentado al equipo aglomerador (esto sin considerar el consumo de las otras especies contenidas en el mineral); tasa imposible de lograr para la mayoría de los sistemas de dosificación implementados en la industria y, además, altamente riesgoso por las temperaturas y vapores que se generarían al interior del tambor en el proceso de aglomeración, provocando daños tanto al equipo como al entorno.

Con ello, la lixiviación debiera ser tratada en etapas. Esto es, realizar múltiples ciclos de maceración con ácido y reposo, de tal manera de lograr varios efectos de sulfatación de cobre durante el período de operación, permitiendo lograr el objetivo de alta recuperación desde este recurso en ciclos de lixiviación combinados, sobre la misma operación (véase Figura 15).

Figura 15: Esquema de Operación de Lixiviación en n Etapas



El macerado ácido se refiere a la inyección de solución altamente acidulada (más de 100 gpl de ácido), que emula el efecto de aglomerado, permitiendo una segunda sulfatación del material. Esto se complementa con un de reposo, lo que favorece la acción del ácido.

Teóricamente, este método sería el óptimo para el tratamiento de minerales de alta Ley.

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE PLAN EXPERIMENTAL DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN PARA MINERALES DE ALTA LEY

3.1. Desarrollo de plan experimental a nivel de laboratorio

Luego del análisis teórico, que arroja como resultado que la única forma de tratar minerales oxidados silicatados de alta ley de cobre, es por medio de la lixiviación en etapas, se inició el desarrollo del plan experimental, que busca como principal logro, entregar la mayor rentabilidad del proceso, definido esto por una alta recuperación y el menor consumo de recursos, principalmente ácido.

Esta etapa del estudio, se dividirá en 3 partes:

- Realización de plan experimental exploratorio.
- Realización de plan experimental de optimización.
- Desarrollo de pruebas a nivel industrial.

Todos estos ensayos serán realizados en instalaciones de Minera El Tesoro. Las pruebas de laboratorio serán llevadas a cabo en la Planta Piloto, operada por SGS-CIMM, mientras que las pruebas a nivel industrial serán realizadas en la pila de lixiviación dinámica, del área seca de la Superintendencia de Operaciones Planta.

3.1.1. Plan Experimental Exploratorio

A partir de una muestra entregada por el área de geología, se realiza un plan experimental exploratorio, que consiste en 2 etapas:

- **Barridos de sulfatación**, para determinar aproximadamente los niveles de extracción de cobre para distintas dosis de ácido en el aglomerado.
- **Pruebas en columnas unitarias de 8 pulgadas de diámetro**, como primer acercamiento a lo que será el comportamiento en lixiviación.

En el caso de las sulfataciones, las muestras fueron recibidas, reducidas a 100% bajo ½" de pulgada y cortadas hasta 2 kilogramos por muestra. Cada muestra fue aglomerada con dosis de ácido y agua, reposada durante 2 días y posteriormente lavada con el doble de agua en peso, respecto al peso de la muestra seca.

Para el set de muestra, fueron considerados parámetros extremos, de tal manera de ver claramente el efecto de cada uno de ellos sobre la extracción de cobre:

- Dosis de ácido, 2 niveles: 20 y 100 kg, por tonelada de mineral seco.
- Dosis de agua, 2 niveles 7 y 67 kg, por toneladas de mineral seco.
- Días de reposo, 2 niveles 2 y 6 días de reposo.

Cada subnivel fue realizado en duplicado, para asegurar la correcta representatividad de la prueba. Esto entregó como salida, la recuperación aproximada de cobre y el consumo de ácido en cada caso. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1: Pruebas de sulfatación, condiciones de carga y resultados obtenidos

BARRIDO DE SULFATACIÓN MIRADOR ALTA LEY -1/2"												
Prueba	Condiciones de Mineral			Condiciones de Sulfatación				Resultado				
	Peso Seco	Ley de CuT	Ley de CuS	Dosis Ácido H+	Dosis Agua	Temp. Lecho	Reposo	Conc. Cu+2	Conc. H+	Extracción Cu	Consumo Especifico Ácido	Consumo Neto Ácido
	kg	%	%	kg/ton	kg/ton	°C	días	gpl	gpl	%	kg H+/kg Cu	kg H+/TMS
1	2,04	11,4	10,8	20	7	33	2	4,2	0,5	7,4	0,8	7
	2,02	11,4	10,8	20	7	35	2	4,3	0,5	7,5	0,8	7
2	2,05	11,4	10,8	20	7	40	6	4,8	0,5	8,5	0,5	5
	2,02	11,4	10,8	20	7	37	6	4,7	0,5	8,2	0,6	6
3	2,03	11,4	10,8	20	67	38	2	3,8	0,5	6,7	1,1	8
	2,02	11,4	10,8	20	67	37	2	3,6	0,5	6,3	1,3	9
4	2,03	11,4	10,8	20	67	40	6	4,0	0,5	7,1	0,9	8
	2,02	11,4	10,8	20	67	40	6	3,7	0,5	6,5	1,1	9
5	2,01	11,4	10,8	100	7	52	2	21,3	1,3	37,3	0,8	33
	2,01	11,4	10,8	100	7	50	2	22,6	1,1	39,6	0,6	29
6	2,01	11,4	10,8	100	7	43	6	20,0	1,8	35,1	0,9	36
	2,01	11,4	10,8	100	7	44	6	20,6	1,8	36,2	0,8	34
7	2,02	11,4	10,8	100	67	57	2	23,5	0,5	41,3	0,6	27
	2,02	11,4	10,8	100	67	60	2	22,9	0,6	40,1	0,6	29
8	2,01	11,4	10,8	100	67	61	6	21,0	0,9	36,9	0,8	34
	2,04	11,4	10,8	100	67	58	6	21,5	0,9	37,6	0,8	33

De este primer set de pruebas, es posible deducir lo siguiente:

- Dado el alto contenido de cobre en los minerales, la cantidad de ácido dosificada influye directamente sobre la extracción de cobre lograda.
- Cada prueba presenta un consumo específico de ácido similar. Esto se entiende como que todo el ácido fue agotado en cada prueba, independiente de la dosificación utilizada.
- Dosis altas de agua, favorecen la extracción.
- Un aumento en los días de reposo, desfavorece la extracción de cobre desde los minerales, para las dosis mayores de ácido.

