

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**"EVALUACIÓN DE LA PLANTA METALÚRGICA
DE CHOQUECOTA MEDIANTE PRUEBAS
DE LIXIVIACIÓN"**

TESIS

Presentada por:

Bach. Sandra Corina Tarqui Pérez

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

EVALUACIÓN DE LA PLANTA METALÚRGICA
DE CHOQUECOTA MEDIANTE PRUEBAS
DE LIXIVIACIÓN

Tesis sustentada y aprobada el día 18 de octubre de 2018, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE


.....

Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO


.....

Mgr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

VOCAL


.....

Mgr. Raúl del Pozo Tello

ASESOR


.....

Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado primeramente a Dios, por su amor perpetuo y misericordia hacia mí. Por ser mi apoyo en mis momentos de debilidad y darme la fuerza que necesito para lograr mis objetivos.

A mis padres, por su amor, trabajo y preocupación en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Es un orgullo y privilegio ser su hija.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome y brindándome su apoyo moral a lo largo de mi vida.

A todas las personas, amigos y docentes que han hecho que el trabajo se realice con éxito.

AGRADECIMIENTO

Agradecida a Dios por bendecirme y guiarme cada día de mi vida y permitirme llegar a vivir este momento tan especial. Por darme la alegría con gozo inefable que tanto anhele. Gracias amado Dios.

Gracias a mis padres: Rubén, Fresia y Verónica por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios inculcados.

Agradecida a mis docentes y compañeros de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Materiales de Tacna, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión, de manera especial, al Dr. Tolomeo Soto Pérez director de la escuela y al Ing. Zoilo Valdivia, asesor de mi trabajo.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.1.2. Problemática de la investigación	5
1.2. Formulación del problema	5
1.3. Justificación e importancia	6
1.4. Alcances y limitaciones	6
1.5. Objetivos	6
1.5.1. Objetivo general	6
1.5.2. Objetivos específicos	7
1.6. Hipótesis	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes del estudio	8
2.2 Bases teóricas	9

2.2.1 Lixiviación	9
2.2.2. Lixiviación en pilas	10
2.2.3. Principales variables en el proceso de lixiviación	17
2.2.4. Métodos de lixiviación	37
2.2.5. Aglomeración-curado	42
2.2.6. Química elemento cobre	46
2.2.7. Química de lixiviación del cobre	47
2.2.8. Termodinámica del cobre	51
2.3 Definición de términos	57
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	
3.1 Tipo y diseño de la investigación	61
3.2 Población y muestra	62
3.2.1. Población	62
3.2.2. Muestra	62
3.3 Operacionalización de variables	63
3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos	64
3.5 Procesamiento y análisis de datos	64
3.5.1. Equipo / herramientas / materiales	64
3.5.2. Evaluación del mineral	65

3.5.3. Pruebas de lixiviación en columnas	70
3.5.4. Pruebas	74
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. Resultados	76
4.2. Discusión	84
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXOS	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidad de disolución	21
Tabla 2. Distribución de granos, minerales y superficies libres	24
Tabla 3. Contenido metálico del mineral de botaderos	65
Tabla 4. Análisis granulométrico del mineral	66
Tabla 5. Determinación humedad natural	67
Tabla 6. Densidad aparente	68
Tabla 7. Determinación gravedad específica	68
Tabla 8. Prueba de lixiviación en la columna 1, sin curado	76
Tabla 9. Balance metalúrgico de la columna 1, sin curado	77
Tabla 10. Prueba de lixiviación en la columna 2, sin curado	78
Tabla 11. Balance metalúrgico de la columna 2, sin curado	79
Tabla 12. Prueba de lixiviación en la columna 3, con curado	80
Tabla 13. Balance metalúrgico de la columna 3, con curado	81
Tabla 14. Prueba de lixiviación en la columna 4, con curado	82
Tabla 15. Balance metalúrgico de la columna 4, con curado	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una pila de lixiviación estática y sus principales elementos	28
Figura 2. Base impermeable	30
Figura 3. Apilador móvil	31
Figura 4. Rotopala para descarga de ripios	31
Figura 5. Flujo de aire a través de la pila (modelado en 2D)	32
Figura 6. Humectación y regadío	34
Figura 7. Aspersores y goteo	35
Figura 8. PLS Cerro Verde	36
Figura 9. Lixiviación en botaderos	38
Figura 10. Lixiviación en bateas	39
Figura 11. Lixiviación in situ	40
Figura 12. Lixiviación por agitación	41
Figura 13. Diferencia entre la percolabilidad de un material no aglomerado y aglomerado	43
Figura 14. Diferencia entre el flujo en un mineral aglomerado y no aglomerado	44
Figura 15. Tambor rotatorio	45

Figura: 16. Descripción general de la lixiviación de sulfuros de cobre y transporte de electrones	51
Figura: 17. Equilibrio químico	56
Figura:18. Etapas de las pruebas	61
Figura: 19. Mineral de la cancha gruesos	63
Figura 20. Instalación columnas de lixiviación	73
Figura 21. Carguío de las columnas de lixiviación	74
Figura 22. Altura vacía en la columna de lixiviación	74
Figura 23. Control de tasa de riego	74
Figura 24. Toma de muestras de PLS para el análisis químico	75
Figura 25. Recuperación de Cu lixiviable sin curado 35 kg/t	84
Figura 26. Recuperación de Cu lixiviable sin curado 45 kg/t	85
Figura 27. Recuperación de Cu lixiviable con curado 35 kg/t	86
Figura 28. Recuperación de Cu lixiviable con curado 45 kg/t	87
Figura 29. Recuperación de Cu lixiviable	88

RESUMEN

En la Planta metalúrgica de Choquecota, perteneciente a la Empresa Minera D´Cobre (E.M. D´Cobre), ubicada en la ciudad de Oruro – Bolivia, se realizó desde el 10 de marzo hasta 30 abril 2017, el presente trabajo de investigación, en la experiencia práctica se estudió los parámetros como la granulometría, flujo de riego, concentración de ácido, tiempo de curado, altura de las columnas, tiempo de lixiviación y la recuperación de cobre a medida que avanza un intervalo de tiempo en el proceso de lixiviación del mineral chancado y curado, se utilizó como agente lixivante una solución pobre de cobre o ILS. Esto se realizó a través del proceso de lixiviación en columnas con un mineral de cobre oxidado con una ley de 1,67 % cobre total (CuT).

Las pruebas realizadas incrementaron la recuperación de cobre del 34,09 % al 72,22 %, además demostraron que la muestra analizada con un proceso de curado entre 35-45 kg/t de ácido tuvo la mayor recuperación de cobre durante el tiempo que duró la experiencia.

INTRODUCCIÓN

La hidrometalurgia es una disciplina de la metalurgia extractiva, que se ocupa de los métodos y la ciencia de la extracción de metales por medios acuosos (Havlík, 2008). La hidrometalurgia involucra varios aspectos, e incluye todas las formas de extracción de materiales de la corteza terrestre por medio de lixiviación y recuperación del fluido. Se ocupa principalmente de minerales, sales y otras soluciones de ocurrencia natural, pero la teoría y la práctica pueden extenderse a contaminantes introducidos por la actividad humana a los suelos o hasta los procesos geológicos secundarios que dan lugar a yacimientos. Por tanto, la hidrometalurgia es un campo interdisciplinario que involucra a la geología, química, hidrología, metalurgia extractiva, ingeniería de minas, ingeniería de procesos y economía (Bartlett, 1998).

La E.M. D´Cobre tiene la tercera planta hidrometalúrgica en Bolivia y se encuentra ubicada en el pueblo de Choquecota, provincia de Carangas, departamento de Oruro-Bolivia, con una altitud de 3900 msnm.

Su yacimiento se encuentra ubicado en el pueblo de Turco provincia de Sajama, departamento de Oruro-Bolivia, contiene minerales oxidados de cobre, estos minerales

son extraídos de la mina 5, que son trasladados en camiones de 15 cubos a la planta metalúrgica que trata entre 30-40 t/día.

En planta cuentan con una etapa de chancado, lixiviación en pilas, extracción por solventes y electroobtención, para finalmente obtener cátodos de alta pureza de cobre 99,999 %

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

El estudio está enmarcado en el área de la hidrometalurgia, este proceso se realiza en la Planta Metalúrgica de la E.M. D´Cobre, utilizando los equipos de chancado para preparar las muestras de mineral oxidado de cobre.

La ley de mineral es de 1,67 % CuT y su recuperación de cobre en pilas es el 30 %, el cual puede ser incrementado con un mejor control de las pilas de lixiviación que existen en planta, y la forma adecuada de mejorar la extracción de cobre es hacer pruebas de lixiviación en columnas donde el mineral tendrá la misma granulometría y el mismo flujo de riego, variando la concentración del ácido sulfúrico en el curado con la idea de obtener un incremento y control en la recuperación.

Parámetros a considerar: taza de riego, dosificación de ácido, tiempo de lixiviación, tiempo de curado, granulometría, ley, y a partir de ellos se establecen los indicadores.

1.1.1 Antecedentes del problema

La lixiviación acida es el proceso más utilizado para la recuperación de cobre desde minerales oxidados o sulfurados. La rentabilidad de esta

operación va a estar determinada por el consumo de ácido y el grado de extracción de cobre. Se sabe que un aumento en la concentración de ácido en la solución lixivante impulsa una mayor recuperación de cobre, pero también se produce un elevado consumo, lo que repercute negativamente en la economía del consumo del proceso. De estudios anteriores se sabe que, con una adecuada selección del nivel de concentración de ácido y óptimo proceso de lixiviación, es posible incrementar la recuperación de cobre sin generar mayores costos.

De esta forma el objetivo principal de este trabajo es la evaluación de la planta metalúrgica de Choquecota mediante pruebas de lixiviación en columna y el estudio del mecanismo involucrado en la cinética del consumo de ácido y la recuperación del cobre de un mineral al variar las concentraciones del ácido sulfúrico en el aglomerado. En las pruebas experimentales de lixiviación se utilizó solución de lixiviación descargada (ILS) en las columnas, diferenciadas porque en algunas el mineral fue aglomerado y en otras el mineral fue regado directamente. Se analizó el efecto de la concentración de ácido sobre el mineral de lixiviación utilizando las siguientes concentraciones: 35 y 45 kg/t. Luego, para la determinación de los datos experimentales se analizó mediante el equipo

de absorción atómica, la solución lixiviada con el fin de identificar los mecanismos involucrados en los procesos de lixiviación.

Como resultado principal del estudio se estableció que la velocidad de consumo de ácido y de disolución de cobre aumentó mediante la concentración de ácido, crecía en el rango de 35-45 kg/t.

1.1.2 Problemática de la investigación

El proceso de lixiviación en Planta no utiliza la etapa de aglomerado - curado y las pilas son estáticas, por lo que el proceso se hace ineficiente para la empresa, por lo cual se sugiere evaluar mediante pruebas de lixiviación en columnas el incremento de la recuperación de cobre con el fin de implementar un tambor aglomerador al área de chancado y sustituir las pilas estáticas por pilas dinámicas.

1.2 Formulación del problema

En el caso de los minerales de cobre en su condición de recurso natural necesita un adecuado proceso de extracción del mineral valioso, para obtener cátodos con una pureza de 99,999 %.

La formulación del problema se puede enunciar: ¿Es posible lograr mejores recuperaciones en los minerales oxidados de cobre de la Minera E.M.D´Cobre,

variando las concentraciones de ácido sulfúrico y las condiciones de tratamiento como es el curado, para que la planta metalúrgica incremente su recuperación?

1.3. Justificación e importancia

Implementar la etapa de aglomerado - curado con el fin de obtener la recuperación ideal en Planta, logrando mejorar el tiempo de lixiviación y el control del proceso; por esto se decide implementar columnas para las pruebas de lixiviación de minerales oxidados con cantidades apreciables de cobre.

1.4 Alcances y limitaciones

Mediante las pruebas en columnas se desea demostrar a la empresa minera, que con un adecuado proceso y determinado tiempo de lixiviación se logra incrementar la recuperación de cobre y alcanzar mayores retribuciones económicas sin mayores gastos operativos en el proceso de extracción del metal precioso. Las limitaciones son la falta de un buen laboratorio metalúrgico para mejor control del proceso.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Evaluar la planta metalúrgica de Choquecota mediante pruebas de lixiviación en columna.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar el cálculo de los ratios de consumo de ácido sulfúrico en el proceso de lixiviación de mineral oxidado de cobre.
- Estudiar la etapa de lixiviación, mediante pruebas en columnas, con diferentes concentraciones de ácido.

1.6. Hipótesis

Es posible evaluar la planta metalúrgica de Choquecota mediante pruebas de lixiviación en columna, variando las concentraciones de ácido sulfúrico en el proceso de lixiviación.

Al finalizar las pruebas en columnas se determinará el cálculo de los ratios de consumo de ácido sulfúrico del mineral oxidado de cobre.

Las pruebas de lixiviación en columna son la forma adecuada para el estudio del proceso en la etapa de lixiviación en pilas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

En el distrito Minero de la localidad de Turco, provincia de Sajama en Oruro, hay yacimiento de cobre que se conoce desde hace muchos años y que se realizaron tratamientos de minerales sulfurados en menor escala y en mayor escala minerales oxidados de cobre. La E.M. D´Cobre decidió sacar adelante un proyecto con recursos propios de nacionalidad china, logrando instalar una planta con las siguientes etapas: lixiviación - extracción por solventes y electroobtención, ubicado en la localidad de Choquecota, provincia de Carangas.

Los procesos hidrometalúrgicos son los más convenientes, técnica como económicamente, para la recuperación de metales a diferencia a otros procesos tradicionales. En el país de Bolivia se tiene empresas que aplican el proceso hidrometalúrgico de cobre como son; Kim Kim y la Comibol, ambas ubicadas en la Paz (CoroCoro), las cuales aplican este método de proceso para las soluciones lixiviadas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Lixiviación

Es un proceso hidrometalúrgico que consiste en la recuperación en forma iónica de metales valiosos (Cu, Zn, Au, etc.) de los minerales primarios y/o secundarios por reacciones de disolución efectuadas a condiciones de temperatura ambiente por intermedio soluciones acuosas.

Iones: Materia con carga eléctrica que se obtiene al disolver un compuesto químico. Pueden ser de dos clases, con carga positiva o cationes Cu^{2+} , H^+ , Na^+ , etc. Y con carga negativa o aniones SO_4^- , NO_3^- , SO_2^- , etc.

Solución acuosa (fase acuosa): Es una mezcla líquida de agua con algún compuesto químico ácido o básico disuelto en ella que permiten contener iones metálicos.

En la industria se practican varios métodos para contrastar la fase sólida con la solución acuosa extractante en un espacio confinado. La selección del método de lixiviación depende de:

- Características físicas y químicas de la mena.
- Características mineralógicas.
- Ley de la mena.
- Solubilidad del metal útil en la fase acuosa.
- La cinética de disolución.

- Magnitud de tratamiento.
- Facilidad de operación.

