

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

LIXIVIACIÓN DE MINERALES FINOS

OXIDADOS DE COBRE

TESIS

Presentada por:

Bach. Anderson Jesús Mamani Gozme

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

LIXIVIACIÓN DE MINERALES FINOS OXIDADOS

DE COBRE


TESIS

Tesis sustentada, y aprobada el día 21 de diciembre del dos mil diecisiete por el Bachiller Anderson Jesús Mamani Gozme, siendo el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO


.....
Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

VOCAL


.....
Mgr. Raúl del Pozo Tello

ASESOR


.....
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Dios, quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. A mi familia, quienes por ellos soy lo que soy.

Para mis padres, por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento se dirige a quien ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto, a Dios, que en todo momento está conmigo ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez. Eres mi guía, el destino de mi vida

RESUMEN

En la planta de lixiviación en pilas en Corocoro, La Paz Bolivia, el 10 % de mineral fino son separados del circuito de chancado y es enviado a los botaderos con leyes promedio de 0,5 % de cobre. En el presente trabajo se realizó un estudio de estos minerales finos marginales, con el fin de demostrar que aún son tratables, en las diferentes pruebas programadas, considerando primeramente el tratamiento por mallas, se logra la recuperación de cobre entre 45,5 a 58,64 % y en el tratamiento de lixiviación directa del mineral fino se logra recuperaciones de cobre del 33,7 %. Esta solución obtenida posee carga iónica adecuada (0,82 a 2,2 g/L de sulfato).

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción del problema	2
1.1.1. Antecedentes del problema	2
1.1.2. Problemática de la investigación	3
1.2. Formulación del problema	4
1.3. Justificación e importancia	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivo específicos	7
1.5. Hipótesis	7
1.5.1. Hipótesis general	7
1.5.2. Hipótesis específica	7

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio	8
2.2. Bases teóricas	10
2.2.1 Introducción.	10
2.2.2 Minerales de cobre.	12
2.2.3 Métodos de lixiviación.	13
2.2.4 Solventes para la lixiviación de los minerales de cobre	19
2.2.5 Procesos de disolución de minerales de cobre	21
2.2.6 Lixiviación en medio ácido sulfúrico de las especies mineralógicas de cobre porfídico	23
2.2.7 Importancia de la termodinámica y cinética en el proceso de lixiviación de minerales de cobre.	36
2.2.7.1 Aspecto termodinámico.	37
2.2.7.2 Interpretación de un diagrama de pourbaix del sistema H ₂ O-cobre	38
2.3. Definición de términos	40

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación	47
3.1.1 Tipo de investigación	47
3.1.2 Diseño de la investigación	47
3.2. Población y muestra	48
3.3. Operacionalización de variables	49

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales especies minerales de cobre de importancia económica, agrupadas según su ubicación aproximada en el yacimiento, con su composición química más frecuente.	24
Tabla 2. Velocidades de disolución de las principales especies de cobre, al ser expuestas a una solución de ácido sulfúrico diluido, ordenadas según sus cinéticas relativas.	27
Tabla 3. Principales minerales de silicatos, presentes en la ganga de los yacimientos de cobre porfídico, incluyendo su composición química más probable.	30
Tabla 4: Distribución granulométrica del mineral fino.	51
Tabla 5: Distribución granulométrica en intervalos de malla	52
Tabla 6: Distribución granulométrica del mineral fino	62
Tabla 7. Distribución granulométrica del mineral fino por mallas	63
Tabla 8. Recuperación de cobre de mineral fino mallas 1/4 + 4	64
Tabla 9. Recuperación de cobre de mineral fino mallas -m 6 + 10	64
Tabla 10. Recuperación de cobre de mineral fino mallas -m 20 + 35	65
Tabla 11. Recuperación de cobre de mineral fino mallas -m 35	65
Tabla 12. Resumen de la recuperación de cobre de mineral fino mallas: 1/4 + 4, -m 6 + 10, -m 20 + 35 y -m 35	66

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Lixiviación en pilas.	16
Figura 2. Tanque de lixiviación	19
Figura 3. Contenido de Cu de los productos intermedios en (%).	23
Figura 4. Extracciones de cobre experimentales en función del tiempo, para distintas especies mineralógicas de concentrados de cobre, en condiciones similares	28
Figura 5. Datos experimentales de consumos de ácido propios de la ganga para tres tipos de roca habituales en yacimientos de cobre.	32
Figura 6. Reactividad al ácido creciente en función de la mayor alteración de los silicatos de la roca y energías de formación inversamente proporcionales a esa mayor alteración.	34
Figura 7. Resultados experimentales de recuperación de cobre y consumo de ácido en 3 minerales de crisocola hospedados en gangas	36
Figura 8. Condiciones necesarias para lixiviación de botaderos cobre	39
Figura 9. Diagrama de flujo lineal para el trabajo de investigación	48
Figura 10. Mineral clasificado en diferentes mallas (ASTM)	52
Figura 11. Lixiviación por agitación de mineral clasificado en diferentes mallas.	60
Figura 12. Ripios de lixiviación por agitación de mineral clasificado en diferentes	60
Figura 13. Distribución granulométrica del mineral fino abertura vs. porcentaje pasante.	62

Figura 14. Distribución granulométrica del mineral fino por mallas.	63
Figura 15. Recuperación del cobre de mineral fino a diferentes mallas	67
Figura 16. Recuperación del cobre de mineral fino malla -m 4	68
Figura 17. Recuperación del cobre a diferente malla	68

INTRODUCCIÓN

Es común pensar en lixiviación como una simple disolución selectiva del metal deseado, por consiguiente si se tiene ácido y un mineral, se mezcla en proporciones razonables y se espera que el ácido haga su trabajo, por ende lo que hasta el momento interesa es la masa del mineral, su ley, el volumen del ácido, su concentración y el tiempo necesario para que la disolución sea completa. Pero si interesa saber cómo ocurre la disolución, como la masa del Cu y concentración del ácido va disminuyendo y cómo aumenta el catión Cu en la solución, para poder predecir mediante un modelo los valores óptimos y hacer proyecciones interpolando el modelo, entonces se debe monitorear el proceso analizando muestras mediante la titulación, para poder calcular el ácido libre, por lo tanto el consumo de ácido, así como la concentración del metal en solución, de acuerdo a estos valores se puede predecir el tiempo óptimo para el proceso, mediante las curvas cinéticas.

El fin del presente trabajo es realizar pruebas de lixiviación por agitación de finos óxidos de cobre, con el objeto de comparar a diferentes mallas el contenido de cobre en el PIs del mineral fino oxidado de cobre proveniente de la planta de lixiviación de Corocoro La Paz - Bolivia.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

La planta hidrometalúrgica de cobre de Corocoro, es la primera corporación minera de Bolivia (comibol), está ubicada en la provincia de La Paz, país Bolivia, en las coordenadas latitud: 17 10 08, longitud: 68 26 33, $17^{\circ}10'08.0''S$ $68^{\circ}26'33.0''W$ y 4007 m.s.n.m., la cual procesa el cobre de óxidos en su planta de óxidos, la empresa separa los finos del mineral antes de ser lixiviados en pilas, estos finos son tratados por lixiviación por agitación.

Corocoro es una antigua mina de cobre de explotación en socavones (túneles) que estuvo paralizada desde la década de 1980 hasta el 2009, año en que ha sido reactivada por el gobierno actual como un proyecto hidrometalúrgico para la reproducción de cobre catódico o electrolítico, obtenido mediante procesos de lixiviación por agitación y pilas dinámicas.

La planta hidrometalúrgica de cobre de Corocoro tiene como meta alcanzar el 100 % de su producción, que equivale a las 300 toneladas de placas de cobre inicialmente previstas, informó su gerente, Gustavo Choque, quien además aseguró que la producción va en aumento. El próximo año se incrementa de 170 toneladas al mes a 200 toneladas mes, así que el incremento será notorio y se está planificando llegar posteriormente a 300 toneladas.

Esta especie de mineral oxidado de cobre va hacia una gran chancadora o trituradora que muele el metal. Este equipo fue instalado toneladas de mineral por día. El producto pasa por otro tratamiento de pulverización hasta un equipo denominado aglomerador, donde se mezcla con agua y ácido sulfúrico para formar pequeñas estructuras ovoides.

El compuesto es trasladado hasta un espacio de tierra para disolver el cobre, de este proceso se extrae el mineral en líquido que posteriormente se lleva a la sección de electrólisis donde se vacía en moldes para que finalmente se logren las láminas de cobre metálico.