Estas orientaciones permiten anticipar que la extracción de cobre dependerá en forma importante del ácido pasado durante el proceso de lixiviación, esto incluye aglomerado y riego, con lo cual se puede anticipar, que deberán maximizarse los ciclos de lixiviación y la razón de lixiviación, para lograr altas recuperaciones.

El desarrollo del primer set de lixiviación a nivel de columnas fue de carácter exploratorio, y se buscó más que todo, conocer el comportamiento de la extracción de cobre y consumo de ácido para 3 condiciones de operación:

- Prueba de Control: Operada con las mismas condiciones de lixiviación de operación normal en el circuito de lixiviación de Minera El Tesoro. Esto es refino de planta concentrado a 12 – 14 gpl de ácido, en riego intermitente 12x12 horas de riego.
- Prueba con refino acidulado: Se ajusta el refino a riego a 30 gpl.
- Prueba con refino acidulado y macerado: Se ajusta el refino a riego a 30 gpl. Además, a la mitad del ciclo de lixiviación, se realizó un curado ácido con 100 gpl de ácido, reposo y posterior puesta en servicio.

Las pruebas fueron cargadas a 3 metros de altura, chancadas 100% a ½” pulgada y aglomeradas con 20 kg H+/TMS.

Cuando las pruebas con refino enriquecido alcanzaron la razón de lixiviación de 2,5 m3/TMS, las pruebas fueron detenidas. Los minerales descargados, fueron re-manejados y se volvieron a cargar. Sobre la columna 3 y 4 se inició el riego en forma inmediata. Sobre la columnas 5 y 6 se realizó curado ácido, reposo y posterior puesta en servicio (véase Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Pruebas de Lixiviación en Columnas de 8”, condiciones de carga y resultados obtenidos.

Parámetro	Prueba	Condiciones de Carga					Condiciones de Operación				Resultados		
		Altura Carga m	Ley Cabeza CuT %	CuS %	Acido Curado kg/ton	Densidad Carga Ton/m3	Tasa Riego Original	Tiempo Total Riego días	Razón Lixiviación m3/Ton	Ácido Pasado Kg/Ton	Consumo Bruto kg/Ton	Consumo Neto kg/Ton	Extracción Total (%)
Prueba Control	1	2,1	11,2	11,0	20	1,6	8	169	6,0	108,5	105,6	-10,8	67,7
	2	2,1	12,8	12,7	20	1,6	8	169	6,0	108,2	105,3	-15,9	61,3
Prueba Refino Enriquecido, reposo con remanejo simple	3	2,1	11,9	11,8	20	1,6	8	169	4,7	235,9	231,4	66,9	89,8
	4	2,1	11,4	11,1	20	1,6	8	169	6,0	296,3	262,6	95,5	94,8
Prueba Refino Enriquecido, reposo con remanejo y macerado.	5	2,1	11,7	11,6	20	1,6	8	170	3,3	167,7	166,2	27,0	77,2
	6	2,1	10,6	10,5	20	1,6	8	170	4,1	221,5	219,1	80,1	85,0

Figura 16: Extracción de cobre respecto al tiempo, pruebas de lixiviación en columnas de 8 pulgadas.

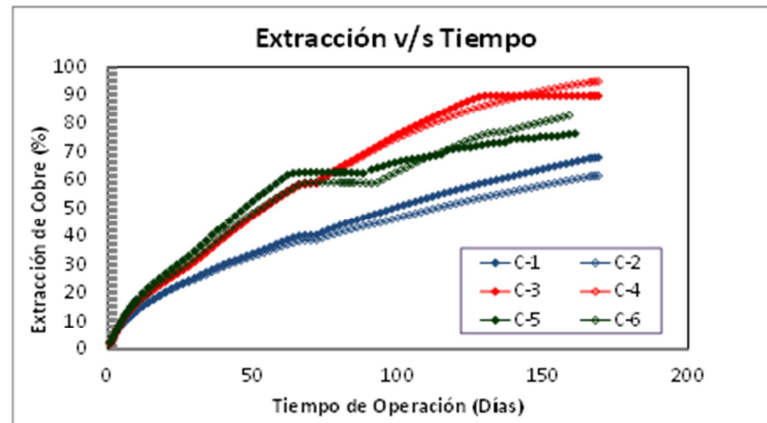


Figura 17: Extracción de cobre respecto a la razón de lixiviación, pruebas de lixiviación en columnas de 8 pulgadas

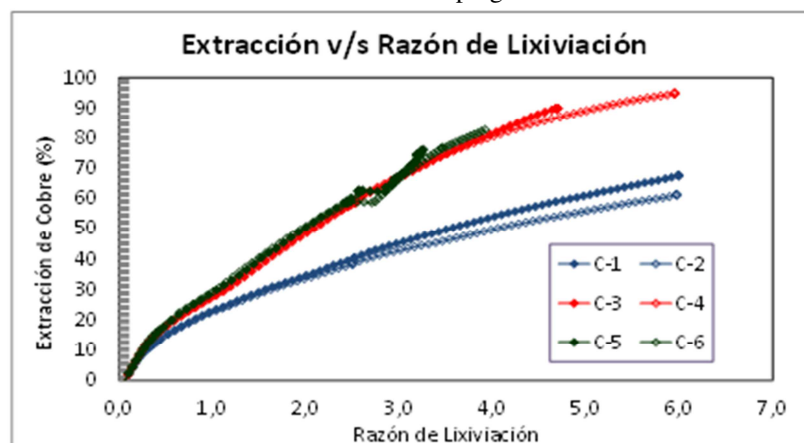
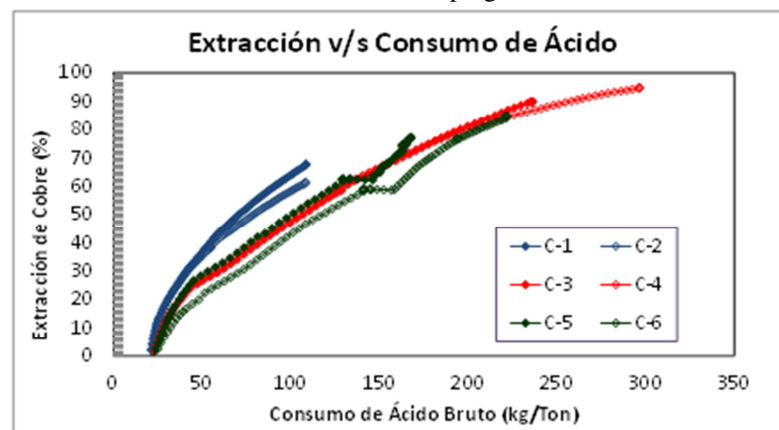