2.2.2. Lixiviación en pilas

La lixiviación en pilas es el método hidrometalúrgico más importante en la extracción de cobre. El mineral de cobre es apilado, en alturas que usualmente superan los 7 metros, con áreas superficiales que van desde 0,1 a 1 km². El lixivante que contiene H₂SO₄ es aplicado en la superficie de la pila, desde donde percola a través del lecho mineral, disolviendo los minerales de cobre, para producir una solución enriquecida de cobre o PLS, que es colectada en una superficie inclinada e impermeable que se encuentra debajo de la pila, para ser transportada por medio de tuberías hasta la poza de soluciones ricas, y posteriormente a los circuitos de extracción por solventes y electro-obtención (Metallurgium, 2013).

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. Usualmente se recomiendan tres pruebas (R. Soto, Octubre 2012):

- a) **Pruebas de agitación** con muestras de aproximadamente hasta de 500 g de mineral finamente molido, las que indican la máxima

recuperación posible y el consumo aproximado de reactivos. (Pruebas de botella).

- b) **Pruebas en columna** de laboratorio, con muestras de 50 a 500 kg de mineral, que permiten determinar efectos de granulometría y una mejor aproximación a los valores reales de recuperación y consumo de reactivos.
- c) **Prueba a nivel piloto** con algunas **toneladas** de mineral, permite controlar los parámetros metalúrgicos y establecer además la compactación y porosidad de la pila. Con lo anterior, es posible determinar la aplicabilidad del método tanto en términos técnicos como económicos.

Una vez preparado el mineral, se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada para proceder a su riego con la solución lixivante. Tras percolar a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos (solución rica o PLS) que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (sal o metal).

Proceso de lixiviación:

Empezaremos por los yacimientos de cobre de minerales oxidados. Para la obtención del cobre, estando el mineral en planta, se realizan tres etapas:

Primera etapa:

a) **Chancado:** el material extraído de la mina, que contiene minerales oxidados de cobre, es fragmentado mediante un chancado primario y secundario, con el objeto de obtener un material mineralizado de un tamaño máximo de 3,81 a 1,9 cm (1,5 a 3/4 de pulgada). Este tamaño es suficiente para dejar expuestos los minerales oxidados de cobre a la infiltración de la solución ácida.

b) **Formación de la pila:** el material chancado es llevado mediante cintas transportadoras hacia el lugar que se formará la pila. En este trayecto el material es sometido a una primera irrigación con una solución de agua y ácido sulfúrico, conocido como proceso de curado, de manera de iniciar ya en el camino el proceso de sulfatación del cobre contenido en los minerales oxidados. En su destino, el mineral es descargado mediante un equipo esparcidor gigantesco que lo va depositando ordenadamente formando un terraplén continuo de 6 a 8 metros de altura: la pila de lixiviación. Sobre esta pila se instala un sistema de riego por goteo y aspersores que van cubriendo toda el área expuesta. Bajo las pilas de material a lixiviar se instala previamente una membrana impermeable sobre la cual se dispone un sistema de tuberías ranuradas que permiten recoger las soluciones que se infiltran a través de la pila.

c) **Sistema de riego:** a través del sistema de riego por goteo y de los aspersores, se vierte lentamente una solución ácida de agua con ácido sulfúrico en la superficie de las pilas. Esta solución se infiltra en la pila hasta su base, actuando rápidamente. La solución disuelve el cobre contenido en los minerales oxidados, formando una solución de sulfato de cobre, la que es recogida por el sistema de drenaje y llevada fuera del sector de las pilas en canaletas impermeabilizadas. El riego de las pilas, es decir, la lixiviación se mantiene por 45 a 60 días, después de lo cual se supone que se ha agotado casi completamente la cantidad de cobre lixiviable. El material restante o ripio es transportado mediante correas transportadoras a botaderos donde se podría reiniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer el resto del cobre. En el proceso de lixiviación obtienen soluciones de sulfato de cobre (CuSO_4) con concentraciones de hasta 9 gramos por litro (gpl) denominadas PLS que son llevadas a diversos estanques o pozas donde se limpian eliminándose las partículas sólidas que pudieran haber sido arrastradas. Estas soluciones de sulfato de cobre limpias son llevadas a la planta de extracción por solventes.

Segunda etapa: extracción por solventes (SX)

Tercera etapa: electroobtención (EW)

Recirculación de soluciones

La recirculación de soluciones se puede hacer directamente con bomba al sistema de distribución de la solución o bien ser bombeadas a un estanque elevado, para desde allí realizar el proceso. Este estanque debe ubicarse a una altura tal que permita lograr una presión de trabajo de 20 a 60 psi. Máximo en los rociadores. Estos rociadores deben ubicarse en forma tal que cubran la parte superior de la pila y además rieguen los taludes laterales.

Para la recirculación de las soluciones la estación de bombeo y los circuitos de distribución de soluciones deben ser tales que permitan la máxima versatilidad del sistema con el mínimo de inversiones.

Agentes lixiviantes

La selección del agente químico extractante depende de su disponibilidad, costo, estabilidad química, selectividad, facilidad de producir y regenerar, que permite la recuperación del cobre de la solución acuosa en forma económica. Desde el punto de vista químico los agentes utilizados en la lixiviación del cobre se clasifican en:

Ácidos inorgánicos:

- Ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico

Bases:

- Hidróxido de amonio.

Agentes oxidantes:

- Amoníaco, sales de amonio, cianuros, carbonatos, cloruros

Agentes acomplejantes:

- Amoníaco, sales de amonio, cianuros, carbonatos, cloruros.

El ácido sulfúrico es el agente lixivante más ampliamente utilizado en la lixiviación del cobre, por las razones de calidad química, costo de fabricación y disponibilidad. Una fuente de producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4), es el SO_2 producido en las fundiciones de cobre lo que permite disminuir la polución y obtener ácido como subproducto a un costo relativamente bajo. El consumo de ácido sulfúrico es un ítem de costo altamente significativo en el proceso extractivo, especialmente en las plantas de mediana y baja capacidad, ya que por cada kg de cobre producido se consumen de 2,5-7 kg de ácido (según la mena). El consumo de ácido absorbe de un 20 a 40 % del costo de producción unitario. El oxígeno atmosférico y el ión férrico producido por acción bioquímica sobre

minerales son los agentes oxidantes más económicos y empleados en los sistemas lixiviantes oxidantes para el cobre.

Características de una lixiviación ideal (R. Soto, octubre 2012):

- Debe maximizar la recuperación metalúrgica y minimizar consumos de ácido, de agua y de energía.
- Debe anular los efectos de eventuales reductores, arcillas intercambiadoras iónicas y silicatos complejos en el mineral.
- El curado, si se usa debe adoptar dosis calculadas de modo que sean compatibles: una máxima ganancia de cinética, un mínimo potenciamiento del consumo de ácido y contribución de exceso a la solución rica, y una nula o mínima incorporación de impurezas solubles a las soluciones ricas.
- Debe evitar la formación de capas freáticas e inundaciones localizadas, que se traducen en canalizaciones y deslizamientos o derrumbes del apilamiento.
- Debe permitir idealmente, el tratamiento conjunto de minerales de diversa mineralogía, incluidas especies de óxidos y de sulfuros.
- Debe permitir administrar el comportamiento del hierro de modo que:
 - Se mantengan en solución las cantidades y proporciones "férrico-ferroso" para producir las interacciones deseadas, en cuanto a: la

regeneración de ácido, a la creación de condiciones oxidantes y a la co-precipitación de impurezas.

- Se mantengan en solución los contenidos necesarios para el comportamiento adecuado de bacterias en la lixiviación de sulfuros.
- Se evite la formación de precipitados férricos coloidales que fomenten canalizaciones de soluciones.
- Se permita la remoción de agua de esos precipitados, cuando ellos inevitablemente se formen.
- Debe generar una solución rica limpia, sin sólidos suspendidos, coloides, fierro, cloro, manganeso y sulfatos totales, para minimizar peligros de borras y de traspasos al electrolito que causen descartes y consumos de agua tratada, aditivos y energía en calentamiento.

2.2.3. Principales variables en el proceso de lixiviación:

Durante la lixiviación, cambios físicos, químicos y biológicos, toman lugar en el lecho mineral bajo irrigación, dichos cambios afectan el grado de extracción del metal, por lo cual deben asegurarse las condiciones óptimas para el proceso. Las principales variables involucradas en la lixiviación se exponen a continuación.

Tamaño de partícula

El tamaño y la forma son factores que determinan el área superficial de una partícula. Las reacciones involucradas en la disolución mineral son de carácter heterogéneo, en las cuales la velocidad de reacción es dependiente del área interfacial. Es por ello, que la cinética de lixiviación es afectada por el tamaño de partícula del mineral, un tamaño de partícula menor produce una disolución rápida, ya que las partículas más finas tienen mayores superficies específicas. Otro aspecto importante es la forma en la cual las fases minerales se distribuyen y asocian dentro de la partícula, pues cabe la posibilidad de que se lleven a cabo interacciones galvánicas que aceleren la velocidad de disolución, tal es el caso de la interacción entre la pirita y la calcopirita (Wadsworth M. E., 1986).

Concentración de ácido en la solución lixivante

Optimizar la concentración de ácido se convierte en un ejercicio necesario para disminuir el consumo de ácido, porque generalmente, es el reactivo de mayor costo. Si la concentración de ácido es inferior a la óptima, se estará comprometiendo la recuperación de cobre, mientras que un incremento de la concentración de ácido en las soluciones lixivantes permite alcanzar mayores recuperaciones de cobre, aunque también se produce un elevado consumo de ácido.

Flujo específico de soluciones

El flujo lixivante determina la velocidad de transporte de los reactivos y productos hacia y desde la pila, usualmente puede variar entre 5 a 30 L/m².h dependiendo del tamaño de partícula y altura de la pila. Generalmente se optimiza la combinación flujo específico-altura de pila, de forma que las soluciones ricas no se diluyan.

Altura de pila

La altura del lecho mineral está determinada por su permeabilidad (líquida en el caso de los óxidos y también gaseosa en el caso de los sulfuros, debido a la necesidad de oxígeno). La presencia de arcillas, la formación de precipitados y exceso de finos pueden disminuir la permeabilidad, resultando en canalizaciones de flujo preferencial y una eventual acumulación de soluciones en la superficie, restringiendo el acceso uniforme de ácido y aire. En general la tendencia es a no superar los 8 m por cada nueva capa (Domic Mihovilovic, 2004).

Tiempo de lixiviación

Los ciclos de lixiviación pueden variar ampliamente de acuerdo a la mineralogía de la mena, para óxidos se usan entre 30 y 60 días, para sulfuros depende más aun de la granulometría y la mineralogía, v.g. para sulfuros secundarios, se requieren entre 6 y 9 meses, en cambio de tratarse

de mineral ROM (*run of mine*), es decir aquel que sólo ha sido procesado mediante chancado primario, puede necesitarse años, y si hay calcopirita pueden ser hasta 10 años.

Consumo de agua

Es normalmente bajo y en el caso de la lixiviación en pilas corresponde a la humedad residual de los rípios que se dejan de regar al término de la lixiviación, y a las pérdidas de evaporación y arrastre físico con el viento. Lo habitual es que se requiera menos de 0,5 m³ de agua/t mineral. En los casos de escasez de agua, se prefiere usar goteros (incluso enterrados) y esta cifra puede disminuir a la mitad, al minimizarse las pérdidas por evaporación y arrastre físico del viento.

Influencia mineralógica en la lixiviación en pilas

Desde el punto de vista de la lixiviación las propiedades de interés en un mineral, pueden clasificarse en dos grandes grupos, aquellas propiedades relacionadas a la naturaleza química del mineral (velocidad de disolución, consumo de reactivos), y las propiedades relacionadas a la estructura mineralógica (estructura cristalográfica, imperfecciones, porosidad, etc).

Velocidad de disolución

Las especies mineralógicas procedentes de cada zona de un yacimiento presentan marcadas diferencias respecto a la velocidad relativa a la cual se disuelven. La velocidad de disolución podría clasificarse en grupos, tal como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 1
Velocidad de disolución

CINÉTICA RELATIVA	TIEMPO DE REFERENCIA	ESPECIES MINERALES DE COBRE
MUY RÁPIDA (A temperatura ambiente)	Segundos a minutos Disolución completa	Carbonatos (malaquita, azurita), sulfatos (chalcantita, brochantita y antlerita) y cloruros (atacamita)
RÁPIDA (Requiere mayor acidez)	Horas Disolución completa	Óxidos cúpricos (tenorita) y silicatos (crisocola y dioptasa)
MODERADA (requiere un agente oxidante)	Días a semanas Disolución puede no ser completa	Cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita) y algunos silicatos y óxidos complejos con manganeso (neotocita, copper wad, copper pitch)
LENTA (requiere un agente oxidante)	Semanas a meses Disolución puede ser completa	Sulfuros simples (calcosina, digenita, covelina)
MUY LENTA (requiere un agente oxidante)	Años Disolución es incompleta	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita)

Fuente: Domic Mihovilovic, 2004

Consumo de reactivos

Las especies minerales de la ganga presentan reactividades al ácido que dependen fundamentalmente de su composición. Es posible clasificar a la ganga según su reactividad en (Dreier, 1999):

- **Ganga altamente reactiva:** Esta categoría incluye especies minerales carbonatadas (calcita, dolomita, siderita, etc.), que reaccionan con el ácido con rapidez.
- **Ganga medianamente reactiva:** Esta categoría significa la probable existencia de cantidades significativas de hornblenda, piroxenos y plagioclasa cálcica. Estas especies se disuelven relativamente rápido comparadas con otros silicatos, las soluciones van perdiendo el ácido contenido y su oxidante, es decir aumenta el pH y disminuye el Eh.
- **Ganga moderadamente reactiva:** En esta categoría se encuentran la ortoclasa, biotita, albita y cuarzo.
- **Ganga no reactiva:** las areniscas cuarcíferas son casi inertes a las soluciones de lixiviación.

Estructura cristalográfica

Dado que las superficies cristalinas no son completamente lisas, aun cuando se formen bajo condiciones ideales de equilibrio, estas contienen características micro-topográficas irregulares, que originan la presencia de

superficies más reactivas y menos reactivas en el mineral. Para sistemas heterogéneos, las velocidades de reacción se relacionan tanto con la superficie total como con el número de sitios reactivos por unidad de área que están disponibles para la reacción (Wadsworth M. E., 1986).

Imperfecciones mecánicas

La actividad bacteriana inicial en la superficie de los sulfuros minerales ocurre a lo largo de las grietas, fracturas, alineaciones, límites de grano, y zonas de contacto del mineral. Las imperfecciones mecánicas son desviaciones de las estructuras cristalinas del sulfuro. Dichos defectos usualmente contienen grandes cantidades de tensión angular (*strainenergy*) debida a los ángulos de enlace moleculares. La energía relacionada a la tensión del cristal, puede ser usada por las bacterias durante los procesos de oxidación mineral (Roden, 2008).