1.1.2. Problemática de la investigación

Luego de revisar textos y artículos expuestos donde se señalan los parámetros y materiales usados hasta la actualidad en la lixiviación de minerales oxidados de cobre. Siendo el cobre lixiviado en una solución acuosa y empleando mayormente como agente lixivante, soluciones de ácido sulfúrico. Se han venido realizando estudios acerca de procesos con el fin no solo de reducir la contaminación si no de optimizar y reducir costos del proceso de lixiviación. Estos se basan en el estudio de procesar finos que son separados en la operación de circuito de chancado con el fin de ser lixiviados, por contener cantidades de cobre apreciables. La experiencia demuestra que estos procesos son eficientes y sus costos de operación son adecuados, bajo contenido de consumo de ácido sulfúrico. En la actualidad la ley exige mantener ciertos parámetros en la lixiviación de minerales, con el fin de preservar el medio ambiente. Por lo cual la finalidad del presente trabajo de tesis ha sido proponer lo mencionado, considerando la reducción del consumo de ácidos en los finos de minerales y el contenido de ganga de carbonatos calcáreos.

1.2. Formulación del problema

Los yacimientos mineros de Corocoro presentan una considerable variación en su mineralización de cobre, la zona de mineralización presenta en función al incremento del contenido de cobre oxidado y presencia de cobre nativo. La mineralización variada mena de cobre

donde existen óxidos de cobre (crisocola, malaquita, azurita, tenorita y cuprita) y cobre nativo. La ganga de la mineralización está representada predominantemente por calcosilicatos, magnetita y minerales de arcillas y óxidos de Fe como producto de la alteración supérgena.

¿De qué manera la lixiviación de minerales finos, que son separados del proceso de lixiviación en pilas, pueden mejorar la recuperación de cobre considerando el alto contenido de finos?

1.3. Justificación e importancia

Si al gran peso de la industria hidrometalurgia en el país, se le une la necesidad de revalorizar los residuos sólidos finos generados en ella, esta comunidad parece idónea para desarrollar procesos relacionados con la recuperación de cobre a partir de finos de minerales oxidados de cobre. En la actualidad existen principalmente una alternativa a la hora de llevar a cabo el tratamiento de los finos: la vía hidrometalúrgica. Esta alternativa se estudiará con mayor nivel de detalle en los siguientes apartados.

Los procesos descritos en este proyecto de tesis se centran en la vía hidrometalúrgica y, más concretamente, en procesos basados en

lixiviaciones de carácter ácido mediante los cuales se consiguen obtener cobre metálico o alguno de los principales compuestos de cobre. La principal ventaja que presentan estos procesos es que la materia prima utilizada en las etapas de lixiviación es únicamente óxido.

Por lo tanto, en el caso de obtener resultados esperanzadores en lo que a la producción de cobre metálico o uno de los compuestos de cobre, esos procesos de producción adquirirían gran relevancia al poder tratar grandes cantidades de óxidos y otros concentrados derivados de residuos industriales.

El presente trabajo de investigación se justifica porque con el proceso planteado para minerales finos de cobre que reduce el tiempo de lixiviación de los óxidos y se incrementará la recuperación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Estudiar la lixiviación de minerales finos oxidados de cobre para la obtención de soluciones ricas de cobre.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Estudiar el consumo de reactivos de lixiviación H_2SO_4 de minerales oxidados de cobre.
2. Estudiar la cinética de disolución de los minerales finos y la recuperación de cobre.

1.5. **Hipótesis**

1.5.1. Hipótesis general

El estudio de la lixiviación permite obtener soluciones ricas de cobre.

1.5.2. Hipótesis específicas

1. Se incrementará el consumo de reactivos en la lixiviación de mineral finos proveniente del circuito de chancado.
2. La lixiviación de minerales finos separados del proceso de lixiviación en pilas por exceso de finos mediante H_2SO_4 , permite incrementar la recuperación de cobre, considerando el alto contenido de finos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

En el contexto histórico se puede ver que el Perú tuvo el privilegio en América de realizar las primeras experiencias en la hidrometalurgia del tratamiento de aguas de mina en 1637 con Alonso Barba para extraer cobre. Pasaron los años hasta que en 1848 el químico Pedro Hugón instaló en Arqueta (Cajamarca) una planta de lixiviación (proceso Augustín). En Hualgayoc en 1890 se iniciaron los primeros ensayos de lixiviación, para que un año más tarde se instalen oficinas de lixiviación en el mismo Hualgayoc y en Bambamarca.

La mayoría de trabajos de investigación son referidos a minerales sulfurados de cobre, que normalmente son tratados por vía pirometalúrgica, aunque en los últimos 20 años se está investigando poder tratar por vía hidrometalúrgica estos tipos de minerales, considerando también los concentrados de cobre provenientes de los procesos de flotación.

Jorge S., Héctor D. y Tomás estudiaron el grado de concentración de iones disueltos en las soluciones recirculantes durante la lixiviación de minerales oxidados de cobre. Donde las pruebas de lixiviación en lecho fijo inundado demostraron que tiene efectos perjudiciales sobre la recuperación de cobre total.

Corocoro es una antigua mina de cobre de explotación en socavones (túneles) que estuvo paralizada desde la década de 1980 hasta el 2009, año en que ha sido reactivada por el gobierno actual como un proyecto hidrometalúrgico para la producción de cobre catódico o electrolítico, obtenido mediante procesos de lixiviación por agitación y pilas dinámicas.

Este proyecto consta de dos fases: la primera denominada como planta hidrometalúrgica de cobre a cargo de la minera estatal corporación minera de Bolivia (**comibol**).

En junio de 2008, el gobierno firmó el contrato de riesgo compartido entre la estatal corporación minera de Bolivia (**comibol**) y Korea Resources Corporation (**kores**) de Corea del Sur, para la explotación del yacimiento cuprífero de Corocoro.

El proyecto comprende dos fases, la primera de prospección del área

por parte de **kores** y la instalación de una planta hidrometalúrgica a cargo de **comibol**. La segunda fase, a cargo de **kores** con una inversión de 210 millones de dólares, se iniciará a la conclusión de las tareas de prospección, con una operación a cielo abierto para procesar 10 mil a 15 mil toneladas diarias y la obtención de 30 mil a 50 mil TMF/año de Cu.

La planta hidrometalúrgica, en la primera fase, tiene una capacidad de tratamiento de 300 t/día de colas y desmontes (residuos) de antiguas operaciones, para la recuperación de cobre catódico a un ritmo de 390 t/mes, comenzó a operar el 27 de octubre de 2009.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Introducción

En la extracción del mineral se obtienen trozos de diverso tamaño, que pueden llegar a medir más de un metro de diámetro. El mineral debe ser fragmentado y molido en tamaños adecuados a cada sistema de tratamiento ulterior.

Las operaciones de fragmentación utilizadas son: el chancado y la molienda. Ambas pueden realizarse en etapas sucesivas denominadas:

proceso primario, secundario y terciario. Obteniéndose partículas de menor tamaño.

Si el mineral va a ser sometido a un proceso de “lixiviación”, los rangos de la partícula podrán oscilar en 6-10 mm de diámetro. Si el proceso ulterior es la “flotación” de las partículas su tamaño tendrá que ser muy fino (0,1 mm), obteniéndose en forma de una “pulpa” donde se agrega agua y reactivos para facilitar el proceso. El tamaño se expresa en micrómetros. Las operaciones de fragmentación son aquellas donde el material producido es seleccionado en tamices y la que es rechazada es devuelta a la etapa anterior; con la ayuda de fajas transportadoras y tolvas.

La secuencia de operaciones que es utilizada para extraer el cobre del tipo “óxidos”, mediante modernos procesos de lixiviación, es la siguiente:

- Lixiviación del mineral.
- Purificación de la solución mediante extracción con solvente.
- Electro-obtención de cátodos de cobre.

Lixiviación:

Lixiviación se denomina al proceso químico que consiste en la solución de diversas sales presentes en los minerales. Su objetivo es obtener en solución una determinada especie química relativamente concentrada (solución rica o fuerte), la que se separa de la ganga, la cual constituye el relave. Tradicionalmente la lixiviación se realiza con dos tipos de sistemas:

- Percolación en grandes estanques abiertos (piscinas o bateas)
- Agitación en baterías de estanques provistos de grandes hélices

2.2.2 Minerales de cobre

Definición.