Figura 18: Extracción de cobre respecto al consumo bruto de ácido, pruebas de lixiviación en columnas de 8 pulgadas



Los resultados obtenidos (véase Figura 16-17-18), marcan claramente la dependencia de la recuperación respecto a la cantidad de ácido adicionada, sin que esto se traduzca necesariamente en un mayor consumo neto. El remanejo no generó alteraciones mayores en los resultados.

De este primer set de prueba es posible deducir dos cosas:

- Es necesario pasar importantes cantidades de ácido sobre el mineral, para lograr altas recuperaciones.
- Para ello, es necesario lograr altos valores de razón de lixiviación, por lo que, en la optimización, se debe pensar en lograr pasar la mayor cantidad de volumen de solución por cada toneladas de mineral en lixiviación.

3.1.2. Plan Experimental Optimización

Conocidos los resultados del plan exploratorio, fue diseñado un nuevo plan de pruebas, en el cual se buscaba la optimización de la recuperación y consumo de ácido, a través del ajuste de los siguientes parámetros:

- Granulometría, se exploraron 2 niveles: 100%-1/2" y 100% -3/8"
- Altura: Se trabajó a 1 y 2 metros de altura.
- Dosis de ácido en aglomerado. Todas las muestras fueron dosificadas con 60 kg/TMS de ácido.
- Concentración de ácido en riego. Algunas pruebas fueron regadas con refino de planta y otras con refino ajustado a 50 gpl. de ácido.

Los esfuerzos apuntaban a lograr el mayor paso de ácido a través del mineral, que entregase valores de recuperación que fuesen atractivos.

Los resultados obtenidos de este nuevo plan de pruebas, son resumidos en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3: Pruebas de Lixiviación en Columnas de 8", condiciones de carga y resultados obtenidos para set optimizado.

Parámetro	Prueba	Condiciones de Carga					Condiciones de Operación				Resultados		
		Altura Carga m	Ley Cabeza CuT %	Acido CuS %	Acido Curado kg/ton	Densidad Carga Ton/m3	Tasa Riego Original l/hm2	Tiempo Total Riego días	Razón Lixiviación m3/Ton	Ácido Pasado Kg/Ton	Consumo Bruto kg/Ton	Consumo Neto kg/Ton	Extracción Total (%)
Mx Chancado 1/2", Carguío 2 mt, alimentación 30 gpl H+	1	2,0	11,5	10,8	60	1,6	16	68	3,4	203,4	199,4	48,2	85,6
	2	2,0	11,9	11,6	60	1,7	16	68	1,0	94,1	93,7	30,1	34,8
Mx Chancado 1/2", Carguío 1 mt, alimentación 20 gpl H+	3	1,0	11,9	11,6	60	1,5	8	68	4,3	209,3	199,5	40,7	86,7
	4	1,0	11,9	11,6	60	1,5	8	68	4,4	184,2	157,7	23,5	73,5
Mx Chancado 3/8", Carguío 1 mt, alimentación 20 gpl H+	5	1,0	11,2	10,2	60	1,6	8	64	3,7	201,1	197,9	62,6	78,5
	6	1,0	11,0	10,3	60	1,6	8	64	3,5	191,5	187,2	50,4	80,7
Mx Chancado 3/8", Carguío 2 mt, alimentación 30 gpl H+ Muestra B1	7	2,0	12,4	11,7	60	1,5	8	64	2,4	152,8	151,7	19,4	69,5
	8	2,0	12,9	11,9	60	1,5	8	64	2,5	153,6	152,4	17,6	68,1
Mx Chancado 3/8", Carguío 2 mt, alimentación 30 gpl H+	9	2,0	11,6	11,0	60	1,5	16	64	1,4	107,5	106,8	16,7	50,6
	10	2,0	11,9	11,5	60	1,6	12	64	2,6	157,5	156,2	20,2	74,0

La Prueba N°2 y N°9 sufrieron inundación de su lecho, por lo que hubo que dejarlas tempranamente fuera de servicio.

Las pruebas con mayores tasas de riego se inundaban parcialmente, por lo que, hacia mediados del ciclo de lixiviación, fue necesario bajar su riego o su tiempo de operación.

Se aprecia claramente en los resultados la alta cantidad de ácido (alrededor de 200 kg/TMS) que es necesaria pasar por el lecho de riego, para lograr recuperaciones superiores a 70%. Esto no necesariamente se tradujo en un alto consumo neto, logrando valores que oscilaron entre 40 y 60 kg/TMS.

Las razones de riego (o razón de lixiviación) que permitieron alcanzar valores altos de recuperaciones, superaron el valor de 3 m³/TMS. Este valor no es reproducible a nivel industrial, en las condiciones habituales de lixiviación.