Distribución de granos minerales y superficies libres

Los granos minerales pueden clasificarse de acuerdo a su accesibilidad a las soluciones lixiviantes en cinco clases, tal como se ilustra en la Tabla 2 los tipos D y E no contribuyen a la velocidad de disolución, al menos en las primeras etapas de lixiviación, pero pueden llegar a ser importantes para el proceso, si como resultado del contacto prolongado con las soluciones de lixiviación, nuevos poros y fisuras son generados en la

ganga, haciendo entonces accesible las soluciones de lixiviación. Para las partículas de los tipos mostrados en la Tabla 2, pueden identificarse cuatro tipos de regímenes.

Tabla 2
Distribución de granos, minerales y superficies libres

	A	B	C	D	E
CLASES	Los granos minerales están expuestos a las soluciones de lixiviación en la superficie de las partículas.	Los granos minerales expuestos a las soluciones de lixiviación por medio de los poros y fracturas conectados a la superficie de las partículas.	Los granos que son expuestos a las soluciones de lixiviación solo después de que otros granos han reaccionado.	Los granos en los cuales los poros y las fisuras no se extienden a la superficie de la partícula.	Los granos localizados dentro de las partículas y que no están conectados a los poros.

Fuente: Ghorbani, Becker, Mainza, Franzidis, & Petersen, 2011

Porosidad

La velocidad de reacción de una partícula con un reactivo en la fase fluida, en la que se encuentra inmersa, es usualmente controlada por la difusión molecular a través de una capa límite del fluido o por la reacción en la superficie. Si la partícula contiene fracturas o agujeros abiertos al fluido, el reactivo se difunde hacia el interior de la partícula y termina

reaccionando con un grano mineral, por lo tanto, el área sobre la cual la reacción toma lugar no es sólo el área externa sino el área total incluyendo todos los poros abiertos, siendo la porosidad un factor importante en la velocidad de reacción mineral.

Influencia del método de conminución

La distribución de fracturas en la partícula juega un papel importante en la exposición parcial de los granos minerales. Esto relaciona el comportamiento durante la lixiviación con el método en el cual el mineral ha sido chancado. En el caso de las llamadas trituradoras de rodillos de alta presión o HPGR (*high pressure grinding rolls*), tecnología que ha estado disponible en los últimos años, han demostrado ser de 20 % a 50 % más eficientes en el uso de la energía que las chancadoras convencionales, obteniendo productos con mayor cantidad de fracturas en los límites de grano, dando un mejor acceso a las soluciones de lixiviación dentro de la partícula (Ghorbani, Becker, Mainza, Franzidis, & Petersen, 2011).

Construcción de la pila

El diseño de la pila constituye la parte fundamental del proceso y sobre ella debe darse la mayor atención. Inciden en ella diversos factores que es necesario analizar como son:

Tipos de pila:

Se conocen dos tipos básicos de pilas de lixiviación.

a) Pila permanente: En la cual la mena es depositada en una pila desde la que no se retirara el ripio una vez completada la lixiviación. Se utiliza preferencialmente para minerales de baja ley y en lugares que tengan disponible un amplio espacio. Entre sus características generales podemos destacar:

- Son pilas altas para lograr una alta densidad de carga de material por metro cuadrado. Generalmente 5 metros o más.
- Utiliza granulometría elevada.
- La altura queda limitada por las necesidades de oxígeno en el interior de la pila y se alcanza a través de cargas sucesivas de mineral en capas.

b) Pila renovable: En la cual la mena es depositada en una pila desde la cual se retirará el ripio una vez completada la lixiviación. Permite una mejor extracción de minerales de alta ley, y de aquellos con una rápida cinética de lixiviación.

Entre sus características generales se tiene:

- Son pilas relativamente bajas para permitir una rápida carga y descarga de material. Generalmente 2 metros.
- Permite granulometría baja.
- La altura queda definida por el sistema de carga y por la concentración de las "soluciones a obtener.

La decisión acerca del tipo a emplear, en un caso dado, tiene un fundamento económico y está basada en el comportamiento metalúrgico del mineral y en los costos de su manipulación.

Configuración de la pila:

Las pilas renovables o permanentes pueden adoptar la configuración de:

- i) Pilas unitarias: Todo el material depositado pasa simultáneamente por las diversas etapas del ciclo de tratamiento permitiendo una operación más simple y flexible. Carga de una vez la totalidad de la pila y la descarga de una vez al término del ciclo.
- ii) Pila dinámica: En una misma pila coexisten materiales que están en diversas etapas del ciclo de tratamiento. Da un mejor aprovechamiento del piso impermeable. En cada período, que puede ser diario o

múltiplos de la alimentación diaria, descarga un módulo y carga otro módulo, los cuales además van directamente adosados a sus respectivos sectores de la pila, con la condición que no haya contacto entre la mena fresca y el ripio agotado.

Factores a tener en cuenta en el diseño de las pilas:

- La calidad del patio o base de apoyo (impermeable).
- Las facilidades de riego y recolección o drenaje del efluente.
- La estabilidad de la pila seca y saturada en agua.
- Los tanques (piscinas) de soluciones ricas y pobres.
- La forma de apilamiento (Compactación y homogeneidad).

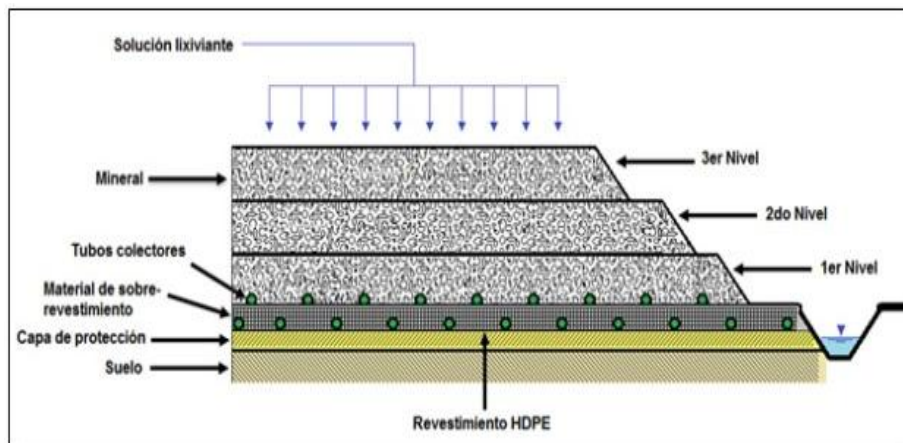


Figura 1. Esquema de una pila de lixiviación estática y sus principales elementos

Fuente: Hydrometallurgy Peru, 2017

Base impermeable

Se necesita disponibilidad de amplias superficies de terreno relativamente llanas (menos de 10 % de pendiente). La cancha debe ser considerada con su sistema de impermeabilización, para controlar las pérdidas de soluciones y evitar contaminaciones del medio ambiente.

La base impermeable tiene como objetivo la recolección completa de las soluciones de lixiviación, así como prevenir la infiltración del suelo subyacente y la contaminación potencial del agua subterránea. La base típicamente consiste en una capa de geomembrana, que puede estar compuesta de polietileno de alta (HDPE) o baja densidad (LDPE) o cloruro de polivinilo (PVC), de espesores del orden de 1 a 2 mm, sobre una capa de arcilla compactada (con un espesor de 0,1 a 0,5 m) y debajo una capa de material finamente chancado (< 2 cm de diámetro). Tuberías de recolección de soluciones PLS y de aireación se colocan sobre esta capa. La base debe tener una inclinación menor al 5 % para evitar el deslizamiento de la pila sobre la geomembrana.



Figura 2. Base impermeable
Fuente: Alan J. Breitenbach – SME, 1997

Apilamiento de mineral

El mineral es apilado sobre la base impermeable por medio de sistemas que varían de acuerdo al tamaño de las instalaciones de cada operación minera. Para operaciones menores (de 300 a 200 t/d) se utilizan camiones y apiladores de correa. Para operaciones mayores (desde 10 000 hasta 50 000 t/d), se usan correas modulares articuladas, que terminan en un apilador de correa. Sin embargo, para faenas aún mayores (de 75 000 a 150 000 t/d), se prefieren sistemas apiladores sobre orugas alimentados con correas estacionarias y móviles.

En pilas dinámicas es necesario remover el material ya lixiviado o ripio, normalmente se utilizan recolectores tipo pala de rueda con capachos o rotopalas.



Figura 3. Apilador móvil
Fuente: Direct Industry, 2014



Figura 4. Rotopala para descarga de ripios
Fuente: Direct Industry, 2014

Aireación

Es necesario suministrar a la pila una adecuada aireación, ya que la lixiviación de sulfuros requiere la presencia de agentes oxidantes, tales como el oxígeno. Esto se logra por medio de tuberías plásticas perforadas,

colocadas aproximadamente 1 m sobre la base de la pila e introduciendo aire por medio de aireadores a baja presión (*blower*). Para pilas de gran tamaño, no es posible utilizar sopladores, por lo que se espera que el aire movido por la convección natural proporcione el oxígeno necesario.

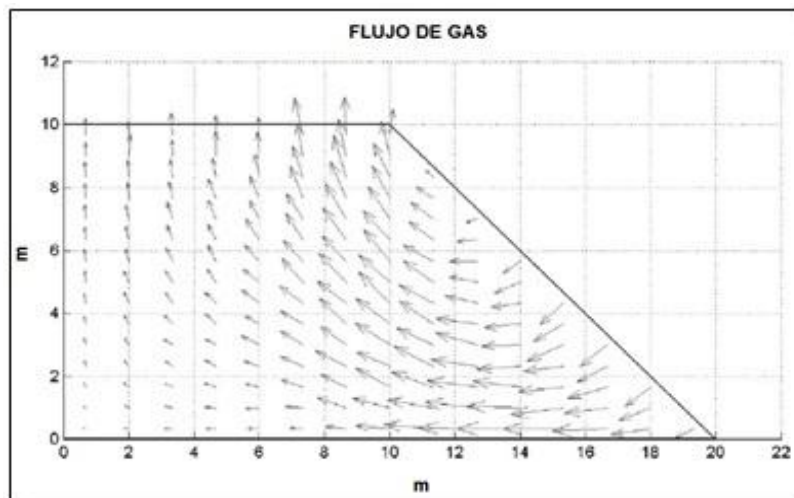


Figura 5. Flujo de aire a través de la pila (modelado en 2D)
Fuente: Sidborn, Casas, Martínez, & Moreno, 2003

Irrigación de la pila

En esta etapa el mineral se deja reposar a fin de que se produzca la adecuada sulfatación del mineral, esto permite que en la pila no se produzcan canalizaciones (Roberto E. Alfaro Cortes, octubre 2013).

El riego de las pilas se puede realizar fundamentalmente por tres procedimientos:

➤ **Riego por goteo**

Asegura un riego eficiente cuando se dan las siguientes condiciones:

- a) Si el agua es escasa
- b) Si el pH de trabajo no permite precipitación de las durezas del agua.
- c) Si existe peligro de congelamiento en la Alta Cordillera
- d) Régimen de viento fuerte y permanente.

➤ **Riego por aspersión**

Se utiliza preferentemente ante las siguientes condiciones:

- a) El recurso del agua no es limitante.
- b) Cuando las aguas son muy duras y existe peligro de precipitación de carbonados.
- c) Características climáticas favorables, temperatura mínima cero grados.
- d) Régimen de viento moderado o intermitente a ciertas horas del día.

➤ **Aspersión –goteo**

Si las condiciones climáticas y de operación lo permite se puede utilizar la aspersión y goteo en forma combinada.

En la industria, se utiliza generalmente una tasa de riego del orden de 10 - 20 L/h.m². El riego tiene que ser homogéneo.



Figura 6. Humectación y regadío

Fuente: Roberto E. Alfaro Cortes, octubre 2013



Figura 7. Aspersores y goteo
Fuente: R. Soto. Octubre 2012

Ciclo de lixiviación

El ciclo de lixiviación es un proceso químico que consiste en la disolución de diversas sales presentes en los minerales con respecto al tiempo.

Normalmente la operación comprende dos etapas:

- Una rápida (15 a 45 días) donde se disuelve el 80-90 % del mineral oxidado y el 40-50 % de los sulfuros secundarios.

- Una lenta (6 meses), en la cual se completa el 100 % de recuperación del oxidado y el 80-90 % del sulfurado.

Recolección de soluciones

El PLS acumulado en la base de la pila fluye por gravedad a través de tuberías plásticas de drenaje (aprox. de 10 cm) hasta el foso de recolección de soluciones, que conduce a la poza de PLS para ser enviado posteriormente al circuito de extracción por solventes, por medio de bombeo o por gravedad.



Figura 8. PLS Cerro Verde

Fuente: Heap leach conference 2013 – Vancouver, CA

2.2.4. Métodos de lixiviación

Lixiviación en pilas

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Este proceso se basa en que los minerales oxidados son sensibles al ataque de soluciones ácidas.

El proceso hidrometalúrgico involucra la disolución del metal a recuperar desde una materia prima sólida (mineral oxidado), en una solución acuosa (lixivante) mediante la acción de agentes químicos. Esta transferencia del metal hacia la fase acuosa permite la separación del metal contenido en la fase sólida de sus acompañantes no solubles. En los yacimientos de cobre de minerales oxidados, el proceso de obtención de cobre se realiza en tres etapas que trabajan como una cadena productiva, totalmente sincronizadas, las cuales fueron mencionadas anteriormente.

De la lixiviación se obtienen soluciones de sulfato de cobre (CuSO_4) con concentraciones de hasta 9 gramos por litro (gpl) denominadas PLS que son llevadas a diversos estanques donde se limpian eliminándose las partículas sólidas que pudieran haber sido arrastradas. Estas soluciones de sulfato de cobre limpias son llevadas a planta de extracción por solvente (Esteban Domic, “Hidrometalurgia”).

Lixiviación en botaderos

Este método se utiliza para extraer cobre de minerales que tienen baja ley. El material es generalmente un lastre generado en la explotación de minas a tajo abierto, el cual es vaciado sobre una superficie poco permeable y el solvente acuoso es agregado sobre la superficie del botadero. Se percola a través del lecho por gravedad.

La solución fuerte que se obtiene por el fondo del botadero es conducida a la planta de cementación, donde se extrae el cobre y la solución remanente es retornada a la lixiviación.



Figura 9. Lixiviación en Botaderos

Fuente: Ipinza Abarca, Jorge. Hidrometalurgia, 2015

Lixiviación en bateas

Esta técnica consiste en contactar un lecho de mineral con una solución acuosa que percola e inunda la batea o estanque.

Los minerales a tratar por este método deben presentar contenidos metálicos altos o muy altos, debiendo ser posible lixiviar el mineral en un período razonable (3 a 14 días) y en trozos de tamaño medio con tonelajes suficientes de mineral percolable en el yacimiento que permitan amortizar la mayor inversión inicial que requiere este tipo de proceso.



Figura 10. Lixiviación en Bateas
Fuente: R, Soto, octubre 2012

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.