Se denominan minerales de cobre a aquellos compuestos inorgánicos naturales, que contienen especies mineralógicas en cuyas fórmulas químicas hay átomos de cobre.

Clasificación de los minerales de cobre.

El cobre se encuentra en forma de diversas sales, en yacimientos que, según su composición química, se clasifican en:

- Minerales oxidados
- Minerales sulfurados

- Cobre nativo en la mayoría de los yacimientos se encuentran diversos tipos de minerales. La moderna tecnología ha permitido llegar a límites rentables de explotación de minerales de cobre de baja ley, especialmente en el caso de los minerales oxidados y sulfurados secundarios geológicamente en el caso de los yacimientos de tipo mixto, el recurso oxidado se encuentra a nivel más superficial que el sulfurado, por causa de la acción del oxígeno atmosférico

Los minerales oxidados de cobre de mayor frecuencia en nuestra zona son:

- Azurita $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
- Malaquita $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
- Crisocola $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Cuprita Cu_2O

Algunos minerales sulfurados son:

- Calcopirita CuFeS_2
- Covelina CuS
- Bornita Cu_5FeS_4
- Calcosina Cu_2S

2.2.3 Métodos de lixiviación

El estado actual de la lixiviación industrial de minerales de cobre se clasifica:

1. Lixiviación *in-situ*
2. Lixiviación en pilas o percolación
3. Lixiviación en tanques o por inundación
4. Lixiviación por agitación

Lixiviación *in-situ*, se lleva a cabo en el mismo yacimiento realizando labores para alimentar la solución lixivante y para la recuperación de la misma, después de cargarse con los valores metálicos. Los motivos del posible fracaso de este sistema se deben a la naturaleza del mismo, por ejemplo, la roca que contenga cobre sólo se puede lixiviar si es suficientemente porosa, para que la solución entre en contacto con el mineral.

Una importante ventaja de este método consiste en que la solución lixivante hace contacto con el mineral por gravedad (o por presión) a través de diversos ductos y la solución cargada se regresa a la superficie, donde se almacena en piletas o tanques para, posteriormente tratarse con el fin de recuperar los valores dejando la ganga en el mismo sitio; otras ventajas consisten en que no se requiere de equipo pesado, ni de

mayor preparación, además de que la inversión requerida y el costo operativo son bajos.

Sin embargo, presenta un potencial riesgo de contaminación de aguas subterráneas, por la dificultad de controlar y contener la solución lixiviante cuando existen fallas geológicas en el macizo rocoso.

Aunado a esta situación existe dificultad para extraer otros valores presentes además presenta baja velocidad de extracción y recuperación.

Actualmente este sistema no se emplea en la industria por: la dificultad de control del proceso, no reunir las características apropiadas y por limitaciones legislativas-ambientales que no permiten contaminar mantos acuíferos ni el subsuelo.

Lixiviación en pilas o percolación, para implementar este método se requiere preparar el lugar, para esto se limpia y nivela el terreno, actualmente todos los terrenos se preparan con una capa impermeable llamada geomembrana; se construyen desagües permanentes para el buen flujo de la solución rica, para lo cual se coloca mineral grueso y resistente sobre la capa impermeable, vea Figura 1, la cual casi siempre es artificial.

Para recuperar la solución rica, se colocan conductos, bajo las pilas de mineral, que la dirigen a un canal primario, este a su vez la descarga en un tanque receptor, el tanque deberá estar preparado para evitar las fugas de la solución y no erosionarse. En ocasiones se ventila, sobre todo cuando se tratan minerales parcialmente sulfurados. La solución lixivante se rocía sobre lotes, de tal forma que fluya a través del mineral.

Desde el tanque receptor de solución rica se inicia la preparación de la misma para su precipitación, en la cual se recupera el metal. La solución estéril se retorna al proceso para ser reutilizada nuevamente. El método se recomienda para minerales de baja ley y de grandes volúmenes de explotación, el proceso es lento. En la Figura 1 se muestra un sistema de riego por goteo de solución de lixiviación sobre el mineral apilado en terrero.



Figura 1 Lixiviación en pilas.

Fuente: <http://www.azud.com/riego/inicio/index.aspx>

Lixiviación en tanques o por inundación, este método se emplea para minerales de ley más elevada, en comparación con el de lixiviación en pilas, se emplea mineral con un tamaño relativamente grueso. Se emplean tanques de concretos revestidos con plomo (o asfalto) para resistir los agentes ácidos, están equipados con fondos filtrantes para permitir el retiro de la solución rica y agua de lavado.

En ocasiones se pretende lograr un flujo de solución en contracorriente, de tal forma que la primera lixiviación de mineral fresco se realiza con solución débil (con poco lixivante), que gradualmente se ha cargado con minerales parcialmente lixiviados, la solución cargada con los valores metálicos se prepara para su posterior precipitación.

La lixiviación final del mineral, que previamente entró en contacto con otras soluciones, se realiza con solución lixivante fresca más concentrada. De la precipitación de valores, la solución agotada se regresa al circuito de lixiviación (como solución fresca) después de ajustarse la concentración del reactivo de lixiviación. El tiempo de residencia en el circuito de lixiviación es de cinco a ocho días, con una recuperación metálica de 87 a 93 %. Este método en la actualidad se utiliza con éxito en la industria, usualmente se requiere purificar la solución con resultados muy favorables.

Lixiviación por agitación en general, se selecciona este método para minerales de alta ley, o bien para concentrados, por necesidad de rapidez en el tratamiento, la agitación actúa sobre minerales de tamaño fino, en los que no es posible aplicar el método por percolación.

La agitación hace posible que el tiempo de contacto sea reducido a horas, en lugar de días. La operación de lixiviación por agitación puede ser continua o intermitente, utiliza diversos tanques con agitación mecánica, para lixiviar, separar sólidos de líquidos y lavar los residuos sólidos estériles.

La solución cargada se filtra, clarifica y envía a la precipitación; el licor agotado se reajusta y recicla al circuito de lixiviación.

Los agitadores mecánicos son recipientes con impulsores colocados en el interior, Figura 2, mientras que, los neumáticos son a menudo recipientes equipados con un tubo central que funciona como tiro de aire, en ambos habrá que tener cuidado para evitar la corrosión ya que, por lo general, las soluciones para Cu y Zn son muy reactivas.



Figura 2 Tanque de lixiviación

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/g/leaching-tank.html>

2.2.4 Solventes para la lixiviación de los minerales de cobre

Los solventes más utilizados en la lixiviación de minerales de cobre son:

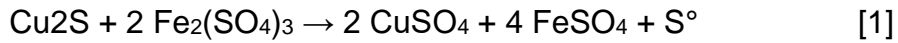
Ácidos diluidos

Para minerales oxidados siempre y cuando no contengan calcita o dolomita como ganga. El ácido más usado es el H_2SO_4 en el intervalo de concentración 2 - 10 %, que además es el más barato. Se utiliza en la lixiviación en terreros y en tanques por agitación.

Sulfato férrico en solución ácida (H_2SO_4)

Se utiliza para sulfuros y óxidos de cobre a excepción de minerales con carbonatos como ganga.

Los sulfuros se oxidan con el sulfato férrico:



el sulfato ferroso reacciona con el oxígeno del aire en presencia del H_2SO_4 para regenerar el sulfato férrico:



Soluciones alcalinas amoniacaes con carbonato de amonio.

Se utiliza para minerales oxidados con ganga soluble en ácidos. El cobre se solubiliza formando un complejo $[\text{Cu}_2(\text{NH}_3)_4\text{CO}_3]$ a partir del cual por calentamiento se desprende NH_3 y CO_2 quedando el cobre en forma de óxido o en forma elemental en polvo al reducirse con gases.

Al utilizar un solvente específico para la extracción económica del cobre, es necesario tratar minerales de baja ley, ya que los minerales ricos en cobre dificultan la lixiviación por lo siguiente:

- Son necesarias grandes cantidades de solvente
- El tiempo de reacción es mayor

Finalmente, los costos de amortización de las grandes plantas, así como los gastos de transporte de la pulpa y otros solventes no tienen relación con los costos de ruta pirometalúrgica.

Si a los minerales ricos en cobre se les trata con una solución concentrada, se disolverán algunos metales indeseables, así como también algo de la ganga, lo cual aumentará los gastos de refinación. Por otro lado, utilizar soluciones concentradas produce una disminución de la solubilidad del metal.

Una vez que el cobre está en solución formando determinada sal, se puede dejar en esa forma o bien reducirlo a su estado elemental.