CAPÍTULO IV: CARGA DE MÓDULOS INDUSTRIALES DE ALTA LEY

Durante los meses de noviembre 2012 y febrero 2013 se lixivió un módulos en la pila industrial con mineral del rajo Mirador con alta ley de cobre. El módulo cargado fue el de la posición 4446E, en el cabezal noreste de la pila dinámica.

Por recomendación experta, se agregó en este estudio la lixiviación de minerales de alta ley en mezclas con minerales de baja ley. Una mezcla se realizó al 50% con mineral Marginal Mirador y otra con 50% de mineral oxidado de baja ley del rajo Esperanza. Estos minerales de menor ley, poseían una ley de cobre que fluctuaba entre 0,4 – 0,5%. Estos módulos fueron cargados en el cabezal Noroeste de la pila dinámica, en las posiciones 4447A y 4447B.

Los minerales alta ley estaban considerados en el presupuesto 2013, por lo que era necesario definir la forma como ingresarían al proceso. Algunas incertidumbres que se esperaba aclarar, además de la recuperación de cobre, era la factibilidad de poder suministrar todo el ácido requerido por el mineral, cuál sería el pH de las soluciones drenantes y el efecto de la liberación de sílice coloidal debido a la naturaleza silicatada de los minerales.

Durante la prueba, el control operacional fue deficiente en cuanto a la medición de flujos, adiciones de ácido y en la toma de muestras de los efluentes. Esta situación impidió realizar un adecuado balance de masa y restringió la posibilidad de aplicar cambios en las variables de interés durante la operación.

Dentro de los objetivos de esta prueba, se encontraban:

- Evaluar el comportamiento de los minerales de alta ley, cargados sobre módulos industriales de operación.
- Corroborar el comportamiento de estos minerales, ante parámetros de carga y lixiviación, ajustados en pruebas piloto.
- Evaluar mejoras sobre el desarrollo de la prueba.

Las condiciones de carga de esta prueba industrial, se muestran en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Pruebas de Lixiviación en módulos industriales, condiciones de carga.

Condiciones de carga	4446E	4447A	4447B
Masa, t	10.100	11.800	11.800
Cu T, %	13,97	5,03	5,03
Fino Cu, t	1.411	594	594
Tamaño partículas	95%-1/2"	95%-1/2"	95%-1/2"
Altura carga, m	1	1	1
Dosis de ácido, Kg/t	60	60	60
Dosis de agua, Kg/t	80 - 100	80 - 100	80 - 100
Tiempo de reposo, días	4	4	4
Recuperación esperada, %	76	76	76
Aporte de cobre fino, t	1.072	451	451

De tal manera de asegurar la correcta carga de los materiales, se tomaron las siguientes consideraciones:

- El módulo 4446-D (anterior al 4446E), debe cargarse con minerales de alta ley (últimas 1.000 a 2.000 toneladas).
- Correcto funcionamiento del cortador de muestras.
- Mayor carga de trabajo en Laboratorio Químico. Implementar el análisis de sílice (SiO₂).
- Disminuir al mínimo el volumen vivo de mineral del stock de finos.
- Se debió ajustar el procesamiento de mineral, para asegurar la dosis de ácido cercana a 60 kg H⁺/TMS.
- Se debe ajustar el producto de chancado a una granulometría de 95% - 1/2''.
- La altura de carga se definió en 1,2 mt (para favorecer la razón de lixiviación). Se realizó un control topográfico que registrara el volumen inicial de carga.

- El riego de los módulos deberá ser con goteros nuevos y se debe dejar implementado el riego con aspersores.
- Los aspersores deberán regar con solución refino de planta (no refino enriquecido).
- Evaluar la instalación de un flujómetro.- Utilizar ambas piscinas de PLS, para administrar las altas concentraciones de cobre de las soluciones drenadas.
- Se debe monitorear permanentemente la concentración de PLS y Revisar regularmente los niveles de borra en los decantadores.
- Se deberá muestrear las soluciones drenadas desde el inicio de la humectación. Se debe chequear 1 vez por turno el nivel de apozamientos sobre la pila.
- Se deberá asegurar un correcto muestreo de los ripios resultantes.
- Se debe mantener operativa 100% la 2° línea de ácido (refino enriquecido con ácido) hasta los módulos en prueba (4446E, 4447 A y 4447B), en ambas pilas dinámicas.
- Producto de los altos niveles de ácido con que se trabajará, deben ser revisados todos los sistemas asociados a impulsión y conducción de ácido.
- Las mezclas se realizaran en tortas según lo acostumbrado en MET.
- Reducción de stock vivo en domo y tolvas de alimentación planta de chancado.
- Presencia de nitratos en los minerales (dada la alta dosificación de ácido en la aglomeración – generación de vapores nitrosos). Habilitar circuito de detección de gases.
- Ajuste de Frecuencia cortador de muestras.
- A la mitad del ciclo de lixiviación, el módulo industrial 4446E, deberá detenerse, realizar macerado ácido y reposo, para iniciar un segundo ciclo de lixiviación.

La condición de operación alcanzada se resume en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5: Pruebas de Lixiviación en módulos industriales, condiciones de operación.

Condiciones de operación	4446E	4447A	4447B
Tiempo de humectación, hr	40	30	30
días de humectación	5	4	4
Solución humectación	ref rico	ref rico	ref rico
Tasa de riego, l/h/m ²	8	8	8
Frecuencia de riego	4X4	4X5	4X5
Ácido en riego, gpl	50	50	50

Refino rico hace referencia a refino enriquecido con ácido hasta 50 gpl. La frecuencia de riego se refiere a 4 horas de riego por 4 horas de reposo, en el caso de la pila 4446E. Se debió aumentar levemente la frecuencia de reposo en las pilas 4447A y 4447B por una leve inundación al inicio del riego.