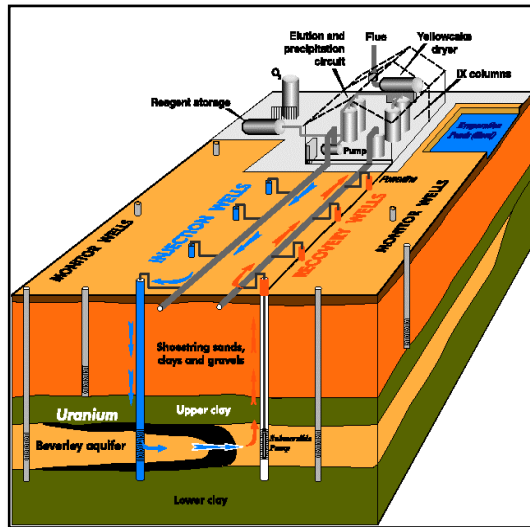


Figura 11. Lixiviación In Situ

Fuente: Ipinza Abarca, Jorge. Hidrometalurgia, 2015

Lixiviación por agitación

La lixiviación por agitación es un tipo de lixiviación en la que se agita una pulpa formada por partículas finas y reactivos. Se utiliza para menas de alta ley o cuya especie útil es de alto valor comercial, debido a los grandes costos de inversión. Su objetivo es tener recuperaciones más altas en tiempos más cortos. Usualmente se utiliza para lixiviar calcinas de tostación y concentrados, y es empleada en la extracción de cobre, oro, plata, entre otros cinco elementos.

El mineral utilizado está constituido por gruesos de menos de 2 mm de diámetro y alta cantidad de finos (hasta 200 μm), este factor debe ser bien controlado ya que exceso de finos alterará la permeabilidad de la masa lixiviada. El exceso de gruesos también debe ser controlado, ya que estos producen problemas en la agitación (aumento de la potencia del agitador).

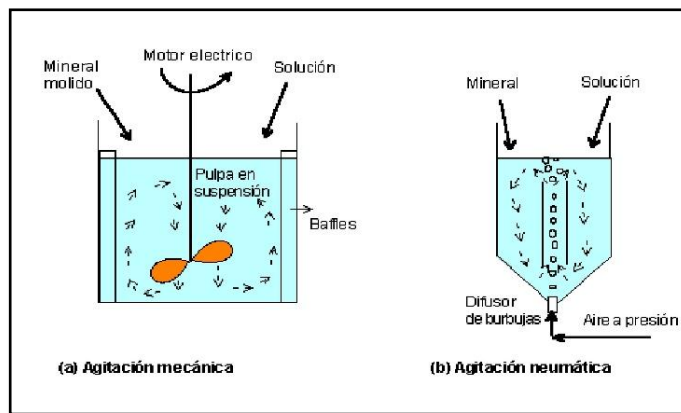


Figura 12. Lixiviación por Agitación
Fuente: Daniel Amaya, 28 de octubre de 2016

Lixiviación bacteriológica

Existen algunas bacterias, por ejemplo, *Thiobacillus Ferroxidans* y *Leptospirillum Ferroxidans*, cuyo metabolismo les permite oxidar compuestos inorgánicos, en particular ellas son capaces de oxidar el ion ferroso y el azufre elemental. Esta característica permite que soluciones que contengan dichas bacterias puedan utilizarse para la lixiviación de minerales sulfurados. Los mecanismos, mediante los cuales las bacterias

actúan, son complejos, pero en el caso de metales bivalentes ellos pueden representarse mediante dos procesos simples:

El mecanismo directo: La bacteria recoge directamente la energía del sustrato mineral.

El mecanismo indirecto: Que consta de dos procesos, el aeróbico en el cual la bacteria oxida el ión ferroso a férrico y el anaeróbico que es la reacción de disolución del mineral sulfurado por la acción del ión férrico que se formó en la etapa aeróbica. Adicionalmente como producto de la reacción de disolución se forma azufre elemental, el cual es oxidado por la acción bacteriana.

2.2.5. Aglomeración-curado

La aglomeración consiste en la cohesión de partículas de menor granulometría en torno a aquellas de mayores tamaños. Tiene como principal objetivo mejorar la permeabilidad del lecho, minimizando la presencia de zonas sin acceso a la solución lixiviante. Aquellos minerales que no han sido aglomerados presentan una ausencia de las fuerzas para mantener las partículas en su lugar, por lo cual, los finos se desplazan debido al arrastre de la solución lixiviante, ocupando espacios entre las partículas mayores y, de existir arcillas, ambos factores cumplen un rol sellante, afectando negativamente la permeabilidad del lecho.

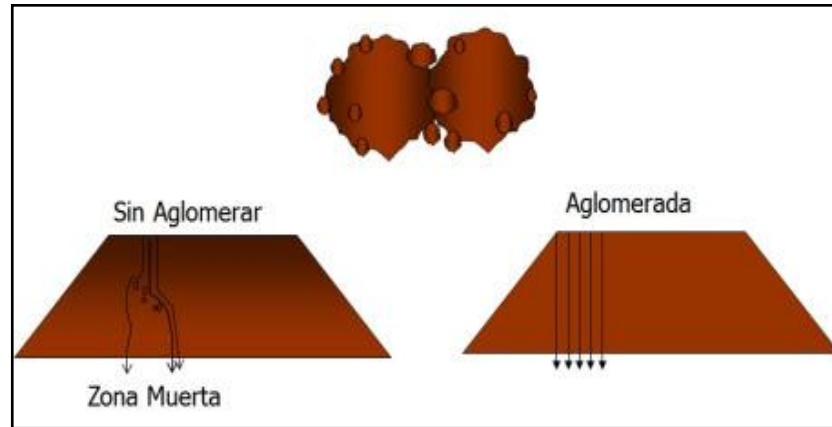


Figura 13. Diferencia entre la percolabilidad de un material no aglomerado y aglomerado
 Fuente: Cristina Herrera Levio, 28 de noviembre de 2016

El curado es el tratamiento químico previo a la etapa de lixiviación TL (*thin layer*), en el que se suministra ácido sulfúrico concentrado y agua (o solución pobre) al mineral chancado, con el fin de iniciar una serie de reacciones, cuyos efectos favorables para la operación son el incremento de la solubilidad mineral, la generación de fracturas que mejoran la difusión de reactivos al interior de la partícula y finalmente la acidificación del mineral que previene la precipitación de sulfatos de hierro durante la lixiviación. La aglomeración y el curado se realizan en equipos llamados tambores aglomeradores.

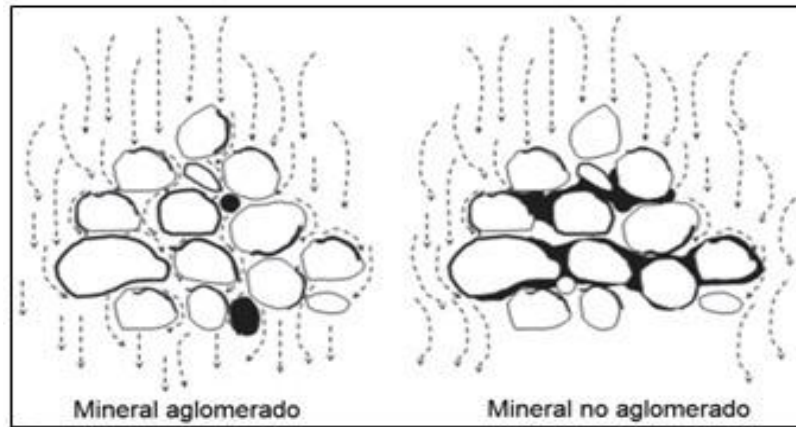


Figura 14. Diferencia entre el flujo en un mineral aglomerado y no aglomerado
Fuente: Dhawan, Safarzadeh, Miller, Moats, & Rajamani, 2013

Debido a la gran importancia de esta técnica de pretratamiento para la lixiviación en pilas, se han desarrollado investigaciones en forma continua para determinar mejoramientos en la aglomeración de las menas. Una gran variedad de agentes ligadores o aglutinadores han sido evaluados, así como también se han desarrollado diferentes formas y equipos para el mezclado - curado de la mena chancada.

Las máquinas aglomeradoras son sensibles a los cambios, en la razón de alimentación de mineral, en la naturaleza del mineral, y en la razón de adición de soluciones muy aglutinantes.

Dentro de los equipos aglomeradores se puede citar:

- a) **Tambor rotatorio:** Una manera muy eficiente de aglomerar es usando un tambor rotatorio con una inclinación adecuada en el sentido del flujo de

sólidos. El mineral se carga en forma continua por la parte posterior del tambor, que está más alto. El agua y el agente lixivante se agregan mediante duchas o chorros, también en la parte posterior del tambor. Guías longitudinales evitan el resbalamiento del mineral y éste es elevado produciéndose luego una caída en la cual las partículas adquieren un movimiento rotatorio. El porcentaje de humedad y la inclinación del tambor son factores muy importantes en la calidad del aglomerado. De 7 a 10 % de humedad puede lograr un excelente aglomerado, así como un tiempo de residencia del mineral en el tambor, del orden de 1 a 3 minutos.



Figura 15. Tambor rotatorio

Fuente: AMP advanced mineral processing/catálogo cilindros aglomeradores, 2016

- b) **Correas transportadoras:** Estas mezclan el material fino y grueso mediante el movimiento retrospectivo del material sobre la correa, debido a su mayor inclinación con respecto al ángulo de reposo del material.

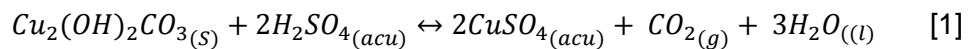
- c) **Disco aglomerador:** Es el tipo de aglomerador que trabaja vertiendo material fino. Las revoluciones por minuto del disco suelen estar entre 30 y 50 r.p.m.; dependiendo del diámetro y la inclinación de éste. La profundidad debería ser 0,46 a 0,91 metros dependiendo del tamaño del mineral y del diámetro del disco.
- d) **Mezclador de tornillo:** Esta mezcla el material al ser transportado por un tornillo sin fin, donde un movimiento de roleo se encarga de realizar esta operación.
- e) **Aglomerado manual:** La aglomeración se realiza completamente manual, del mismo modo como se prepara la mezcla cemento - arena - agua para obras civiles, con palas y carretillas.

La utilización de este equipo ha presentado los mejores resultados en el tratamiento de metales preciosos y, en menor medida, en la pelletización de minerales de hierro.

2.2.6. Química elemento cobre

Los procesos hidrometalúrgicos para la disolución (lixiviación) de cobre se utilizan sobre todo en minerales que contienen óxidos de cobre, de baja ley y/o complejos, y en menor escala o para tratar concentrados de sulfuros. Los minerales de óxidos de cobre pueden lixiviarse por diversos métodos (*in situ* en las minas, en terreros, en montones, o en tanques) dado que el cobre pasa

fácilmente a la solución. Los reactivos lixiviantes más utilizados son ácidos diluidos (sulfúrico principalmente, clorhídrico y nítrico ocasionalmente), o bien soluciones alcalinas amoniacales de carbonato de amonio. Cuando se utiliza un ácido diluido la reacción química que ocurre durante el proceso de lixiviación de malaquita es (por ejemplo, para ácido sulfúrico):



Para estudiar el avance de esta reacción química en el laboratorio, es necesario estimar las concentraciones de las diferentes especies. La concentración de Cu^{2+} en una disolución acuosa puede determinarse mediante la comparación colorimétrica (R. Soto, 2012).

2.2.7. Química de lixiviación del cobre

Lixiviación óxido de cobre

El cobre en forma de óxidos, es fácilmente soluble en soluciones ácidas, la química relacionada con la disolución de los minerales oxidados de cobre, es esencialmente reacciones de disolución de los minerales oxidados de cobre, es esencialmente reacciones de disolución, obteniéndose el cobre en solución, en forma de sulfato de cobre iónico.

Dichas reacciones se caracterizan por realizarse a temperatura ambiente, y presión atmosférica, utilizando como agente lixivante el ácido sulfúrico, se debe favorecer controlando las variables siguientes:

- Concentración de ácido en la solución lixivante.
- Tiempo de Lixiviación.
- Tamaño de mineral (granulometría).
- Densidad de riego.

Los principales minerales oxidados de cobre, y sus reacciones de disolución, son:

a) **Crisocola.** ($\text{CuSiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)



b) **Malaquita.** ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$)



Lixiviación de sulfuros

La lixiviación de minerales sulfurados, se ha desarrollado notablemente gracias al proceso de lixiviación bacterial, que ayuda a la oxidación del sulfuro, gracias a la acción de bacterias, que aceleran la reacciones de lixiviación. Para el cobre se usa principalmente la bacteria *thiobacillus ferrooxidans*.

Lixiviación de sulfuros de cobre secundarios

Como se mencionó anteriormente, la calcocita es otro mineral presente en los botaderos. La calcocita (Cu_2S) y la Covelita (CuS) son formados por la lixiviación parcial de la Calcopirita. Los cobres de estos minerales pueden ser disueltos por la solución de lixiviación por reacción con iones férricos. La reacción de la calcocita es muy similar al de la covelita.



Adicionalmente a la producción de iones de cobre (Cu^{++}), la reacción también reduce el ión férrico (Fe^{+++}) a ión ferroso (Fe^{++}). Este último no lixivia al cobre, pero es reoxidado por acción de las bacterias. De esta manera, el hierro es usado para pasar de Férrico a ferroso, y luego a regresar a la forma férrica.

Lixiviación de sulfuros de cobre primarios.

Los sulfuros primarios como la calcopirita se lixivian bacteriamente. El mecanismo de lixiviación bacterial puede ser un ataque directo al mineral o bien un mecanismo indirecto en que la bacteria oxida el ión ferroso a férrico, el cual actúa como agente oxidante.

Ataque directo:

a) Calcopirita:

Bacterias



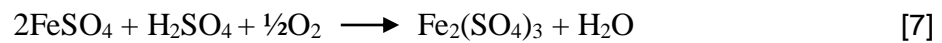
b) Pirita:

Bacterias



El sulfato ferroso formado como resultado del ataque a la calcopirita y pirita, es oxidado por la bacteria a sulfato férrico.