2.2.5 Procesos de disolución de minerales de cobre

Los procesos hidrometalúrgicos se seleccionan en función del tipo y ley (concentración) del mineral, en general se puede dividir en 4 pasos principales los diferentes procesos hidrometalúrgicos:

- **Preparación de minerales.** Trituración, molienda, tratamiento térmico (tostación oxidante, clorante, o sulfatante).
- **Lixiviación.** Volquete, montón, agitada, a presión.
- **Tratamiento del producto de lixiviación.** Concentración, o refinación.
- **Obtención del metal.** Precipitación, recristalización, cementación, reducción electrolítica, reducción con gas.

Los yacimientos de minerales oxidados son explotados con explosivo con el objeto de reducir el tamaño de la roca y mejorar así la velocidad de disolución.

Los sulfuros son triturados y molidos hasta obtener el 100 % < 74 μm para poder así flotarlos y obtener concentrados con un contenido de 25–30 % de Cu.

En la Figura 3 se representa el consumo de energía en GJ/t de Cu en barra a partir de minerales oxidados y sulfurados. En las abscisas se presenta el contenido de cobre de cada paso de los procesos.

El consumo de energía en la preparación de minerales a partir de óxidos está representado por la línea unida por tres esferas oscuras de abajo hacia arriba, alcanzando un valor de 35-40 GJ/t de Cu en terrero, antes de lixiviarse y extraerse por solventes.

Para minerales sulfurados (esferas blancas) se utiliza casi el 80 % de energía en el proceso de minería y concentración, obteniéndose un concentrado de 25-30 % de Cu.

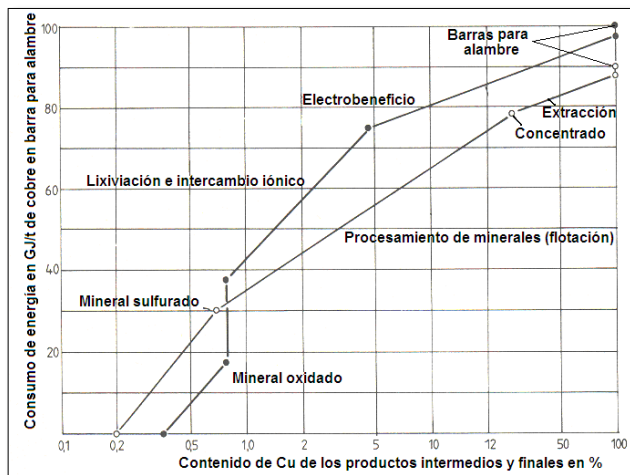


Figura 3 Contenido de Cu de los productos intermedios en %.
Fuente: Hilbrans H. Y Paschen, P. 1981

2.2.6 Lixiviación en medio ácido sulfúrico de las especies mineralógicas de cobre porfídico

En el listado que se presenta en la Tabla 1, se muestran las principales especies minerales de cobre con importancia económica, agrupadas según su zona aproximada en el yacimiento, incluyendo su composición química más probable (y/o más frecuente) y el contenido de cobre en la especie pura.

Según su frecuencia y relevancia económica, los más importantes entre los minerales oxidados son: la malaquita, la crisocola y la atacamita; entre los minerales sulfurados secundarios, están la calcosina y la covelina y, entre los sulfuros primarios, están la calcopirita y la bornita.

Tabla 1

Principales especies minerales de cobre de importancia económica, agrupadas según su ubicación aproximada en el yacimiento, con su composición química más frecuente.

Zona mineralizada	Especie mineralógica	Composición mas frecuentes	Cobre [%]
Zona oxidada secundaria	Cobre nativo	Cu^0	100
	Malaquita	$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ o $Cu_2CO_3Cu(OH)_2$	57,5
	Azurita	$2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ o $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$	55,3
	Chalcantita	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	25,5
	Brocantita	$CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$ o $Cu_4SO_4(OH)_6$	56,2
	Antlerita	$CuSO_4 \cdot 2Cu(OH)_2$ o $Cu_3SO_4(OH)_4$	53,7
	Atacamita	$3CuO \cdot CuCl_2 \cdot 3H_2O$ o $Cu_2(OH)_3Cl$	59,5
	Crisocola	$CuO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ o $CuSiO_3H_2O$	36,2
	Dioplasa	$CuSO_2(OH)_2$	40,3
	Neotosita	$(Cu_i \cdot Fe_j \cdot Mn_k)SiO_3$	Variable
	Cuprita	Cu_2O	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
	Pitch/limonita	$(Fe_i \cdot Cu_j)O_2$	Variable
	Delafosita	$FeCuO_2$	42,0
	Copper wad	$CuMnO_2Fe$	Variable
Zona de enriquecimiento secundario	Calcosina	Cu_2S	79,9
	Digenita	Cu_9S_5	78,1
	Djurleita	$Cu_{1,95-x}S$	Variable
	Covelina	CuS	66,5
	Cobre nativo	Cu^0	100
Zona primaria	Calcopirita	$CuFeS_2$	34,6
	Bornita	Cu_5FeS_4	63,3
	Enargita	Cu_3AsS_4	48,4
	Tenantita	$Cu_{12}As_4S_{13}$	51,6

Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista de la velocidad de disolución, cualitativamente se aprecian grandes diferencias entre las especies minerales procedentes de cada zona del yacimiento. Así, las especies más comunes se pueden agrupar en 5 categorías según su cinética relativa (Domic, E.M., 2001): muy rápida/ rápida /moderada /lenta /muy lenta:

- a. **Cinética muy rápida:** se encuentran los sulfatos de cobre, cloruros y carbonatos. Todos ellos se disuelven con muy poca acidez y a temperatura ambiente. Los sulfatos son solubles en agua sola; los cloruros liberan el metal y el cloro con facilidad; los carbonatos reaccionan con violencia, liberando el cobre y CO_2 gaseoso.
- b. **Cinética rápida:** en esta categoría están los silicatos de cobre y los óxidos que contienen Cu^{2+} , Fe^{3+} y Mn^{4+} . Para disolverse requieren de una cierta acidez, mayor que en el caso anterior.

En la naturaleza, estas especies se presentan en general como pátinas y en fracturas, por lo que muestran una gran superficie expuesta; a su vez, la crisocola es de estructura fibrosa y porosa, lo que facilita el acceso de las soluciones; en general, la disolución comprende la ruptura del relativamente débil enlace Cu-O, ya que es sabido que la facilidad de disolución de un silicato está directamente determinado por la solubilidad de su óxido principal.

- c. **Cinética moderada:** en la categoría de cinética moderada se encuentran el cobre nativo y los óxidos "reducidos", es decir, que contienen el cobre y el fierro en los estados cuproso Cu^{+1} y ferroso Fe^{2+} , respectivamente.

Para disolverse requieren de un oxidante y son sensibles a la agitación, a la temperatura y a la oxigenación. Si bien estas especies también tienden a ocurrir en fracturas, presentan el inconveniente de requerir un cambio de valencia - o sea deben entregar un electrón adicional - pasando al estado cúprico y/o férrico para poder disolverse, y es sabido que la transferencia de electrones constituye siempre un paso cinético adicional y, por consiguiente, más bien retardante.

- d. **Cinética lenta:** en la siguiente categoría de cinética lenta están los sulfuros simples de cobre. La lentitud de este grupo se explica ya que aquí se requiere oxidar el azufre desde el estado sulfuro S^{2-} a sulfato S^{6+} , es decir, implica el retiro de 8 electrones. A ello se puede agregar la transferencia de uno o más electrones adicionales si el cobre está en su forma cuprosa. En síntesis, para disolverse requieren de un oxidante.

- e. **Cinética muy lenta:** en la categoría de cinética muy lenta se encuentran los sulfuros dobles de cobre y fierro, y de cobre y arsénico. Por ejemplo, en el caso de la calcopirita se requiere oxidar el cuproso a cúprico y el sulfuro a sulfato, lo que totaliza la transferencia de 17 electrones. En este caso no sólo se requiere de

un oxidante, sino que también es frecuente que la disolución sea incompleta y se detenga después de alcanzar un cierto nivel.

La información cualitativa de cinéticas relativas, que se acaba de presentar para los principales minerales de cobre, está también resumida en la Tabla 2.

Tabla 2

Velocidades de disolución de las principales especies de cobre, al ser expuestas a una solución de ácido sulfúrico diluido, ordenadas según sus cinéticas relativas.