Durante la carga y operación de estos módulos de prueba industriales, se produjeron las siguientes consideraciones:

- Para cargar los módulos no se realizaron pruebas de carguío, razón por la cual fue difícil ajustar el parámetro de altura. Los módulos finalmente fueron cargados a 1mt y no a 1,2 m lo que significó una menor masa en estudio.
- La ley del mineral solo alcanzó 10,12% CuT y no 14% como se pensó en un comienzo, una buena explicación es la heterogeneidad del stock, donde es posible encontrar sectores de muy alta ley como 18% CuT y otros de leyes inferiores a 10% CuT.
- El producto de chancado cumplía con las condiciones de la prueba, todas las módulos tenían un porcentaje cercano a 95% -1/2". El perfil más fino correspondió al módulo 4446E, cargado exclusivamente con mineral de alta ley rico en Crisocola,

cuya dureza está entre 2 y 4 en la escala Mohs. Esto explica la mayor generación de partículas finas y parte de los posteriores problemas de percolación de ese módulo.

- El perfil granulométrico de los ripios en los módulos 4447 A y 4447 B resulto ser más fino que el perfil de la cabeza, lo cual tiene cierta lógica debido al ataque químico y a la fricción de partículas en el proceso de transporte y carga del mineral, sin embargo, el perfil del ripio del módulo 4446E es levemente más grueso que su cabeza (antes se había observado este comportamientos en columnas de lixiviación con minerales silicatados de alta ley), se puede conjeturar que su origen está en la generación de sales insolubles formadas producto de la abundancia de sílice (atribuible a la crisocola perteneciente a la familia de los filosilicatos) y al ambiente fuertemente ácido de la prueba.
- El cobre en la cabeza se encuentra distribuido principalmente en tamaños inferiores a 1/4", salvo el módulo 4447B que muestra un extraño alto contenido de cobre en la malla 1/2", el cobre en los ripios presenta el mismo comportamiento. La distribución porcentual de finos muestra poco cobre en malla 100# en comparación con el tamaños anterior y una interesante aumento en la malla 400# que puede tener su origen en la falta de lavado de los ripios y/o atrapamiento de cobre por arcillas. La mejor extracción se encuentra en la 100#.
- El análisis mineralógico muestra presencia de arcillas entre un 10% y 15%, yeso entre 5% – 7%, óxidos de cobre entre un 15 y 25%, carbonatos inferiores a 1% y Cu refractario inferior a 2%. Las especies oxidadas de cobre (carbonatos y silicatos) están compuestas principalmente de Crisocola, en menor proporción Malaquita y Atacamita.
- El ácido pasado, fue fuertemente influenciado por los problemas de control operacional experimentados durante el estudio, aun así, fue posible pasar por el lecho una cantidad mayor a la requerida teóricamente (H^+ estequiométrico + 40 K/t por ganga + H^+ en PLS). No es posible referirse con exactitud a los consumos ni compararlos entre cada prueba, ya que los números expuestos son solo las

aproximaciones que permite la mala calidad de la información recopilada. En términos generales los consumos de ácido por ganga (31 – 48 kg/t) son coherentes con el tipo de mineral lixiviado y la razón de riego alcanzada (3.9 – 4.7 m³/t).

- Los problemas de adición de ácido en el riego y el control del mismo riego, afectaron negativamente la recuperación de los módulos, principalmente en el módulo 4446E. Esto significa que una vez corregidos estos problemas la recuperación podría mejorar. El módulo 4447B fue el modulo cuyo lecho tuvo mejor comportamiento y fue menos afectado por la variabilidad en el riego, en consecuencia su recuperación fue alta.
- Todos los módulos fueron re manejados mecánicamente debido al mal estado de la superficie regada y/o a una reducción en la velocidad de extracción.
- El contenido de sílice coloidal en el PLS, antes de comenzar la prueba era de 30 ppm, en noviembre subió a 37.7 y finalmente se estabilizó cerca de los 44 ppm. Estos valores son más altos que los promedios de la industria, pero que se justifican después de un largo periodo tratando minerales silicatados. Mismas muestras analizadas en un laboratorio externo reportaron 10 ppm menos en cada caso. Estas concentraciones de sílice coloidal no reportaron problemas de separación de fases en la planta de SX, sin embargo, es preciso considerar el tema cuando se pretenda aumentar la escala del estudio.

Los resultados obtenidos de esta prueba, se resumen en la Tabla 3.6, la que se muestra a continuación:

Tabla 3.6: Pruebas de Lixiviación en módulos industriales, Resultados finales prueba.

Módulo	4446E	4447A	4447B
Mezcla	MIR	1:1 MIR/Marg MIR	1:1 MIR/ESP
Masa Seca, t	6.702	9.819	9.963

Operación

Dosificación ácido aglomerado, kg/t	57,8	45,8	44,7
Granulometría P80, mm	6,2	8,2	8,9
Régimen de Riego	ON-OFF	ON-OFF	ON-OFF
Altura de Lecho, m	1,0	1,0	1,0
Tiempo de Reposo, días	2,0	2,0	2,0
Tiempo de Lixiviación, días	43,3	41,8	37,1
Solución de Riego	Ref rico - Refino	Ref rico - Refino	Ref rico - Refino
Tasa de riego, l/h/m ²	5,7	9,0	8,2
Razón de riego, m ³ /t	3,9	4,5	4,7

Ácido

Ácido Pasado, kg/t	192,1	168,3	168,1
Cons. de Ácido Bruto, kg/t	151,2	114,0	113,0
Cons. de Ácido Neto, kg/t	31,4	47,5	47,9
Acidez salida en PLS ponderado, gpl	11,3	12,7	12,5
Acidez entrada refino ponderado, gpl	34,7	27,2	26,1

Cobre

Cobre en PLS ponderado, gpl	22,7	11,4	10,9
Cobre Extraído, t	529,4	427,3	426,2
Extracción de Cobre por soluciones, %	76,9	84,9	84,2
Recuperación por ripio	78,1%	85,5%	84,8%
Recuperación estimada	76,0%	76,0%	76,0%

Desde el punto de vista de la recuperación, las mezclas con minerales de baja ley entregaron los valores más altos, ambas entorno del 85%. De acuerdo a lo obtenido en los planes exploratorios, se consideraba un 76% de recuperación como valor aceptable. Este valor también fue superado por la pila de alta ley pura, logrando un 78,1% de recuperación. Igual cosa ocurre con el consumo de ácido neto, ambas mezclas bordean los 48 Kg/t.