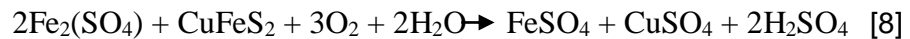
Bacterias



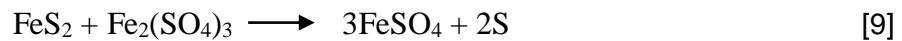
Ataque indirecto:

El sulfato férrico formado es un lixiviante efectivo oxidando sulfuros como sigue:

a) Calcopirita:



b) Pirita:



El azufre es oxidado a sulfato por la acción bacterial según:

Bacterias

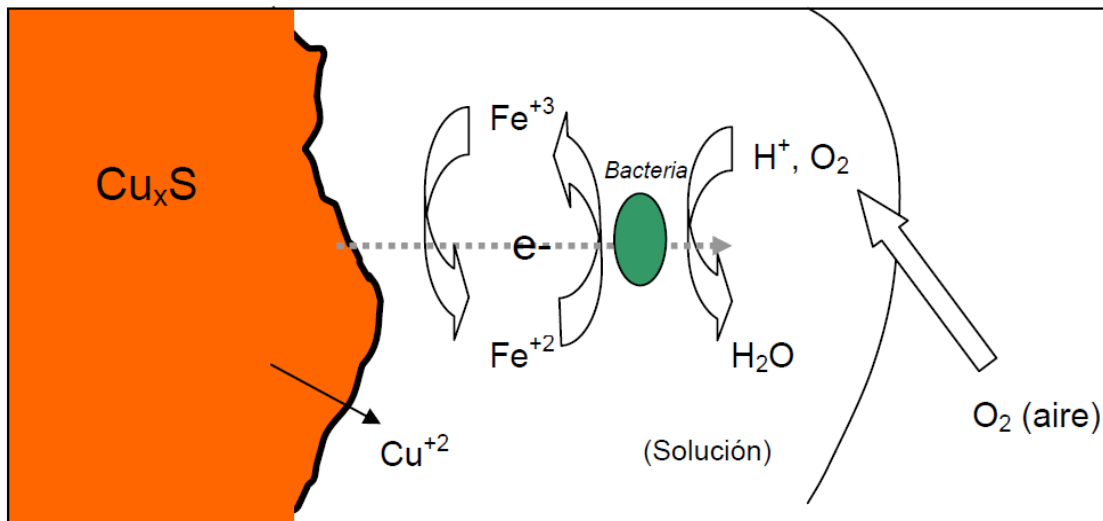
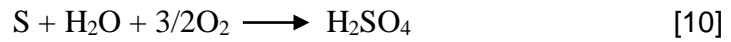


Figura 16. Descripción General de la Lixiviación de Sulfuros de Cobre y Transporte de Electrones
Fuente: R. Soto, octubre de 2012

2.2.8. Termodinámica del cobre

Relaciones termodinámicas

Los diagramas se derivan del conocimiento de la estequiometría de las reacciones y de los datos de las energías libres de formación de las especies que participan de ellas. Para una reacción química en la que solo participan moléculas neutras o iones positivos o negativos la expresión que permite calcular la constante de equilibrio a la temperatura que interesa es:

$$\Delta G^0 = -4,575T \log K \quad [11]$$

El valor de la energía libre se puede determinar conociendo las energías libres estándar de formación y calculando como la suma de productos menos la suma de reactivos, respetando la estequiometría de cada reacción así:

$$\Delta G^0 = \sum v_i \mu_i^0 \quad [12]$$

Donde: ΔG^0 es la energía libre de la reacción

v_i es el coeficiente estequiométrico

μ_i^0 energía libre de formación de los compuestos de la reacción

Tomando la ecuación 1, a 298,15 K (25°C) queda entonces:

$$\Delta G^0 = - 1363,35 \log K \quad [13]$$

En donde K es la constante de equilibrio y puede asociarse a las actividades de las especies que participan en la reacción y hacerla así dependan de la actividad de los iones H^+ y de esta manera permite obtener el pH de equilibrio para la reacción química considerada a 298,15 K (25°C). Para el caso de una reacción electroquímica, es decir, en la que participan además electrones, la reacción a usar es la de Nernst y se plantea así:

$$E^0 = - \frac{\Delta G^0}{nF} \quad [14]$$

En donde:

E^0 = Potencial de equilibrio estándar de la reacción electroquímica (voltios)

n = Número de electrones que participan de la reacción

F = Equivalente electroquímico. Toma valores de 96 500 Coulomb o bien 23 060 cal/volt-equivalente.

ΔG^0 es la energía libre de la reacción y se calcula en [13]

Como las tensiones absolutas o los potenciales de equilibrio de electrodos no son accesibles a la medición, pero puesto que, la tensión en los bordes de una cadena electroquímica formada por dos o más electrodos es medible, se puede entonces referenciar, todas las tensiones de electrodos con respecto a la tensión de uno de ellos elegido convencionalmente. Se ha elegido como referencia para toda temperatura de electrodo normal al hidrógeno (ENH). Lo que corresponde a un electrodo de platino, cubierto de negro de platino, continuamente en contacto con H₂ puro a una presión de 1 atm e inmerso dentro de una solución en donde los iones H⁺ tienen una actividad de 1 y que no contiene ninguna otra sustancia que afecte el potencial de electrodo del platino. El potencial entre este electrodo y la solución se considera nulo a toda temperatura. Las reacciones correspondientes son:



En donde $a_{H^+} = 1$; y $P_{H_2} = 1$ atm; por convención entonces $E^0 = 0$ para $\Delta G^0 = 0$ Entonces se puede saber la tensión absoluta de un electrodo referido a la tensión del electrodo de hidrogeno en las condiciones del estado estándar.

Escribiendo las reacciones electroquímicas en el sentido de la reducción se tiene:



Y la ecuación de Nernst se puede escribir:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\text{Ox}}{\text{Red}} \quad [17]$$

En donde E corresponde a la tensión de equilibrio de la reacción electroquímica, en voltios y el término logarítmico representa el valor recíproco de la constante de reacción K, la cual se hace depender de H^+ .

La ecuación [17] puede escribirse reemplazando términos así:

$$E = E^0 + \frac{0,06}{n} \ln \frac{\text{Ox}}{\text{Red}} \quad [18]$$

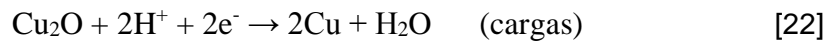
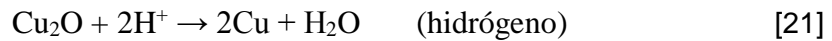
Balanceo de Ecuaciones y Tipos de Equilibrios

Para definir el balance de una reacción cualquiera se tomará el siguiente orden:

Se balancean en primer lugar el elemento o los elementos que participan en la reacción.

- ✓ El oxígeno se balancea con agua
- ✓ El hidrógeno se balancea con iones H^+
- ✓ Por último, si queda desbalanceada la ecuación se balancea con cargas e^- .

Como ejemplo considere el equilibrio entre la cuprita y el cobre elemental:



En forma general la reacción de transformación de una especie oxidada A en una especie reducida B se tiene:



Donde A y B pueden ser especies solubles o neutras o especies insolubles. Teniendo en cuenta los coeficientes estequiométricos, se puede plantear varios casos o equilibrios así:

Primer caso: $n = m = 0$ se tiene la ecuación en la que no participan ni H^+ ni e^- , es decir son ecuaciones independientes de tensión y pH.

Segundo caso: equilibrio en donde participan cargas H^+ es decir, $n = 0$ y $m \neq 0$, es el equilibrio químico propiamente dicho y solo depende del pH.

El ejemplo ilustra este equilibrio y la zona de estabilidad correspondiente:



$$\Delta G^\circ_T = -10,76 \text{ kcal}$$

A 298,15 K (25 °C) y empleando la ecuación [23] se obtiene:

$$\log K = \frac{\Delta G^\circ}{1363,35} = 7,6 = \log \frac{(\text{Cu}^{++})}{(\text{CuO})(\text{H}^+)^2} \quad [25]$$

Expresando la actividad de los iones H^+ en términos de pH y considerando actividades unitarias de las demás especies involucradas en la reacción se tiene que: $pH = 3,8$ En un diagrama de tensión -pH, la reacción de equilibrio estará representada por una línea recta vertical siendo, por tanto, independiente de la tensión, en la Figura 17 así:

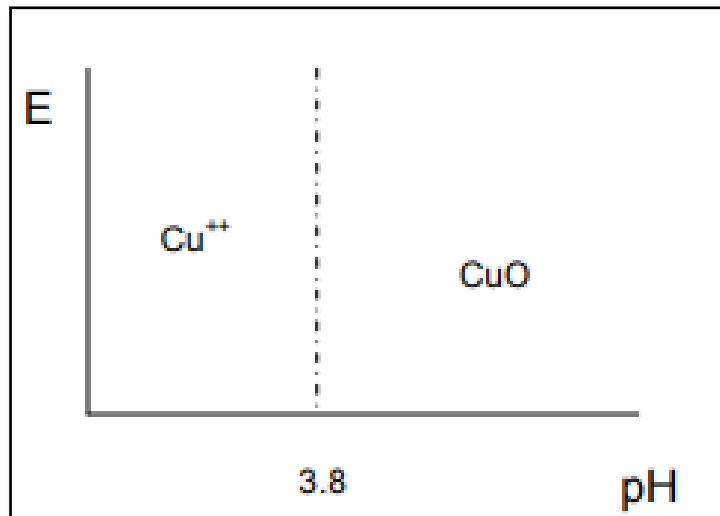


Figura 17. Equilibrio Químico

Fuente: A.Gaviria C., O. Restrepo B., M.Bustamante R. (universidad nacional de colombia sede medellín facultad de minas, junio de 2007).

Las zonas de estabilidad del Cu^{++} y del CuO pueden deducirse a partir de la expresión de la constante de equilibrio, calculando la relación de concentraciones de las especies, para un pH dado diferente al de la condición de equilibrio.

A un $\text{pH} > 3,8$ el Cu^{++} se precipitará desde su solución como CuO , lo que obligará en los sistemas de lixiviación a mantener una cierta acidez libre mínima que evite este fenómeno.

2.3. Definición de términos

Granulometría

La cinética de la lixiviación o biolixiviación puede mejorar cuando el tamaño de las partículas es menor, pues los microorganismos tienen una mayor área de contacto. Sin embargo, se debe tener en cuenta que partículas muy finas pueden afectar a la permeabilidad de la pila y a la distribución del oxígeno que entra por aireación.

La lixiviación

La lixiviación es la disolución preferente de uno a más componentes de una mezcla sólida por contacto con un disolvente líquido. En el caso de la disolución del cobre, este se disuelve en una solución ácida (generalmente ácido sulfúrico).

Curado

Consiste en un pretratamiento con ácido concentrado al mineral que se va a colocar en la pila a lixiviar. Su objetivo es producir una condición favorable para la lixiviación, ya que la distribución anticipada del ácido permite que éste reaccione sobre todas y cada una de las partículas del mineral, logrando una acción de transformación de las especies minerales de cobre que están próximas

a la superficie, normalmente en sulfato de cobre. Este pretratamiento neutraliza la ganga y al hacerlo permite una mejor concentración de ácido a lo alto de la columna de mineral.

Altura de la pila

La altura de las pilas depende en primer lugar de si estas son ROM o de mineral chancado. Las pilas ROM normalmente tienen grandes alturas, la altura de las pilas de mineral chancado depende de las características fisicoquímicas del mineral. Se debe tomar en cuenta también que la aireación disminuye con la profundidad del lecho, afectando la recuperación de cobre.

Cinética de la lixiviación

La termodinámica predice las condiciones de equilibrio a que debe llegar una reacción química en ciertas condiciones dadas, es decir, mide la tendencia de una reacción a ocurrir. Sin embargo, la termodinámica no dice nada acerca de la velocidad con que el sistema procederá hacia el equilibrio ni tampoco nada respecto, al mecanismo de las reacciones. La cinética por lo tanto dará información muy valiosa, tanto para la ingeniería de un proceso, como para predecir velocidades en una gran variedad de condiciones. Esto es importante porque el metalurgista necesita lograr un rendimiento óptimo en el menor tiempo posible. En general, un estudio cinético puede aportar dos tipos de información importantes para:

- Diseño de quipos y proceso.
- Determinación de mecanismos

Minerales oxidados

Los minerales oxidados y carbonatos son usualmente encontrados cerca de la superficie en las minas de tajo abierto, estos se forman debido a la descomposición y alteración de minerales sulfurados primarios.

Minerales sulfurados

En las minas de tajo abierto los minerales sulfurados se encuentran por debajo de la capa de óxidos, y por lo tanto, no han sufrido cambios por efectos del medio ambiente, su tratamiento generalmente se realiza por operaciones tradicionales de chancado, molienda, flotación, fundición y electrorefinación, sin embargo, la técnica de lixiviación bacteriana permite la extracción del cobre de estos minerales de baja ley.

Aglomerado

El proceso de aglomeración tiene como objetivo preparar el material mineralizado para la lixiviación, de manera de asegurar un buen coeficiente de permeabilidad de la solución. La permeabilidad es dependiente de las características físicas del material en cuanto a proporción de poros, la que depende a su vez, de la proporción entre lamas (granulometrías inferiores a 5-10

micrones) finos (granulometrías inferiores a 100-150 micrones) y gruesos, y del método de formación de las pilas o depósitos. Con proporciones del 10 - 20 % de estos materiales finos, pueden existir problemas de permeabilidad y si no se asegura la permeabilidad en los lechos de lixiviación, no hay percolación, ni contactos, disolución ni extracción de valores, debido a que los finos segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación, se favorece la compactación en la formación de las pilas y puede ocurrir que estas partículas se vayan al fondo de la pila impidiendo el flujo uniforme de la solución enriquecida. la aglomeración consiste en un procedimiento que permite la unión de varias partículas finas a otras de mayor tamaño.

Agentes lixiviantes

Sustancia química (cianuro, tioúrea, ácido) que tiene la propiedad de disolver selectivamente uno o más elementos presentes en una roca o mineral.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación

El presente trabajo de tesis se diseñó con el fin de incrementar la recuperación y controlar el consumo de ácido de la Planta metalúrgica de Choquecota mediante pruebas en columnas, para este fin se considera una serie de pruebas variando la concentración de ácido y el tratamiento con y sin curado antes de ser lixiviado, estos parámetros conllevaran a los objetivos de la tesis, ver Figura 18.

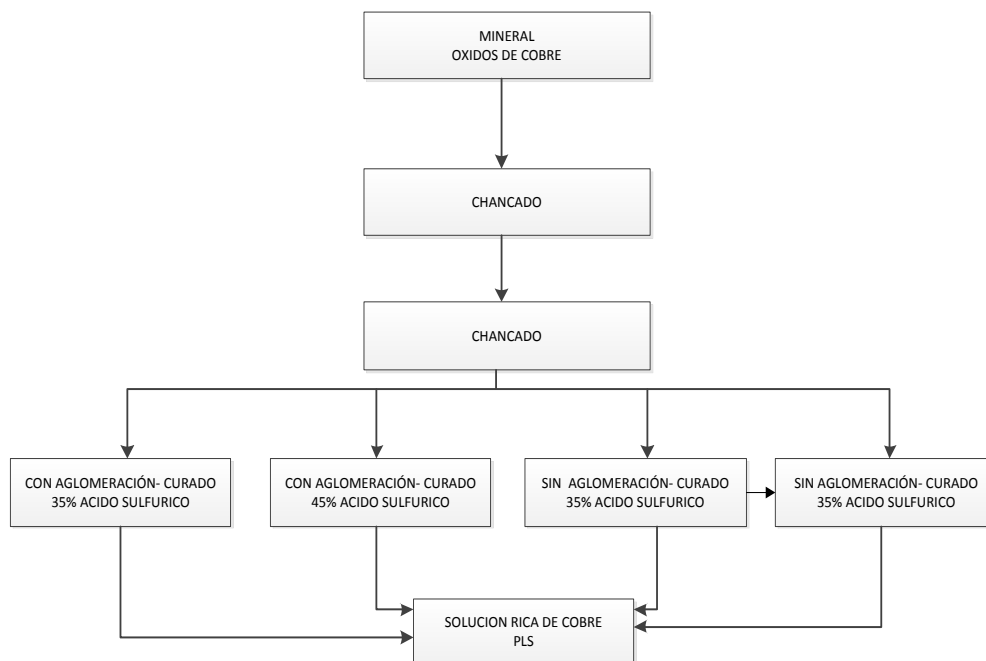


Figura 18. Etapas de las pruebas
Fuente: Elaboración propia

3.2 Población y muestra

3.2.1. Población

En la actualidad existen millones de toneladas de mineral en las minas cercana a la zona donde está instalada la planta de Choquecota, sus leyes promedio de cobre son 1,67 %, la población es aproximadamente 5000 toneladas de mineral, mediante cargador frontal se retiró mineral de la cancha de gruesos, tomando muestras equivalentes a 500 kilogramos para las diferentes pruebas del trabajo.