Cinética Relativa	Tiempo de referencia	Especies minerales de cobre en esta categoría
Muy rápida (a temperatura ambiente)	Segundos a minutos disolución es completa	Carbonatos (malaquita, azurita), sulfatadas (chalcantita, brochantita y antlerita) y cloruros (atacamita)
Rápida (requiere mayor acidez)	Horas disolución es completa	Óxidos cúpricos (tenorita) y silicatos (crisocola y dioplasa)
Moderada (requieren oxidante)	Días o semanas disolución puede no ser completa	Cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita) y algunos silicatos y óxidos complejos con manganeso (neotocita, copper wad y copper pitch)
Lenta (requieren oxidante)	Semanas o meses disolución puede ser completa	Sulfuros simples (calcosina, digenita, djurleita, covelina)
Muy lenta (requieren oxidante)	Años la disolución es incompleta	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita, tetrahedrita)

Fuente: Elaboración propia

En resumen, las velocidades relativas de disolución - cinética de lixiviación - de las distintas especies minerales de cobre están directamente relacionadas con el número de electrones que se necesita retirar para hacer soluble a cada una de esas especies.

En la práctica industrial, en el caso de la lixiviación de los minerales oxidados de cobre, la fuerza activadora es proporcionada por la existencia y por la cantidad disponible de iones de hidrógeno presentes en la solución lixivante. Por ejemplo, para la crisocola se tiene:

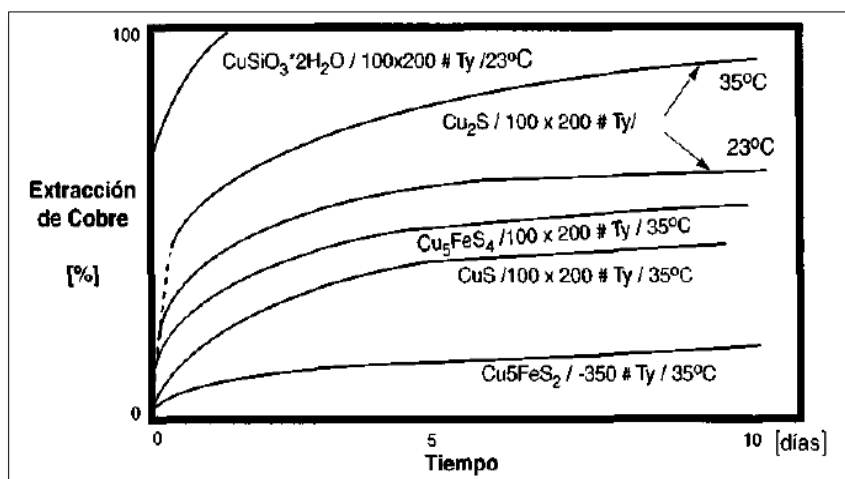
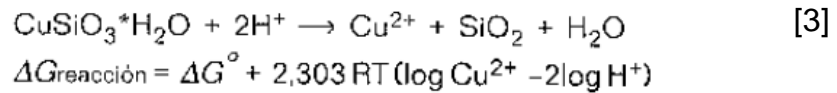


Figura 4 Extracciones de cobre experimentales en función del tiempo, para distintas especies mineralógicas de concentrados de cobre, en condiciones similares

Fuente: Shandor I.F. Branitic_Stella B.G. Solari_Eduardo W.U. Araya

Importancia de la ganga

La ganga que envuelve (o acompaña) a los minerales de cobre puede evitar que éstos se lixivien; consumir más reactivo o disminuir la velocidad de la lixiviación. También existe el caso en que la ganga está muy alterada y extremadamente descompuesta, presentando gran cantidad de arcillas, entre las cuales existen algunas que actúan con propiedades de intercambio iónico, reatrapando el cobre recién disuelto.

Este fenómeno se conoce con el término en inglés “preg-robbing”. Por otra parte, hay elementos que causan problemas en el proceso de recuperación del cobre (Domic, E. M., 2001).

Para evitar la lixiviación de los minerales de cobre es suficiente que existan minerales de ganga con una mayor cinética de lixiviación y/o cantidad.

En general, los minerales de la ganga de los yacimientos porfíricos de cobre están en más de un 95 % constituidos por especies silicatadas. Además, la sílice, en cualquiera de sus formas, constituye parte esencial de la corteza terrestre en más de un 98 % de su composición sólida. Consecuentemente, su comportamiento en soluciones ácidas será determinante en los resultados del proceso de lixiviación que se intenta

emprender. Las principales especies minerales de silicatos presentes en la ganga (de estos yacimientos) se presentan en la Tabla 3 (Domic, E. M., 2001).

Tabla 3

Principales minerales de silicatos, presentes en la ganga de los yacimientos de cobre porfídico, incluyendo su composición química más probable.

Espece mineralógica	Composición mas común para esta especie de silicato
Cuarzo	SiO_2
Ortoclasa	KAlSi_3O_8
Plagioclasa sodica	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ albita
Plagioclasa potasica	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ anortita
Biotita	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Clorita	$\text{Mg}_5(\text{AlFe})(\text{AlSi}_4)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Sericita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})$
Montmorillonita	$(\text{Mg. Ca. Fe})(\text{Al. Mg. Fe})_4(\text{SiAl})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4n\text{H}_2\text{O}$
Vermiculita	$(\text{Mg. Ca})(\text{Al. Mg. Fe})_6(\text{AlSi})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_48\text{H}_2\text{O}$
Caolinita	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Pirofilita	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Hornblenda	$\text{Ca}(\text{Mg. Fe})_3\text{Si}_4\text{O}_{12}$
Actinilita	$\text{Ca}(\text{Mg. Fe})_3(\text{SiO}_3)$

Fuente: Elaboración propia

Otras especies minerales que también a menudo forman parte de la ganga en estos yacimientos, son:

- Los **carbonatos**, como, por ejemplo, la calcita (CaCO_3);
- Los **sulfatos**, típicamente representados por el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita (CaSO_4); y

- Los **óxidos e hidróxidos de fierro**, entre los cuales destacan: la magnetita (Fe_3O_4), la hematita (Fe_2O_3), la especularita (Fe_2O_3), la limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$) y la goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$)

Influencia en el consumo de ácido

El consumo de reactivo lixivante está en función de la cantidad de especies que reaccionan con él y de la velocidad con la que lo hacen. Si un mineral de ganga reacciona más rápido que los minerales de cobre y, además se encuentra en mayor cantidad, entonces éste limita la lixiviación del cobre.

Como ya se mencionó las especies silicatadas son las más abundantes; por lo tanto, es práctico saber como regla general que (Domic, E. M., 2001):

- Las menas de cobre hospedadas en roca basáltica y diabasa presentan un consumo de ácido más bien alto;
- Las menas compuestas de monzonita, andesita y granito consumen cantidades moderadas de ácido;
- Las menas hospedadas en una matriz de alteración cuarzo-sericita, consumen pequeñas proporciones de ácido; y

- Las menas ubicadas en arenisca de cuarzo casi no consumen ácido alguno.

En la Figura 5 se muestran los valores de consumo de ácido propios de la ganga, para tres tipos de roca habituales, en yacimientos de cobre.

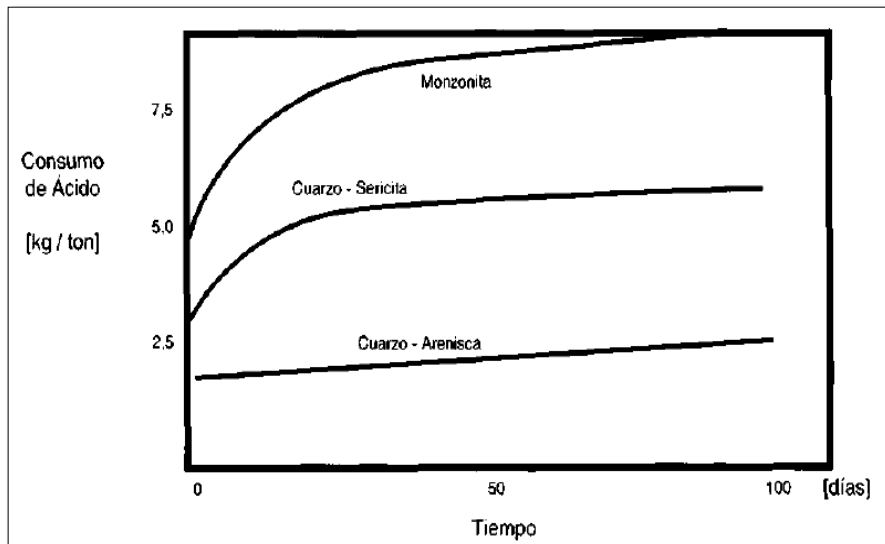


Figura 5 Datos experimentales de consumos de ácido propios de la ganga para tres tipos de roca habituales en yacimientos de cobre.