En cuanto a la adición de ácido, sobre todo en el riego, existió gran variabilidad lo que atentó contra una mejor recuperación y un pH adecuado en el PLS.

La sílice aportada al sistema por los módulos de prueba no fue un problema en la planta de SX.

Tabla 3.7: Pruebas de Lixiviación en módulos industriales, Cierre de pruebas por sólidos

N°	TONELAJE	HUMEDAD	LEY		Ripios	
			Cu T, %	Cu S, %	LEY	LEY
MODULO	TMS	% (BH)	Cu T, %	Cu S, %	Cu T, %	Cu S, %
4446-E	6.702	13,1	10,12	9,20	2,27	2,07
4447-A	9.819	8,8	5,09	4,88	0,74	0,64
4447-B	9.963	7,6	5,05	4,61	0,72	0,58

Concluido el set experimental, es posible logra concluir que es posible tratar a través por medio de la lixiviación de parámetros ajustados el material de alta ley en el circuito de operación de Minera El Tesoro y, la mejor alternativa que se presenta, es la mezcla con minerales marginales, ya sea del yacimiento Esperanza o del mismo yacimiento Mirador, lo que permite alcanzar una recuperación de 85% y un consumo de ácido que estaría alrededor del 48 kg de ácido por tonelada de mineral seco (véase Tabla 3.7). Si bien el ripio generado aún tiene un alto contenido en cobre, estos podrían disponerse diferenciadamente en el botadero de ripios, en busca de un eventual repaso cuando la condición operativa lo permita.

Figura 19: Extracción de cobre respecto a la razón de lixiviación, módulos industriales 4446E (alta ley).



Figura 20: Extracción de cobre respecto a la razón de lixiviación, módulos industriales 4447A (mezcla Alta Ley Marginal Esperanza).

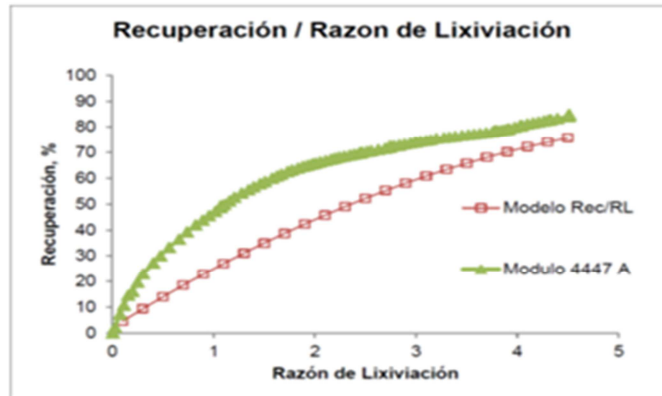
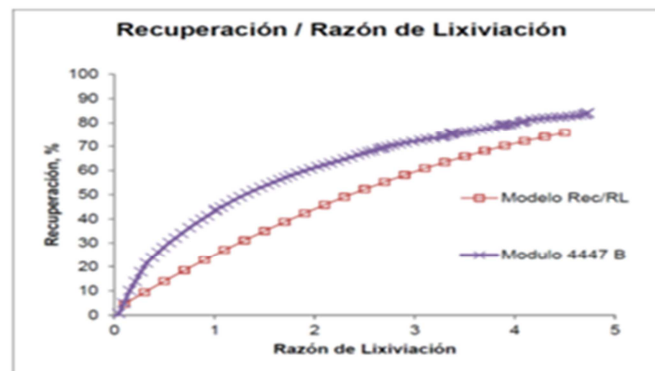


Figura 21: Extracción de cobre respecto a la razón de lixiviación, módulos industriales 4447B (mezcla alta ley marginal mirador).



Con estos parámetros en mente (véase Figura 19-20 y 21), se realiza la evaluación económica de este proceso.

CAPÍTULO V: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE TRATAMIENTO OPTIMIZADO DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ALTA LEY EN MEZCLA

Conocido los rendimientos posibles de alcanzar, utilizando la tecnología de lixiviación dinámica, por etapas, es necesario conocer el valor que genera esta operación para la empresa, lo que se verá reflejado en una evaluación de costos. Serán comparados 3 casos:

- Tratamiento de minerales de Mirador en las condiciones normales de operación, esto es, ley media de cobre total de 1,5%, con una recuperación de 75% y un consumo de ácido de 20 kg/TMS.
- Tratamiento de minerales de Mirador de alta ley, crisocolas con ley cercana a 10% de cobre total con recuperación de 78,1% y un consumo de ácido de 31,4 kg/TMS.
- Tratamiento de minerales de mirador en mezcla, con ley cercana al 5% de cobre total, con un consumo de ácido de 45,7 kg/TMS.

Estos 3 escenarios serán evaluados para comparar la rentabilidad del tratamiento de los minerales de alta ley.

4.1. Parámetros para evaluación.

Para realizar la evaluación económica, se consideran los parámetros contenidos en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1: Parámetros para evaluación económica. Corresponden a una ponderación entre los índices obtenidos por minera El Tesoro, entre los meses de Marzo y Septiembre de 2013.