3.2.2. Muestra

Los 500 kilogramos se distribuyeron 350 kilogramos para la lixiviación en columnas y el resto para pruebas físico química del mineral.

El ácido usado es de 98 % de concentración.



Figura 19. Mineral de la cancha gruesos.
Fuente: Elaboración propia

3.3 Operacionalización de variables

Las variables que afectan el proceso son la granulometría del mineral, la concentración de disolvente, el tiempo de lixiviación.

Variable independiente:

- Concentración de ácido sulfúrico.
- Con aglomeración y curado.
- Sin aglomeración.
- Granulometría del mineral.

- Flujo de riego.

Variable dependiente:

- Recuperación del cobre.

3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos

La técnica de muestreo de minerales en cancha fue formando una cuadrícula de 5 metros de distancia con respecto al punto central donde se tomó las muestras en un área de 150 metros, con ayuda de un cargador frontal, mezclaron el material para tener muestras aproximadas de 500 kg, estas fueron subdivididas hasta llegar a 87 kg, cada columna será cargada con el peso mencionado y posteriormente regadas por un periodo adecuado; las columnas que consideran el curado se dejan en reposo durante las 24 horas antes de cargar el mineral aglomerado. Otras muestras fueron cuarteadas mediante el cuarteador de rifle hasta tener un peso de 2,0 kg para la ejecución de las diferentes pruebas metalúrgicas.

3.5 Procesamiento y análisis de datos

3.5.1. Equipo / herramientas / materiales

- Ro - Tap
- Mesa de Trabajo (cuarteado)
- Lona (homogenizado)
- Espátula
- Pulverizador de anillos

- Filtro
- Balanza
- Set de Mallas
- Bandejas de metal
- Rifle 3/4”x 18 de abertura (cuarteador)
- Otros (Lonas, espátulas, sobres, brochas, etc.)

3.5.2. Evaluación del mineral

Examen del mineral

Una muestra representativa es tomada para los ensayos, la cantidad de mineral disponible no excedió de 100 kg. El mineral contiene grumos no mayores a 1/2 pulgada, el mineral contiene 20 % de arcillas y una ganga que contienen carbonatos. La muestra presenta una humedad del 3,3 % y un peso específico de 2,5.

Tabla 3
Contenido metálico del mineral de botaderos

Composición	Cobre (%)	Cobre Soluble (%)	Hierro (%)	CO ₃ (%)	OTROS
Contenido	1,67	1,25	3,4	1,6	---

Fuente: Elaboración propia (Análisis por gravimetría y volumetría).

Análisis granulométrico

Consiste en realizar un análisis de la cantidad de cada fracción de mineral resultante del tamizaje del material representativo. Este análisis permite calcular la distribución porcentual de las partículas por mallas. Lo que hace posible poder obtener el contenido de finos que se tiene en el mineral.

Procedimiento:

1. Secar las muestras y dejar enfriar.
2. Realizar el análisis granulométrico, respetando el siguiente orden de set de mallas: 11/2", 8M, 14M, 50M, 100M, 140M y 200M.
3. Realizar el análisis granulométrico para la muestra.
4. Anotar los pesos en cada malla correspondiente y reportar los resultados.

Tabla 4
Análisis granulométrico del mineral

Malla Tyler	Malla (μ)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
1 1/2"		213,00	10,65	10,65	89,35
8	2380	669,42	33,47	44,12	55,88
14	1410	301,67	15,08	59,20	40,80
50	297	563,36	28,17	87,37	12,63
100	149	92,15	4,61	91,98	8,02
140	105	43,03	2,15	94,13	5,87
200	74	26,52	1,33	95,46	4,54
-200		90,85	4,54	100,00	0,00
		2000,00	100,00		

Fuente: Elaboración propia

Humedad natural

El procedimiento para su determinación es el siguiente:

1. Tomar aproximadamente 10 kg de mineral.
2. Pesar y anotar su valor.
3. Colocar muestra sobre una bandeja y luego secar en estufa a 323,17 K (50 °C) por 24 horas.
4. Finalmente pesar el mineral seco y calcular humedad.

Tabla 5
Determinación de la humedad natural

Masa mineral húmedo (kg)	2,10
Masa mineral seco (kg)	2,06
% Humedad Natural	1,80

Fuente: Elaboración propia.

Densidad aparente

El procedimiento para su determinación es el siguiente:

Se toma la submuestra para caracterización física y se pesa. Para la prueba se necesita una columna de diámetro al menos 5 veces el tamaño de la partícula de mayor tamaño, en este caso se utiliza una columna de 0,05 m de diámetro y 0,6 metros de altura. La columna se fija verticalmente, se mide su altura total, se introduce el mineral.

Tabla 6
Densidad aparente

Peso del mineral (kg)	1,60
Altura total de la columna útil (m)	0,54
Altura sobrante de la columna (m)	0,09
Diámetro interno de la columna (m)	0,05
Densidad aparente (t/m ³)	1,75

Fuente: Elaboración propia

Gravedad específica

- 1.-Medir en la probeta 35 ml de agua.
- 2.-Pesar 6 g de mineral preparado a malla -100.
- 3.-Adicionar el mineral pesado a la probeta que contiene agua.
- 4.-Determinar el volumen desplazado, para lo cual tomar nuevamente la lectura en la probeta.
- 5.-Realizar los cálculos

Tabla 7
Determinación gravedad específica

Masa mineral oxidado de cobre (kg)	6,5
Volumen inicial (ml)	40
Volumen final (ml)	42,54
Gravedad específica	2,56

Fuente: Elaboración propia

Ángulo de reposo

Se toma una muestra de mineral aproximadamente unos 45 kilogramos por la granulometría utilizada, y se procede a verterlo en una superficie plana (suelo) desde cierta altura lo suficiente para no tener contacto con las partículas que caen, el mineral se va acomodando de acuerdo a la gravedad y forma una figura semejante a un cono, una vez que se haya acabado de apilar se puede medir el ángulo de reposo del mineral de muestra con una regla de grado como muestra la figura

En este caso el ángulo de reposo de mineral es de $\alpha = 45^\circ$

Consumo de ácido

Consiste en la determinación del consumo máximo de ácido del mineral oxidado de cobre de la localidad de Turco en condiciones ideales de tratamiento. En la operación de la lixiviación el consumo será menor que el de esta prueba debido a la mayor granulometría con que se va a trabajar.

Procedimiento

1. Se toman 200 g de mineral a granulometría 100 % bajo 100 mallas Tyler.
2. Se deposita la muestra en el reactor y se contacta con 400 ml de agua. (33 % sólido).

3. La muestra se agita y se mide el nivel de acidez.
4. Se agrega solución de ácido sulfúrico comercial.
5. Se agita constantemente hasta alcanzar, pero sin sobrepasar, el nivel de pH escogido.
6. Se contabiliza el ácido sulfúrico agregado.
7. Se mide el pH de la pulpa, adicionando ácido para restablecer el valor de referencia sin llegar nunca a sobrepasarlo, hasta que el parámetro no varíe durante 2 horas.
8. Se detiene la agitación y se determina el ácido adicionado, expresándolo en kg/t. Finalmente, se determina la recuperación de cobre.
9. Se filtra la pulpa, midiendo el volumen de la solución obtenida y se analiza por ácido libre.

El consumo de ácido sulfúrico es de 23 kg/tonelada de mineral.

3.5.3. Pruebas de lixiviación en columnas

Procedimiento:

1. Medir la Columna.
2. Depositar el mineral sobre una carpeta y homogenizar el material mediante técnica de cono y cuarteo.

3. Reducir la muestra hasta aproximadamente la masa necesaria para la prueba.
4. Tomar muestras de mineral para análisis químico
5. Preparar la columna para carga, sistema de riego, cama de inertes en el fondo de la columna y sistema de recolección de percolado.
6. Si el material es curado seguir el procedimiento descrito posteriormente.
7. Con el mineral listo se procede a cargar la columna, esto se debe hacer inclinando la columna en 45° , aumentando la inclinación conforme se aumenta la cantidad de mineral ingresado. Esto se debe hacer con cuidado para evitar la compactación del mineral.
8. Se debe registrar la altura libre de la columna para calcular la densidad aparente del mineral.
9. Con la columna cargada se debe colocar los materiales necesarios para el riego:
 - a. La solución de riego.
 - b. Un recipiente para la recolección de percolado.
 - c. Sistema de riego.
10. El regulador de flujo debe quedar en un lugar accesible, para manejar los flujos de solución.

11. Iniciar el riego y fijar la tasa de riego.
12. Anotar el tiempo en que se demora en percollar en la columna.
13. Recibir el percolado y tomar 2 muestras líquidas (muestra y contra muestra).
14. Medir el pH y Eh de la muestra y enviarla a análisis químico.
15. Recolectar la solución percolada, guardarlo en un recipiente identificado como, columna N^a 1.
16. Una vez cumplido el tiempo de lixiviación, parar el riego de la columna.
17. Una vez detenida la percolación de la columna, cambiar la solución lixivante por agua.
18. Fijar la tasa de riego y lavarla durante 24 h.
19. Detener el lavado, esperar a que se detenga la percolación del agua de lavado, agitar la solución y tomar una muestra identificándola y enviarla a análisis químico.
20. Sacar la columna de su soporte.
21. Voltar la columna sobre un plástico y retirar el mineral, con cuidado de que no caiga fuera de este.
22. Una vez se haya retirado todo el mineral, colocar el mineral sobre bandejas y enviarlo a secado durante 48 h a 323,17 K (50 °C)

23. Una vez seco, registrar el peso del ripio seco.

24. Obtener una muestra de ripio para análisis químico según se describió.



Figura 20. Instalación columnas de Lixiviación
Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Pruebas



Figura 21. Carguío de las columnas de Lixiviación
Fuente: Elaboración propia



Figura 22. Altura vacía en la columna de Lixiviación
Fuente: Elaboración propia



Figura 23. Control de tasa de riego.
Fuente: Elaboración propia

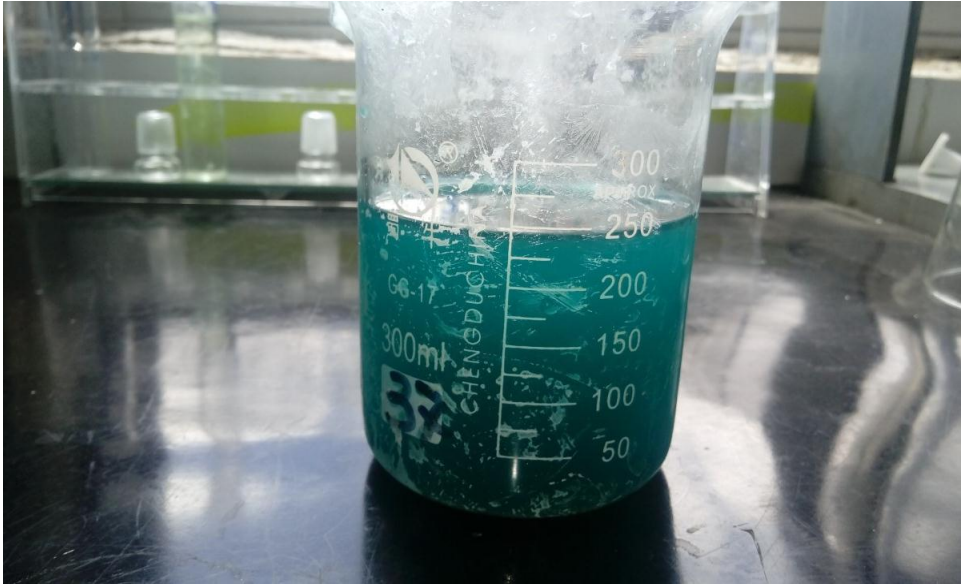


Figura 24. Toma de muestras de PLS para el análisis químico.
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

La muestra utilizada para las pruebas experimentales son minerales oxidados de cobre de la minera E.M. D´Cobre – Bolivia.

La Tabla 8 consta de los principales parámetros considerados para pruebas metalúrgicas; en estas pruebas el mineral se lixivia sin hacer el proceso de curado, considerando la concentración de ácido sulfúrico a 35 kg/t.

Tabla 8
Prueba de lixiviación en la columna 1, sin curado

Condición de la prueba: columna 1: sin curado 35 kg/t			
Mineral oxidado de cobre 89,55 %			
Muestra	-m 1 1/2"		Alimentación
Curado	Manual	Peso mineral, Kg	87,20
Tasa de riego			
L/h.m ²	1,20	Humedad, %H ₂ O	2,90
Densidad aparente	1,86	Peso seco, Kg	84,67
Altura columna, cm	160,00	TCu, %	1,67
Altura libre superior, cm	30,00	ASCu, %	1,25
Interior filtror, cm	1,00	TCu, g	1414,01
Altura mineral, cm	143,00	ASCu, g	1058,39

Fuente: Elaboración propia

Las tablas 9, 11, 13 y 15 muestran los resultados de las pruebas y el balance metalúrgico para las columnas de lixiviación 1, 2, 3 y 4.

Tabla 9
Balance metalúrgico de la columna 1, sin curado

Columna 1: sin curado 35 kg/t						
	Volumen	Ley	Finos	% Recup.	% Recup. Acum.	conc. de ácido en el riego g/l
0					0	9
1	1,23	8,66	10,65	0,8	0,8	9
2	5,68	7,66	43,51	3,1	3,83	9
3	5,84	6,15	35,92	2,5	6,37	9
4	4,65	6,09	28,32	2,0	8,37	9
5	5,39	5,04	27,17	1,9	10,29	9
6	10,67	5,6	59,75	4,2	14,52	9
7	5	4,19	20,95	1,5	16,00	9
8	4,96	4,05	20,09	1,4	17,42	9
9	4,34	3,73	16,19	1,1	18,57	20
10	3,16	3,7	11,69	0,8	19,39	20
11	5,06	3,67	18,57	1,3	20,71	20
12	3,5	3,6	12,60	0,9	21,60	20
13	6,5	3,45	22,43	1,6	23,18	20
14	5,18	3,32	17,20	1,2	24,40	20
15	6,03	3,11	18,75	1,3	25,73	20
16	5,32	3,3	17,56	1,2	26,97	20
17	6,06	3,1	18,79	1,3	28,30	20
18	5,26	3,1	16,31	1,2	29,45	20
19	4,76	2,9	13,80	1,0	30,43	20
20	2,88	2,83	8,150	0,6	31,00	20
21	5,06	2,7	13,66	1,0	31,97	20
22	2,58	2,5	6,45	0,5	32,42	20
23	3,58	2,5	8,95	0,6	33,06	20
24	3,2	2,52	8,06	0,6	33,63	20
25	2,7	2,4	6,48	0,5	34,09	20

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 10 consta de los principales parámetros considerados para pruebas metalúrgicas; en estas pruebas el mineral se lixivia sin hacer el proceso de curado, variando la concentración de ácido sulfúrico a 45 kg/t.