Fuente: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia>

Influencia en la cinética de disolución

Los silicatos de la ganga pueden clasificarse en cinco categorías, en términos de la velocidad y extensión con que reaccionan con el ácido. En un extremo está la ganga de basalto-diabasa que reacciona muy rápido.

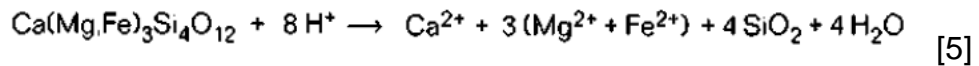
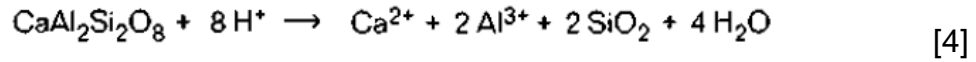
En el otro extremo se tiene a la arenisca cuarcífera que es casi inerte. De acuerdo a esto, a medida que la ganga se torna más alterada también aumenta su reactividad al ácido y, aumenta como se aprecia en el cuadro de reactividades relativas a la alteración de la Figura 6.

Así también, junto con el incremento de su capacidad consumidora de ácido y la posibilidad de neutralizar soluciones de lixiviación cada vez más ácidas, también aumentan sus energías de formación, lo que es concordante con estructuras moleculares más complejas y alteradas. De esta manera se tienen:

Ganga altamente reactiva: esta ganga normalmente contiene proporciones significativas de especies minerales carbonatadas, incluyendo calcita, dolomita y siderita. Estas especies reaccionan con el ácido con rapidez, liberando un catión, agua y gas CO_2 .

Ganga medianamente reactiva: esta categoría significa la probable existencia de cantidades significativas de hornblenda, piroxeno y plagioclasa de calcio parte superior de la Figura 6.

Estas especies se disuelven relativamente rápido comparadas con otros silicatos, de acuerdo a las reacciones de disociación que siguen:



Así las soluciones van perdiendo el ácido contenido y su oxidante (el ion férrico).

Es decir, aumenta su pH y decae su Eh. Con esto, gradualmente disminuye su capacidad de lixiviar minerales de cobre y la cinética de disolución de éstos decae (Domic, E. M., 2001).

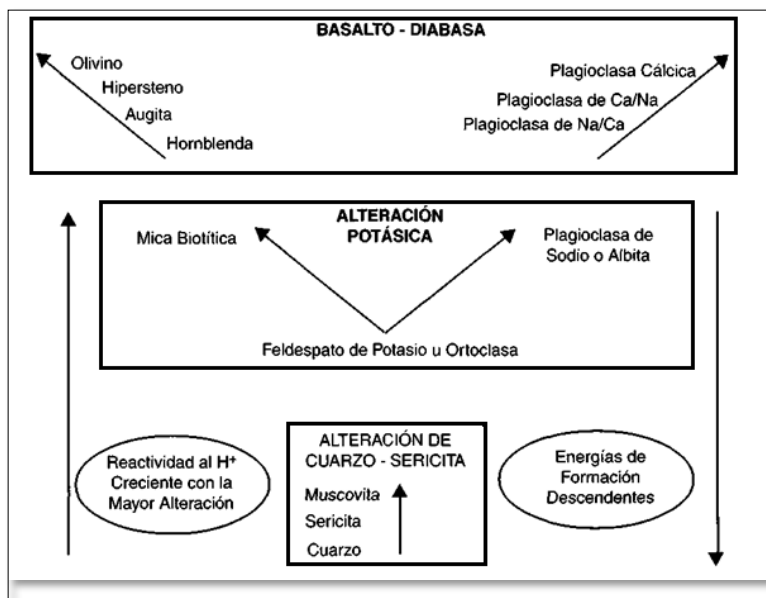
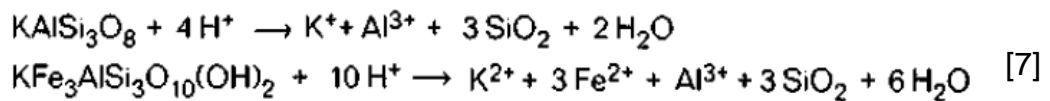
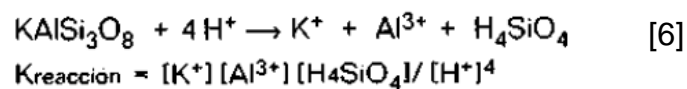


Figura 6 Reactividad al ácido creciente en función de la mayor alteración de los silicatos de la roca y energías de formación inversamente proporcionales a esa mayor alteración. Fuente: Elaboración propia

Ganga moderadamente reactiva: esta categoría está compuesta principalmente por ortoclasas, biotita, albita y cuarzo, minerales que también se disuelven de acuerdo a reacciones de hidrólisis:



Estas especies son más lentas para disolverse que la hornablenda y la plagioclasa de calcio, así las soluciones van perdiendo su ácido y su oxidante (férrico) en forma más lenta y el cobre puede disolverse mejor y más uniformemente para una misma altura del lecho de mineral, que en el caso de las gangas más reactivas vistas antes.

Ganga levemente reactiva: las rocas que se han visto alteradas a cuarzo, a sericita o a caolinita están compuestas de minerales que están en equilibrio (o casi en equilibrio) con las soluciones de lixiviación. El cuarzo no se disuelve en ellas y la sericita y caolinita lo hacen muy lentamente, por lo que son ideales para mantener el Eh y el pH de una solución lixivante.

Ganga no reactiva: las areniscas cuarcíferas son casi inertes a las soluciones de lixiviación y la cinética de disolución del cobre tiende a ser perfecta. Una comparación entre los efectos de estas últimas calidades de reactividad en la ganga se puede observar en la Figura 7, que muestra los resultados experimentales de recuperación de cobre y consumo de ácido, determinados en la lixiviación de tres minerales de crisocola, hospedados en gangas de las categorías menos reactivas.

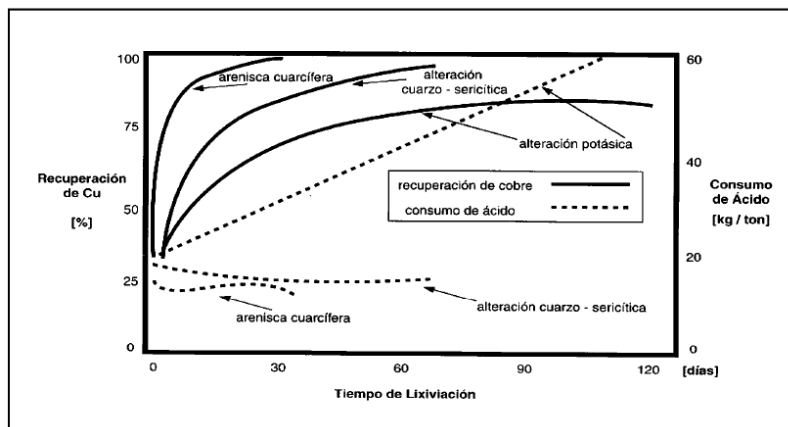


Figura 7 Resultados experimentales de recuperación de Cu y consumo de ácido en 3 minerales de crisocola hospedados en gangas.

Fuente: <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones>

2.2.7 Importancia de la termodinámica y cinética en el proceso de lixiviación de minerales de cobre.

Dentro de todo negocio de la ingeniería, se observa el desarrollo del trabajo en dos pilares importantes: La Ingeniería de operaciones y la

ingeniería de detalle. Es importante la ingeniería de detalle en la lixiviación de minerales, porque permite conocer los fenómenos involucrados en el tratamiento para diseñar (rediseño), prevenir o predecir resultados a corto, mediano, largo plazo y todo esto en base al conocimiento de la termodinámica y cinética.

La ingeniería de operaciones es importante porque conduce a solucionar problemas para asegurar y mantener la continuidad de la operación en planta.