1. Costo de Operaciones Unitarias Mina (US\$/TH)	
1.1. Perforación	0,046
1.2. Tronadura	0,496
1.3. Carguío	0,257
1.4. Transporte	0,552
1.5. Servicios de Apoyo (Incluye movimientos adicionales)	0,401
1.6. Administración Mina	0,101
2. Costo de Operaciones Unitarias Planta (US\$/TS)	
2.1. Chancado Grueso	0,638
2.2. Chancado Fino	1,540
2.3. Aglomeración	3,534
2.4. Apilamiento	0,613
2.5. Desripio	3,020
2.6. Lixiviación	1,135
2.7. SXEW (US\$/lb Cu)	0,337
2.8. Administración (US\$/lb Cu)	0,045
3. Gerencia (US\$/lb Cu)	
3.1. Gerencia de Operaciones y Desarrollo	0,059
3.2. Planificación	0,026
3.3. Administración	0,005
4. Consumo de ácido (US\$/Ton H+)	
4.1. Tarifa compra y transporte de ácido	235,0

A esto se debe agregar además, US\$ 1 por tonelada de mineral seco tratado, como costo de remanejo en mina, para construcción de tortas de alimentación y asegurar un mezclado óptimo del producto que es alimentado a la planta de chancado.

Con estos parámetros en cuenta, es posible realizar una evaluación económica, la que se muestra en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Evaluación económica Para minerales de alta ley en mezcla, para leyes de 1,5%, 5% y tratados en forma pura.

Mezcla Evaluada		Mirador Ley Proceso	Mirador Alta Ley	Mirador Mezcla
Mineral	TMS	1	1	1
Ley Cu Total	%	1,5	10,12	5,09
Recuperación Esperada	%	75,0	78,1	85,5
Cobre Recuperable	lb	24,8	174,2	95,9
Consumo de ácido	kg/TMS	20,0	31,4	47,5
Costo Operación Mina	US\$/TMS	1,9	1,9	1,9
Costo remanejo (formación tortas mezclas)	US\$/TMS	1,0	0,0	1,0
Costo Operación Planta (Area Seca)	US\$/TMS	10,5	10,5	10,5
Costo de ácido	US\$/TMS	4,7	7,4	11,2
Costo hasta Desripio	US\$/TMS	18,0	19,7	24,5
Costo hasta Desripio	US\$/lb Cu	0,73	0,11	0,26
Costo Área Húmeda (incluye administración)	US\$/lb Cu	0,38	0,38	0,38
Costo Gerencia	US\$/lb Cu	0,09	0,09	0,09
Costo Operación C1	US\$/lb Cu	1,20	0,59	0,73
Precio Venta	US\$/lb Cu	2,90	2,90	2,90
Utilidad por Libra	US\$/lb Cu	1,70	2,31	2,17
Utilidad por Tonelada	US\$/TMS	42,2	403,4	208,5
Mineral Disponible*	TMS	1.986.000	206.000	432.000
Rentabilidad	US\$	83.784.418	83.094.509	90.055.887

* Pensando que el material de dilución presentaría una ley de 0,5% de Cu Total, para lograr la ley de prueba.

Con este antecedente, se aprecia que no existe prácticamente diferencia económica entre tratar los minerales en mezcla, para alcanzar un 1,5% de ley de alimentación (ley que se alimenta a planta en la actualidad) y el tratamiento de los minerales puros. No obstante, el tratamiento de una mezcla que entregue una ley de 5%, presenta una importante mejora en la rentabilidad. Para este ejercicio se considera que las leyes de cobre de los minerales de alta ley son del orden de 10% y la ley de dilución es de 0,5%.

Si, se debe considerar que el ripio que quedaría en el caso del tratamiento de minerales puros (del orden de 2% CuT) y de la mezcla de 5% (ripio del orden de 0,6% CuT), constituyen un recurso que aún tendría rentabilidad y debiera sumarse al beneficio de cada mezcla evaluada.

CONCLUSIONES

Luego del análisis teórico, técnico, del desarrollo de las pruebas a nivel de laboratorio y en escala industrial del tratamiento de minerales de alta ley y de realizar su evaluación económica, es posible llegar a las siguientes conclusiones:

- De las posibilidades analizadas como alternativa de tratamiento, lixiviación por agitación, fundición directa del mineral y lixiviación en pila dinámica, dada la característica silicatada de estos materiales, solamente es posible realizar el tratamiento en pila dinámica, como única alternativa de tratamiento de los minerales de alta ley provenientes del yacimiento Mirador en Minera El Tesoro.
- La lixiviación en pila dinámica, no podría ser realizada en una etapa, dada las dosis prohibitivas de ácido a nivel industrial, que deberían ser inyectadas en el tambor aglomerador, sólo por cálculo estequiométrico. Por lo anterior, la lixiviación dinámica necesariamente debiera ser realizada en etapas. Esto, a través de una secuencia de detención, embebido o macerado ácido, reposo y nueva puesta en servicio.
- Las pruebas de lixiviación arrojaron que el mecanismo controlante de la reacción es el paso de ácido sulfúrico a través del lecho de mineral. Desde este punto de vista, la optimización del proceso apunta a lograr la mayor razón de lixiviación posible en el circuito de lixiviación dinámico. Para ellos debieron ser ajustadas la altura del lecho, la concentración de ácido en el refino y disminuir al máximo la alimentación de mineral al tambor aglomerador, de tal manera de lograr la máxima dosis de ácido que los sistemas de inyección que permitan los actuales equipos.
- Las prueba a nivel industrial, arrojan una recuperación de cobre de 78% para el tratamiento de minerales de alta ley puro, con una ley alimentada a proceso de 10%; con un consumo de ácido de 31,4 kg/TMS. Dejando en los rípios del material de salida, una ley de cobre total de 2,27%. Lo anterior, logrando una razón de

lixiviación de 3,9 m³/TMS, que equivale a 2,2 veces la razón de lixiviación del material tratado usualmente en las pilas dinámicas de Minera El Tesoro.