Tabla 10
Prueba de lixiviación en la columna 2, sin curado

Condición de la prueba: columna 2: sin curado 45 kg/t			
Muestra	Mineral oxidado de cobre 89,55 % -m11/2"		Alimentación
Curado	Manual	Peso mineral, kg	87,20
Tasa de riego L/h/m ²	1,20	Humedad, %H ₂ O	2,90
Densidad aparente	1,86	Peso seco, kg	84,67
Altura columna, cm	160,00	TCu, %	1,67
Altura libre superior, cm	30,00	ASCu, %	1,25
Interior filtror, cm	1,00	TCu, g	1414,01
Altura mineral, cm	143,00	ASCu, g	1058,39

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11
Balance metalúrgico de la columna 2, sin curado

Columna 2: sin curado 45 kg/t						
	Volumen	Ley	Finos	% Recup.	% Recup. Acum.	conc. de ácido en el riego g/l
0					0	9
1	1,5	9,5	14,25	1,0	1,0	9
2	5,4	9,15	49,41	3,5	4,50	9
3	5,6	7,64	42,78	3,0	7,53	9
4	4,65	7,2	33,48	2,4	9,90	9
5	5,2	6,58	34,22	2,4	12,32	9
6	9,9	6,21	61,48	4,3	16,66	9
7	5,8	5,68	32,94	2,3	18,99	9
8	4,9	4,73	23,18	1,6	20,63	9
9	4,3	4,54	19,52	1,4	22,01	20
10	3,7	4,19	15,50	1,1	23,11	20
11	5,9	4,16	24,54	1,7	24,84	20
12	3,5	3,94	13,79	1,0	25,82	20
13	6,9	3,61	24,91	1,8	27,58	20
14	5,18	2,89	14,97	1,1	28,64	20
15	5,2	2,99	15,55	1,1	29,74	20
16	5	3,13	15,65	1,1	30,85	20
17	6,4	3,1	19,84	1,4	32,25	20
18	5,2	2,9	15,08	1,1	33,32	20
19	4,3	2,79	12,00	0,8	34,16	20
20	2,8	2,53	7,084	0,5	34,67	20
21	5,1	2,53	12,90	0,9	35,58	20
22	2,5	2,53	6,33	0,4	36,03	20
23	3,5	2,71	9,49	0,7	36,70	20
24	3,2	2,59	8,29	0,6	37,28	20
25	2,1	2,39	5,02	0,4	37,64	20

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 12 consta de los principales parámetros estimados para pruebas metalúrgicas; en estas pruebas el mineral se lixivia realizado el proceso de curado, considerando la concentración de ácido sulfúrico a 35 kg/t.

Tabla 12
Prueba de lixiviación en la columna 3, con curado

Condición de la prueba: columna 3: con curado 35 kg/t			
Muestra	Mineral oxidado de cobre 89,55 % -m11/2"		Alimentación
Curado	Manual	Peso mineral, kg	87,20
Tasa de riego L/h/m ²	1,20	Humedad, %H ₂ O	2,90
Densidad aparente	1,86	Peso seco, kg	84,67
Altura columna, cm	160,00	TCu, %	1,67
Altura libre superior, cm	30,00	ASCu, %	1,25
Interior filtror, cm	1,00	TCu, g	1414,01
Altura mineral, cm	143,00	ASCu, g	1058,39

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13
Balance metalúrgico de la columna 3, con curado

Columna 3: con curado 35 kg/t						
Día	Volumen	Ley	Finos	% Recup.	% Recup. Acum.	conc. de ácido en el riego g/l
0					0	9
1	1,23	49,73	61,17	4,3	4,3	9
2	5,68	23,58	133,93	9,5	13,80	9
3	5,84	16,62	97,06	6,9	20,66	9
4	4,65	7,32	34,04	2,4	23,07	9
5	5,39	4,23	22,80	1,6	24,68	9
6	10,67	3,5	37,35	2,6	27,32	9
7	5	3,33	16,65	1,2	28,50	9
8	4,96	3,2	15,87	1,1	29,62	9
9	4,34	3,32	14,41	1,0	30,64	20
10	3,16	3,13	9,89	0,7	31,34	20
11	5,06	3,46	17,51	1,2	32,58	20
12	3,5	4,57	16,00	1,1	33,71	20
13	6,5	5,16	33,54	2,4	36,08	20
14	5,18	5,2	26,94	1,9	37,99	20
15	6,03	5,03	30,33	2,1	40,13	20
16	5,32	5,1	27,13	1,9	42,05	20
17	6,06	4,7	28,48	2,0	44,07	20
18	5,26	5,16	27,14	1,9	45,99	20
19	4,76	5,42	25,80	1,8	47,81	20
20	2,88	4,8	13,824	1,0	48,79	20
21	5,06	5,1	25,81	1,8	50,61	20
22	2,58	5,36	13,83	1,0	51,59	20
23	3,58	3,5	12,53	0,9	52,48	20
24	3,2	3,2	10,24	0,7	53,20	20
25	2,7	2,4	6,48	0,5	53,66	20

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 14 consta de los principales parámetros estimados para pruebas metalúrgicas; en estas pruebas el mineral se lixivia realizado el proceso de curado, considerando la concentración de ácido sulfúrico a 45 kg/t.

Tabla 14
Prueba de lixiviación en la columna 4, con curado

Condición de la prueba: columna 4: con curado 45 kg/t			
Muestra	Mineral oxidado de cobre 89,55 % -m11/2"		Alimentación
Curado	Manual	Peso mineral, kg	87,20
Tasa de riego L/h/m ²	1,20	Humedad, %H ₂ O	2,90
Densidad aparente	1,86	Peso seco, kg	84,67
Altura columna, cm	160,00	TCu, %	1,67
Altura libre superior, cm	30,00	ASCu, %	1,25
Interior filtror, cm	1,00	TCu, g	1414,01
Altura mineral, cm	143,00	ASCu, g	1058,39

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15
Balance metalúrgico de la columna 4, con curado

Columna 4: con curado 45 kg/t						
	Volumen	Ley	Finos	% Recup.	% Recup. Acum.	conc. de ácido en el riego g/l
0					0	9
1	2,13	50,33	107,20	7,6	7,6	9
2	5,575	45,23	252,16	17,8	25,4	9
3	5,74	18,07	103,72	7,3	32,7	9
4	4,55	7,66	34,85	2,5	35,2	9
5	5,29	6,15	32,53	2,3	37,5	9
6	10,57	6,09	64,37	4,6	42,1	9
7	5,7	5,04	28,73	2,0	44,1	9
8	7,91	5,6	44,30	3,1	47,2	9
9	3,5	5,96	20,86	1,5	48,7	9
10	4	5,83	23,32	1,6	50,4	9
11	4,33	5,83	25,24	1,8	52,1	9
12	3,88	5,62	21,81	1,5	53,7	20
13	4,24	5,83	24,72	1,7	55,4	20
14	5,63	5,8	32,65	2,3	57,7	20
15	4,3	5,5	23,65	1,7	59,4	20
16	5,9	4,19	24,72	1,7	61,2	20
17	6,1	3,73	22,75	1,6	62,8	20
18	7,33	3,21	23,53	1,7	64,4	20
19	5,6	2,97	16,63	1,2	65,6	20
20	5,86	3,14	18,40	1,3	66,9	20
21	5,46	2,95	16,11	1,1	68,1	20
22	4,98	3	14,94	1,1	69,1	20
23	3,3	3,34	11,022	0,8	69,9	20
24	6,1	2,93	17,873	1,3	71,2	20
25	5,24	2,82	14,7768	1,0	72,2	20

Fuente: Elaboración propia

4.2. Discusión

En la Figura 25 para la columna 1, se puede observar la recuperación de cobre, en una lixiviación sin curado, con un tamaño de partícula de 89,55 % menos malla -11/2", a un pH = 2 y a concentración de 35 kg/t de ácido sulfúrico como lixivante, con un tiempo de 25 días, obteniéndose una recuperación de cobre del 34,09 % que resulta baja.

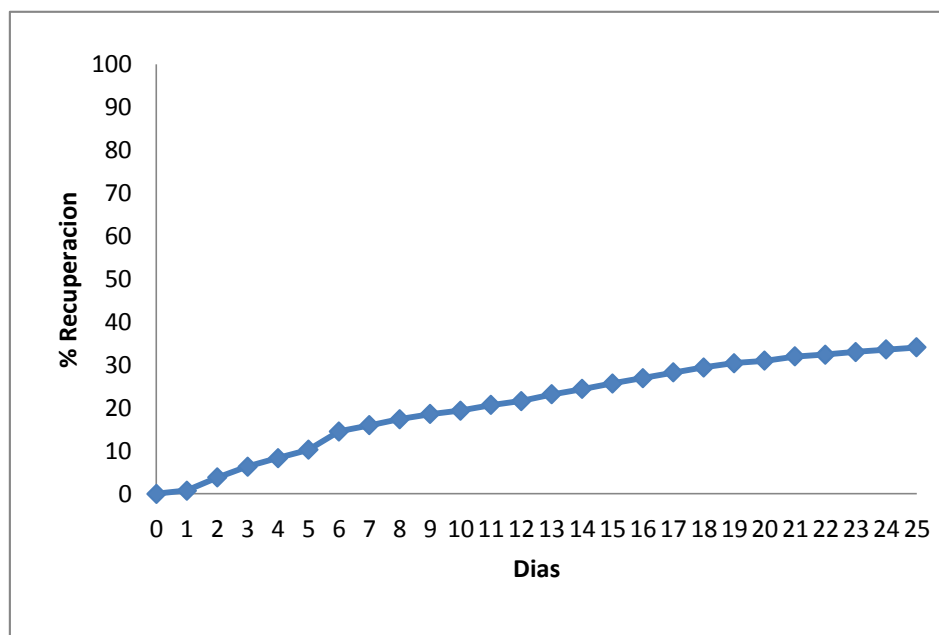


Figura 25. Recuperación de Cu lixiviable sin curado 35 kg/t

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 26 para la columna 2, se puede observar la recuperación de cobre, en una lixiviación sin curado, con un tamaño de partícula de 89,55 % menos malla 11/2”, a un pH = 1,8 y a concentración de 45 kg/t de ácido sulfúrico como lixivante, con un tiempo de 25 días, obteniéndose una recuperación de cobre del 37,64 % que sigue permaneciendo baja.

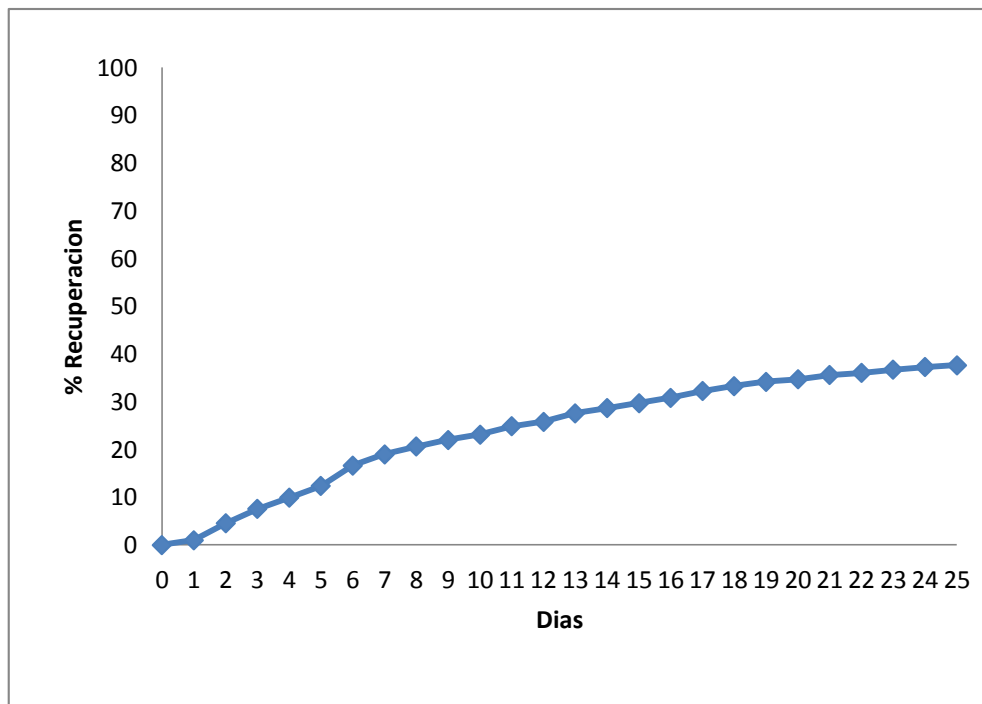


Figura 26. Recuperación de Cu lixiviable sin curado 45 kg/t

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 27 para la columna 3, se observa la recuperación de cobre con curado, con un tamaño de partícula de 89,55 % menos malla 11/2”, a un pH = 1,8 y a concentración de 35 kg/t de ácido sulfúrico como lixiviante, con un tiempo de 25 días, obteniéndose una recuperación de cobre del 53,66 % que se ha incrementado significativamente.

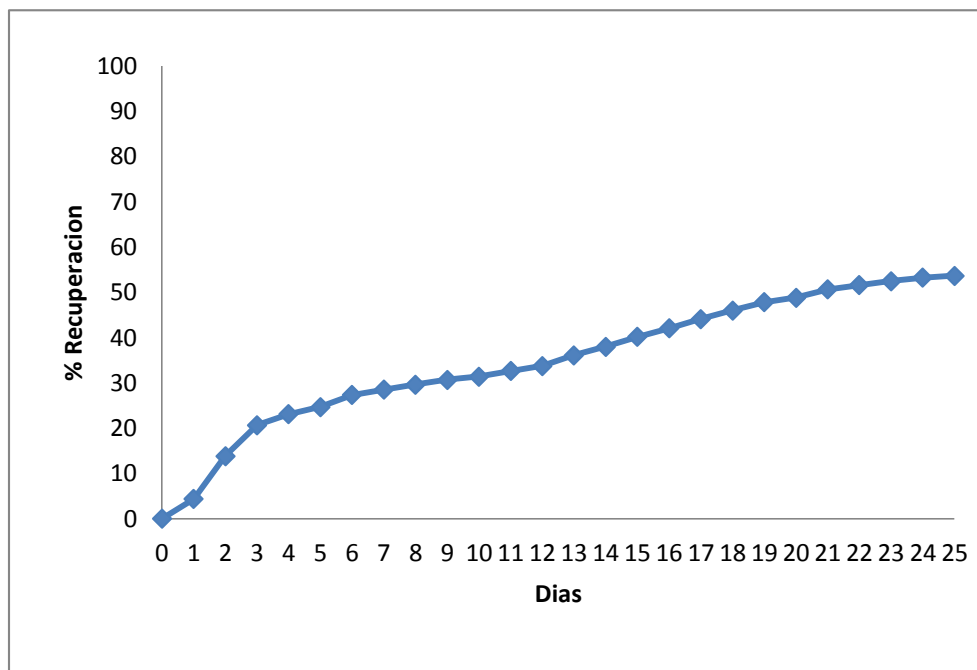


Figura 27. Recuperación de Cu lixiviable con curado 35 kg/t

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 28 para la columna 4, se observa la recuperación de cobre con curado, con un tamaño de partícula de 89,55 % menos malla 11/2”, a un pH = 1,7 y a concentración de 45 kg/t de ácido sulfúrico como lixiviante, con un tiempo de 25 días, lográndose una recuperación de cobre del 72,22 % que es la mayor obtenida.