2.2.7.1 Aspecto termodinámico

Al momento de lixiviar los minerales con un agente oxidante (ejm. ácido sulfúrico diluido) provoca una serie de reacciones químicas y electroquímicas con los diferentes elementos (especies químicas) contenidos en el mineral. Es en tal momento donde la termodinámica ayuda a saber qué reacciones no ocurrirán y qué reacciones tienen alta probabilidad de que ocurran. Como complemento es necesario conocer e interpretar los diagramas de Marcel Pourbaix, que son gráficas de tratamientos termodinámicos de un sistema (por ejemplo, interesa el sistema agua, cobre, azufre) en estos se observa campos de estabilidad de iones, elementos y compuestos en función de dos variables: pH y

potencial de oxidación y reducción. En el proceso de lixiviación y electro-depositación del cobre, los diagramas de pourbaix permiten una visión clara de lo que está ocurriendo en el proceso desde el punto de vista de los elementos, especies químicas presentes.

2.2.7.2 Interpretación de un diagrama de pourbaix del sistema H₂O-cobre

Dentro de las principales zonas marcadas en el diagrama de pourbaix mostrado en la Figura 8, los diferentes estados químicos del cobre son mostrados como estables. Esto simplemente significa que la forma dada del cobre puede existir en las condiciones de pH* y Eh** mostrados en los ejes del diagrama. Por ejemplo, en un pH de 8,0 el cobre puede existir ya sea como CuO o como Cu(OH)₂ para cualquier Eh entre 0,2 voltios y 0,75 voltios. En un Eh de -0,2 voltios el CuFeS₂ puede existir entre valores de pH de 0,0 y aproximadamente 8,25.

El Eh es una medida (en voltios) de la fuerza de oxidación de una reacción particular. El pH es una medida de acidez y esta luego totalmente explicada en un posterior principio de operación, el cobre existe como CuO y Cu(OH)₂. Para obtener el cobre en un estado en donde se disuelva en la solución de lixiviación, es necesario formar Cu⁺⁺.

Del diagrama, el CuO y el Cu(OH)_2 se convierten en Cu^{++} si el pH es disminuido por debajo de 5,4 (encima de un eh de 0,4). En efecto, esto es exactamente lo que ocurre cuando la adición de solución de lixiviación disminuye en pH.

Cuanto menor sea el valor de pH de 5,4 el CuO y el Cu(OH)_2 llegan a ser menos estables y mayor es el porcentaje de CuO y Cu(OH)_2 que se convierte a Cu^{++} . El porcentaje de conversión es el porcentaje de cobre recuperado. El CuCO_3 sigue el mismo proceso general, no mostrado en este diagrama**.

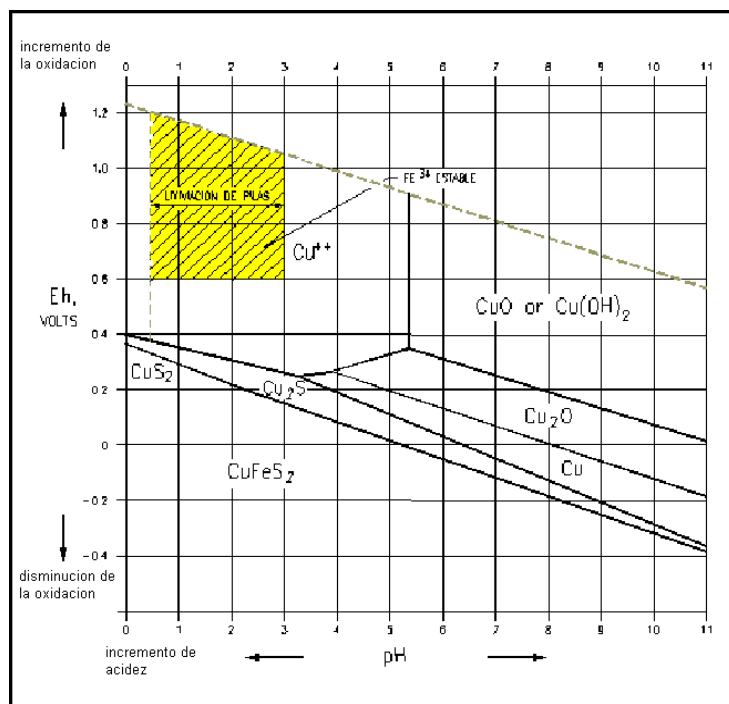


Figura 8 Condiciones necesarias para la lixiviación de minerales de Cu.

Fuente. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/>

2.3. Definición de términos

Procesos hidrometalúrgicos

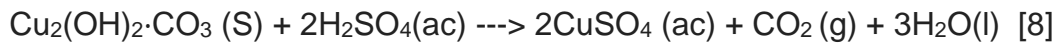
Los procesos hidrometalúrgicos para la disolución (lixiviación) de cobre se utilizan sobre todo en minerales que contienen óxidos de cobre, de baja ley y/o complejos, y en menor escala o para tratar concentrados de sulfuros.

Los minerales de óxidos de cobre pueden lixiviarse por diversos métodos (*in situ* en las minas, en pilas, 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):

Lixiviación de la malaquita:



Lixiviación de la crisocola:



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 volumetría o bien por espectroscopia de adsorción atómica.

Sin embargo, en la naturaleza también existen otros minerales de cobre que se encuentran en la forma de óxidos, entre los más abundantes se pueden mencionar:

Malaquita	:	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
Atacamita	:	$\text{CuCl}(\text{OH}) \text{Cu}(\text{OH})_2$
Crisocola	:	$\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Azurita	:	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
Cuprita	:	Cu_2O

Lixiviación ácida

Es el proceso más utilizado para la recuperación de cobre desde minerales oxidados. La rentabilidad de esta operación va a estar determinada por el consumo de ácido sulfúrico y el grado de extracción de cobre. Se sabe que un aumento en la concentración de ácido en las soluciones lixiviantes impulsa una mayor recuperación de cobre, pero también se produce un elevado consumo de ácido por especies reactivas de la ganga, lo que repercute negativamente en la economía del proceso. De estudios anteriores se sabe que con una adecuada selección del nivel de concentración de ácido es posible optimizar el consumo de ácido en el proceso.

Importancia del estudio de la cinética

Tal como se analizó en los procesos propios de la hidrometalurgia resulta importante conocer la velocidad o tasa en que se produce una determinada transformación química o física, sea esta una reacción propiamente tal, o un proceso de mas de una etapa, en serie, en el que se incluyen fenómenos de transferencia de masa. Caracterizados por la difusión tanto de reactantes como de productos.

La cinética es la rama de la fisico-química que proporciona el soporte conceptual necesario para enfocar la solución de este problema.

Sus resultados son determinantes al momento de predecir cuánto tiempo va a demorar una determinada transformación química para así extrapolar estos valores a las condiciones de operación industriales.

Así, para casos de una cinética lenta se requieran equipos de mayor tamaño, con las consiguientes mayores inversiones. Por el contrario, en casos de cinética rápida los equipos requeridos serán de menor tamaño y las inversiones disminuirán en concordancia.

Una característica de la transformación química, que tiene una importancia considerable a nivel industrial, es la localización de la reacción. Las reacciones que se producen en el seno de una fase gaseosa, líquida o sólida se denominan homogéneas.

En el caso de las reacciones homogéneas en la fase líquida, estas pueden producirse tanto entre compuestos normales líquidos y miscibles, como entre sustancias disueltas.

Por otro lado, las reacciones que se desarrollan en la interfaz de dos medios diferentes, se llaman heterogéneas. Estas son las reacciones de mayor relevancia en hidrometalurgia y comprenden tanto reacciones de un líquido sobre un sólido (por ejemplo la acción de una solución ácida

sobre un mineral, o la lixiviación) de un gas sobre un sólido (por ejemplo reacciones de extracción por solventes).

En una reacción heterogénea es importante conocer los mecanismos controlantes de la cinética de cierto proceso más o menos complejo. Es decir, conocer cuáles son los pasos mas lentos que pasan a determinar la velocidad de ocurrencia del conjunto del proceso, así se puede accionar directamente sobre ellos y de esta manera ayudar a acelerar el proceso completo.