- Las pruebas a nivel industrial, arrojan una recuperación de cobre de 85% para el tratamiento de minerales de alta ley en mezclas, con una ley de cabeza de 5% de cobre total, con un consumo de ácido de 48 kg/TMS. Dejando en los rípios del material de salida, una ley de cobre total de 0,72%. Lo anterior, logrando una razón de lixiviación de 4,7 m³/TMS, que equivale a 2,9 veces la razón de lixiviación del material tratado usualmente en las pilas dinámicas de Minera El Tesoro.
- La evaluación económica indica que existe una importante ventaja en tratar los minerales en mezcla, diluyéndolos hasta un 5% de ley de cobre total, entregando un rípio de ley 0,72%, que aún es posible de reprocesar y lograr mejorar aún más el beneficio obtenido.
- El tratamiento de los minerales puros, no presenta una ventaja importante, a nivel económico, respecto a lo que sería el tratamiento en mezcla con materiales de dilución, alcanzando leyes habituales de alimentación, del orden de 1,5% de ley de cobre total. Eso sí, el rípio generado de los materiales de alta ley, poseería una ley aún atractiva, del orden de 2%, que entregaría una importante ventaja, respecto a la mezcla anteriormente mencionada.
- Bajo estos criterios, la forma óptima de tratamiento de los minerales de alta ley, en el circuito de lixiviación actual de Minera El Tesoro, sería la mezcla con materiales de dilución hasta alcanzar un 5% de ley, cargados a una altura de 1 m., con la máxima dosis de ácido en el tambor aglomerador, que los sistemas de inyección permitan y con el riego con refino enriquecido en ácido y un ciclo de detención, macerado ácido, reposo y puesta en servicio. Esto permitiría además, recuperar mineral de baja ley, que hoy no es competitivo con el mineral alimentado regularmente a proceso.

- Dado que el tratamiento se realizaría siempre al interior de faena, no existirían interferencias externas, por lo que, las evaluaciones de impacto social no fueron desarrolladas.

NOMECLATURA

"	Pulgada. Unidad de longitud
#	Número
%H(BH)	Porcentaje de Humedad en base húmeda
Ca	Calcio. Alusivo a las leyes o concentraciones
Co	Cobalto. Alusivo a las leyes o concentraciones
CO3	Carbonato. Alusivo a las leyes o concentraciones
CuS	Cobre Soluble. Alusivo a las leyes o concentraciones
CuT	Cobre Total. Alusivo a las leyes o concentraciones
E	Equipo de extracción, alusivo al proceso de Extracción por Solventes
EG	Energía de Gibbs
EO	Electro Obtención. Proceso de precipitación de cobre por corriente forzada
ESP	Esperanza. Yacimiento
Fe	Hierro, alusivo a concentración
Gpl	Gramos por litros. Unidad de Concentración
HDPE	High Density Poli Ethylen (Polietileno de alta densidad).
Hr	Horas. Unidad de medida de tiempo
IX	Intercambio iónico. Proceso de traspaso de soluto de un medio a otro
Kg	Kilogramos. Unidad de masa.
km/KM	Kilometro
l / hm ²	Litros por hora y metro cuadrado. Unidad de caudal por área regada
l/s	Litros por segundo. Unidad de caudal
Lb	Libra
m ³	Unidad de Volumen.
MET	Minera El Tesoro
Mg	Magnesio. Alusivo a las leyes o concentraciones

MIR	Mirador. Yacimiento
Mm	Milímetros
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
Mt	Metro. Unidad de medida
NW	Noroeste
pH	Nivel de acidez
PLS	Packing Leaching solution (Solución Pilas de Lixiviación)
ROM	Run of mining. Mineral a la granulometría posterior a la tronadura
RSE	Responsabilidad Social Empresarial
S	Equipo de Re-extracción, alusivo al proceso de Extracción por Solventes
Si	Sílice. Alusivo a las leyes o concentraciones
SIN	Sistema Interconectado Norte.
SX	Solvent Extraction. Extracción por Solventes. Proceso de intercambio iónico
T°C / T(°C)	Temperatura en grados celsius.
TMS	Tonelada de mineral seco
ton/H	Tonelada por Hora. Unidad de flujo de masa
US\$	Dólares
US\$/lb	Dólares por tonelada de mineral seca
US\$/T H+	Dólares por tonelada de ácido
US\$/TH	Dólares por tonelada de mineral humedad
US\$/TS	Dólares por libra de cobre

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, V. (2013). *Nómina tarifas para metales* (circular n° 160). Recuperado de Empresa Nacional de Minería, ENAMI: <http://www.enami.cl//images/stories/pdf/tarifas>.
- Benavente, O. (2010). *Hidrometalurgia I*. Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile.
- Dómic, E. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Chile: Andros Impresos.
- Hydrocopper (2006, octubre). *Optimizando la cadena de producción de cobre*. Documento presentado en primer Taller Internacional de Procesos Hidrometalúrgicos Hydroprocess, Iquique, Chile.
- Kvarner Metals (1997). *Proyecto El Tesoro, Estudio de Factibilidad Informe Final 75.000 TPA, Volumen 1, (6-5) Davy non ferrous division*, Santiago, Chile.
- Meseguer, J., Lozano, L., y García, D. (1999). Una contribución al estudio de la solubilidad del $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ en medio acuoso. *Revista de Metalurgia*, 35, 47-52.
- Minera El Tesoro (2011). *Reporte de Sustentabilidad* (1° ed.). Sierra Gorda, Chile.
- Minera El Tesoro, R. d. (2012). páginas 10-11.
- Reghezza, A. (2000). *Fundamentos de la Lixiviación*. ARIMET. Calama, Chile, 4-13.
- Reghezza, A. (2012a). *Disolución y caracterización óxidos complejos de Tesoro ¿cómo mejorar su lixiviabilidad?* ARIMET. Calama, Chile.
- Reghezza, A. (2012b). *Lixiviación de Óxidos Silicatados de Alta Ley de Cobre*. páginas 4 – 11 (Paper).

Riveros, G. (2009). *Curso MI 51 A Pirometalurgia, Departamento de Ingeniería en Minas* [Apuntes de clases]. Recuperado 12 de febrero de 2013, de <http://es.scribd.com/doc/115818349/44181633-Curso-Pirometalurgia-USACH>

Parra, R. A. (2012). Análisis termodinámico del comportamiento de la crisocola en reactores de fusión y/o conversión [Resumen]. p.1.