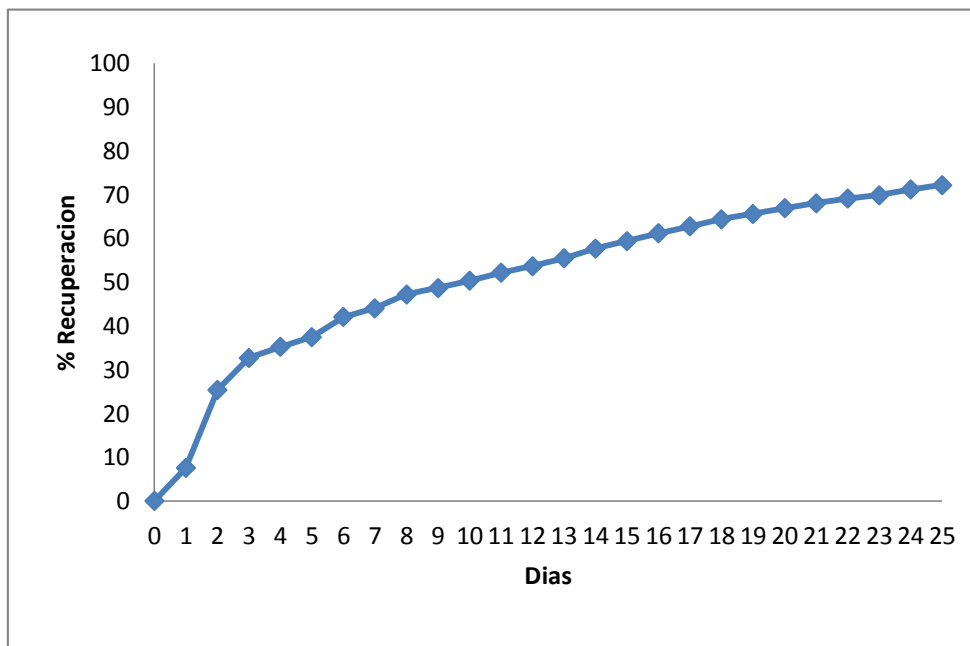


Figura 28. Recuperación de Cu lixiviable con curado 45 kg/t

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 29 se observa las recuperaciones de cobre de las pruebas metalúrgicas realizadas, se ve claramente el efecto de la concentración de ácido sulfúrico en la recuperación del cobre y la consideración de curado antes de ser lixiviadas.

Las columnas 1 y 2 son sin curado y las 3 y 4 son con curado.

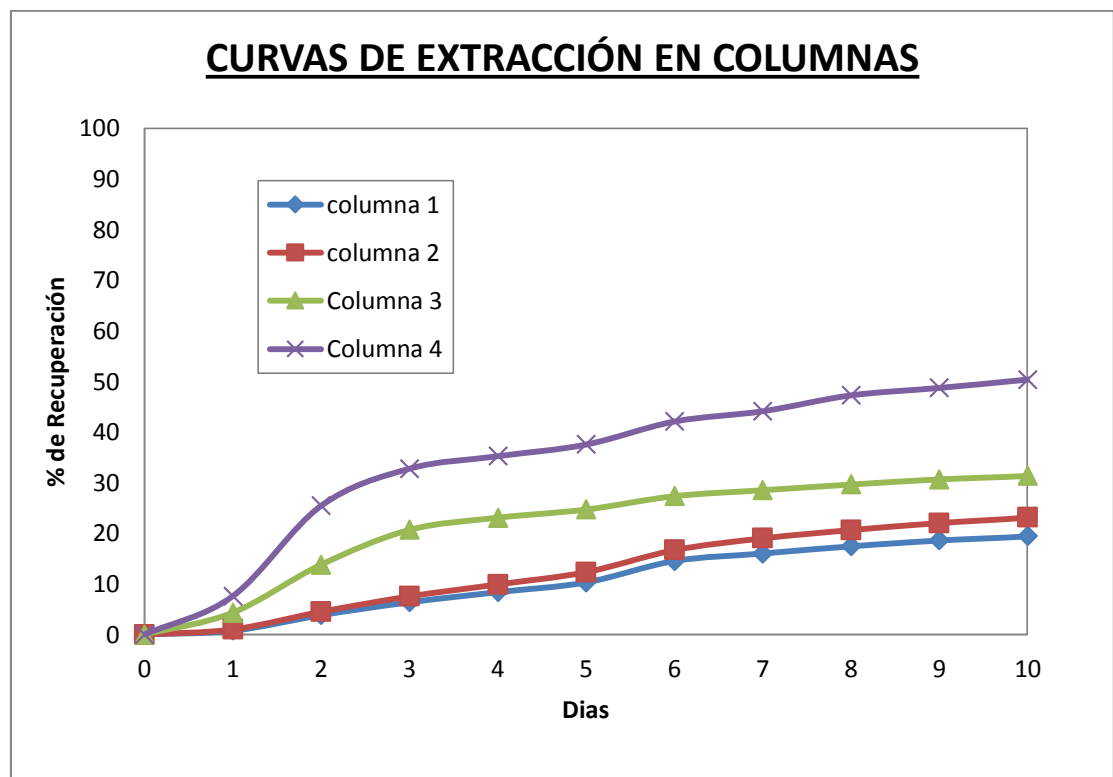


Figura 29. Recuperación de Cu lixiviable en las columnas 1, 2, 3 y 4

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La concentración del ácido sulfúrico y el pH, en las pruebas de lixiviación en la columna 1 y 2 de minerales oxidados de cobre tipo crisocola y malaquita, sin hacer curado influyen negativamente en la recuperación de cobre; alcanzándose una mayor recuperación de cobre cuando se incrementa la concentración de ácido, obteniéndose una recuperación de cobre del 34,09 % y 37,64 %, a concentraciones de ácido 35 kg/t y concentraciones de 45 kg/t de ácido sulfúrico como lixivante respectivamente.

Las pruebas de lixiviación en la columna 3 y 4 de minerales oxidados de cobre tipo crisocola y malaquita, con curado influyen positivamente en la recuperación de cobre; alcanzándose una mayor recuperación de cobre cuando se incrementa la concentración de ácido, obteniéndose una recuperación de cobre del 53,66 % y 72,22 %, a concentraciones de ácido 35 kg/t y concentraciones de 45 kg/t de ácido sulfúrico como lixivante respectivamente.

La máxima extracción de cobre alcanzada fue de 72,22 %, que corresponde a pH 1,7. Según las pruebas experimentales que se realizaron se obtuvieron los parámetros operativos para realizar el presente trabajo de investigación, estas fueron: tiempo de 25 días, tamaño de partícula de 11/2 mallas.

En consecuencia, el curado resultó ser indispensable, en primer lugar, para obtener una mayor recuperación, obteniéndose casi al doble.

En cambio, el incremento de ácido de 35 kg/t a 45 kg/t sin curado, tuvo un incremento en la extracción de solo 10 a 30 %.

RECOMENDACIONES

Profundizar el estudio cinético del sistema para entender el mecanismo de reacción para este tipo mineral.

Estudiar la granulometría del mineral, para determinar la extracción óptima y lograr un mayor contacto.

El trabajo experimental desarrollado requiere ser confirmado en lo que se refiere al análisis de los parámetros estudiados, para lo cual se sugiere llevar a cabo a pruebas a escala industrial, de tal forma que los resultados experimentales puedan ser analizados en una forma más práctica.

Se recomienda realizar una evaluación costo-beneficio para verificar si es o no rentable para la empresa elevar el consumo de reactivos para obtener mejores porcentajes de extracción de cobre en el proceso, y estos porcentajes tengan valores económicos mayores a los gastos realizados para justificar de esta manera su implementación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMP Advanced Mineral Processing S.L. (2017), catálogo cilindros aglomeradores.

Benavente O., Hernández M. (2008). Lixiviación relaves gruesos de flotación Planta de Sulfuros Mantos Blancos. Departamento de ingeniería Metalúrgica, U. de Antofagasta.

Barraza Cortes D. (2016). Operación de plantas de extracción por solventes para cobre: Una visión general de Cognis.

Barrera, R. Bustos, S.et al. (2003). Column leach tests with ROM oxide ore from Lomas Bayas. Hydrometallurgy of Copper: Leaching and Process

Bartlett R.W. (1992). Solution Mining: Leach and Fluid Recovery of materials. Gordon and Breach Science Publishers, Reading, UK.

Dixon, D.G..Petersen. (2003). Comprehensive modeling study of Chalcocite column and heap bioleaching. Hydrometallurgy of Copper: Leaching and Process

Domic, E.M. (2001). Hidrometalurgia: Fundamentos, Procesos y Aplicaciones. Andros impresores Ltda, Santiago, Chile.

Fuentes Juan C. G. Operador Planta Lix/Sx/Ew (2004). Hidrometalurgia: conceptos teóricos y operacionales

Ipinza Abarca, Jorge. Hidrometalurgia; Universidad Arturo Prat

Prudent, G. (2000). Manual de operaciones planta de cátodos.

Soto Pérez, R. Octubre (2012). Hidrometalurgia Aplicada del Cobre; Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Perú

Tomas Havlik (2008), Hydrometallurgy: Principles and Applications; Technical University Kosice, Slovak Republic. Illustrated, reprint.

Troncoso, J.. (2010). Efecto del férrico y del cloruro en la lixiviación de mineral mixto de cobre de Radomiro Tomic. Informe de memoria de título para optar al título de ingeniero civil metalúrgico. Universidad de Concepción. Chile

ANEXOS

Datos:

$$W_{min} = 87,20 \text{ kg}$$

$$\phi_{interno} = 19,8 \text{ cm} = 0,198 \text{ m}$$

$$\text{Altura inicial} = 1,60 \text{ m}$$

$$\text{Altura libre} = 10 \text{ cm}$$

$$\text{Conc. } H^+ = 97 \%$$

Anexo: 1

Cálculo de la densidad aparente del mineral

$$s = \pi \times r^2$$

$$v = s \times h_f$$

$$\rho_{aparente} = \frac{m}{v}$$

$$s = \pi \times (0,099)^2$$

$$v = 0,0308 \text{ m}^2 \times 1,50 \text{ m}$$

$$\rho_{aparente} = \frac{87,2 \text{ Kg}}{46 \text{ L}}$$

$$s = 0,0308 \text{ m}^2$$

$$v = 0,046 \text{ m}^3 = 46 \text{ L}$$

$$\rho_{aparente} = 1,89 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \text{ ó } \text{g/cm}^3$$

Datos:

$$m_H = 150,29 \text{ g}$$

$$m_S = 145,98 \text{ g}$$

Anexo: 2

Cálculo del porcentaje de humedad del mineral

$$\%H = m_H - m_S$$

$$\%H = 150,29 - 145,93$$

$$\%H = 4,36 \text{ g}$$

$$150,29 \text{ g} \longrightarrow 100 \%$$

$$4,36 \text{ g} \longrightarrow x$$

$$x = 2,90 \%H$$

$$87,2 \text{ kg} \longrightarrow 100 \%$$

$$x \longrightarrow 2,90 \%$$

$$x = 2,53 \text{ kg } H_2O \cong 2,53 \text{ L } H_2O$$

Anexo: 3

Cálculo de la tasa de riego para las columnas 1, 2, 3 y 4

$$\text{Tasa de riego} = \frac{12L}{h.m^2} \times S$$

$$\text{Tasa de riego} = \frac{12L}{h.m^2} \times 0,0308$$

$$\text{Tasa de riego} = 0,3696 \frac{L}{h}$$

$$\text{Tasa de riego} = 0,3696 \frac{L}{h} \times \frac{24h}{dia} = \mathbf{8,8 L/d}$$

Anexo: 4

Cálculo de la cantidad de ácido e ILS para las pruebas sin curado:

cantidad H⁺: columna 1

$$\frac{35kgH^+}{1000kg.min} \times 87,2 kg = 3,052 kg H^+$$

$$v = \frac{m}{\rho_{H^+}}$$

$$v = \frac{3,052kg}{1,84 \frac{kg}{L}}$$

$$v = 1,66 L H^+ \rightarrow \frac{1,66}{0,97} = 1,71 L H^+$$

cantidad de ILS: columna 1

$$8,8 L - 1,71 L H^+ = 7,09 L ILS$$

cantidad H⁺: columna 2

$$\frac{45kgH^+}{1000kg.min} \times 87,2 kg = 3,924 kg H^+$$

$$v = \frac{m}{\rho_{H^+}}$$

$$v = \frac{3,924kg}{1,84 \frac{kg}{L}}$$

$$v = 2,13L H^+ \rightarrow \frac{2,13}{0,97} = 2,19 L H^+$$

cantidad de ILS: columna 2

$$8,8 L - 2,19 L H^+ = 6,61 L ILS$$

Anexo: 5

Cálculo de la cantidad de ácido e ILS para las pruebas con curado:

cantidad H⁺: columna 3

$$\frac{35\text{kgH}^+}{1000\text{kg. min}} \times 87,2 \text{ kg} = 3,052 \text{ kg H}^+$$

$$v = 1,71 \text{ L H}^+$$

El 70% es 1,20 L H⁺

cantidad H⁺: columna 4

$$\frac{45\text{kgH}^+}{1000\text{kg. min}} \times 87,2 \text{ kg} = 3,924 \text{ kg H}^+$$

$$v = 2,19 \text{ L H}^+$$

El 70% es 1,53 L H⁺

cantidad de ILS: pruebas con curado al 10 %H

$$87,2\text{kg} \longrightarrow 100\%$$

$$X \longrightarrow 10\%$$

$$X = 8,72 \text{ kg ILS} \cong 8,72 \text{ L ILS}$$

$$8,72 \text{ L H}_2\text{O} - 2,53 \text{ L H}_2\text{O} = \mathbf{6,19 \text{ L ILS}}$$

Lixiviación de la columna 3

$$\text{Cant. H}^+ = 0,51 \text{ L}$$

$$\text{Cant. ILS} = 8,29 \text{ L}$$

Lixiviación de la columna 4

$$\text{Cant. H}^+ = 0,66 \text{ L}$$

$$\text{Cant. ILS} = 8,14 \text{ L}$$