Lixiviación

En general, la lixiviación es la disolución de materiales solubles mediante un disolvente líquido a partir de la mezcla de ellos con un sólido insoluble. Es una operación de separación industrial basada en una transferencia de masa. El disolvente puede ser agua, una solución química o un disolvente orgánico. En el caso de la extracción de metales a partir de sus minerales, es una lixiviación metalúrgica, que es la disolución selectiva de metales solubles mediante un solvente líquido para separarlo de las impurezas del mineral. La lixiviación se puede hacer en medio oxidante, neutro o reductor. Para la disolución de metales se tienen los siguientes sistemas:

- Lixiviación ácida - Comprende la lixiviación con ácido sulfúrico concentrado, lixiviación con ácido sulfúrico diluido y oxígeno, lixiviación con ácido clorhídrico, lixiviación con ácido nítrico, lixiviación férrica.
- Lixiviación alcalina - Comprende la lixiviación amoniacal, lixiviación con hidróxido de sodio, lixiviación con cianuro de sodio, lixiviación con sulfuro de sodio, etc.
- Lixiviación neutra - con tiosulfato de sodio y lixiviación con cloro gaseoso.
- Lixiviación por electrooxidación.
- Lixiviación bacteriana o Lixiviación férrica combinada con lixiviación bacteriana.

Hidrometalúrgia

La 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. La recuperación se efectúa por reacciones iónicas de disolución efectuadas a condiciones de temperatura ambiente por intermedio de 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} , Fe^{+3} , H^+ , Na^+ , etc. y con carga negativa o aniones SO_4^{-2} , NO_3^- , CO_3^{-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.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

Este trabajo de investigación es aplicada, de carácter experimental, representa el nivel de pruebas que se cuantifica con los resultados obtenidos. Los resultados de esta tesis serán aplicados en planta. El diseño de la investigación es experimental, se consideraron variables significativas que influirán en los resultados.

3.1.2 Diseño de la investigación

En el desarrollo del presente estudio de investigación se consideró un conjunto de pruebas experimentales de lixiviación en agitación, las muestras están relacionadas por mallas para el proceso.

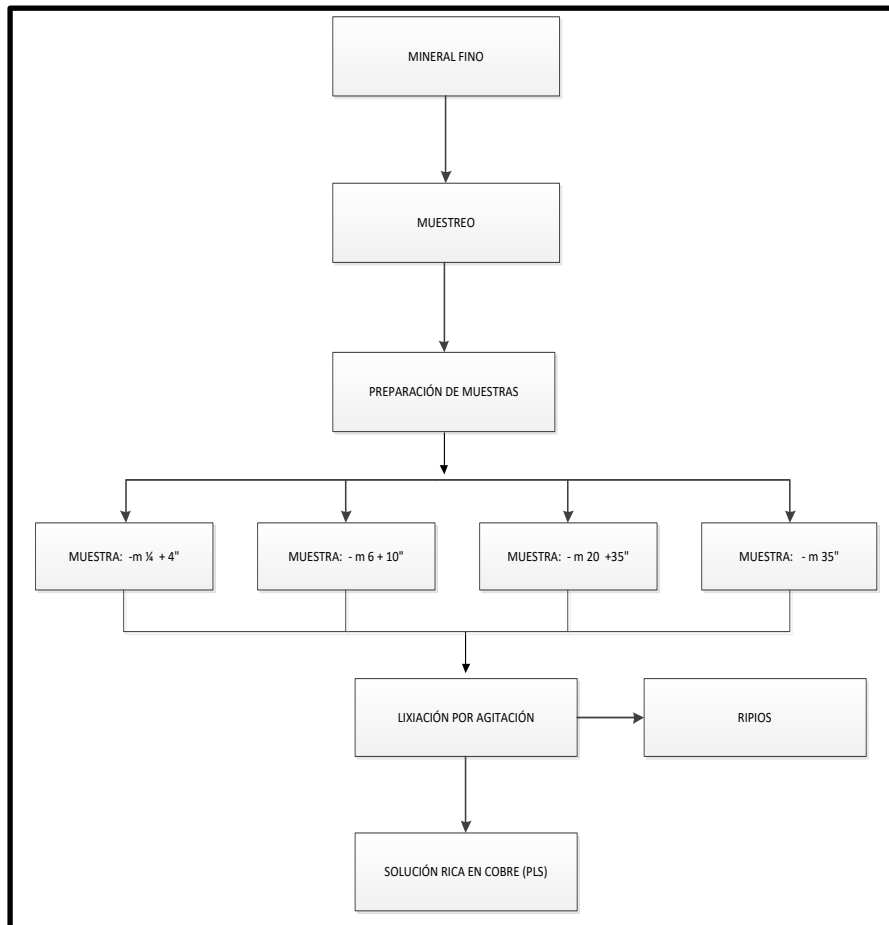


Figura 9 Diagrama de flujo lineal para el trabajo de investigación
Fuente: Elaboración propia

3.2. Población y muestra

Los minerales finos, que fueron separados en la etapa chancado, son depositados en las canchas de relaves, de donde se muestreó, se homogenizó, y se tomó la muestra adecuada para ser trasladado al laboratorio de metalurgia de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica.

3.3. Operacionalización de variables

Variable independiente: Lixiviación de minerales finos.

Variable dependiente: Recuperación de cobre

3.4. Técnicas de recolección de datos y análisis de datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

La muestra se toma aleatoriamente dentro de una escombrera de mas de 50 000 toneladas de mineral fino.

Se logra tomar muestras de aproximadamente 350 kilos de diferentes puntos de las escombreras, luego fueron homogenizados y cuarteados; de esta muestra indicada, llegó al laboratorio de metalurgia 45 kilos de mineral fino.

En el laboratorio mediante el cuarteo se llega obtener muestras de $\frac{1}{2}$ kilogramo para las pruebas programadas. Estas muestras fueron embolsadas, codificadas para ser enviados para análisis químico y proceso.

3.4.2 Técnicas de análisis de datos

El análisis de datos se realiza con el software excel, para la construcción de las tablas, análisis de gráficos y ajuste de curvas.

3.5. Procesamiento experimental

El presente trabajo de investigación se ha realizado con la finalidad de evaluar los finos de mineral que son separados en etapa de chancado debido a la cantidad excesiva de finos que pueden desestabilizar las pilas de lixiviación, estos finos son depositados en botaderos de la planta, que aun contiene cobre y puede aportar incrementar el balance de cobre.

Así mismo, se considera el consumo de reactivo para la disolución de cobre de mineral fino.

Se han considerado como base los diferentes análisis físico-químicos tomados en los laboratorios realizando un análisis evaluativo del proceso.

Se presenta a continuación las pruebas realizadas en el presente trabajo de investigación a nivel de laboratorio y los resultados obtenidos para este mineral.

3.5. 1. Caracterización de la muestra

Análisis granulométrico del mineral

El mineral fino “oxidado de cobre” trasladado de planta de lixiviación de Corocoro presenta la siguiente distribución granulométrica (ver Tabla 4).

Tabla 4

Distribución granulométrica del mineral fino

Malla	Abertura (μm)	Peso (g)	Peso (%)	Retenido (%)	Pasante (%)
1/4	6250	116	13,66	13,66	86,34
4	4750	67	7,89	21,55	78,45
6	3327	62	7,30	28,86	71,14
10	1651	79	9,31	38,16	61,84
20	850	64	7,54	45,70	54,30
35	500	58	6,83	52,53	47,47
-35	--	403	47,47	100,00	0,00
		849	100,00		

Fuente: Elaboración propia

Muestra del mineral

De los 2 kilos de mineral de granulometría fina soluble (crisocola, malaquita, etc.), procedente de la planta de lixiviación de Corocoro se tomaron 849 gramos, los cuales se clasificaron según la siguiente Tabla 5.

Tabla 5

Distribución granulométrica en intervalos de malla

N° pruebas	Abertura (malla)	Peso (g)	Peso (%)	Peso Retenido (%)
1	1/4 + 4	183	21,55	21,55
2	6 + 10	141	16,61	38,16
3	20 + 35	122	14,37	52,53
4	-35	403	47,47	100,00
		849	100,00	

Fuente: Elaboración propia

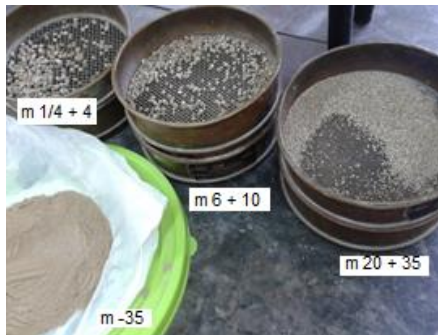


Figura 10 Mineral clasificado en diferentes mallas (ASTM)

Fuente: Elaboración propia

3.5. 2. Pruebas experimentales

3.5.2.3 Pruebas por agitación en vaso para determinar el consumo de ácido sulfúrico.

Se realizaron pruebas en vasos agitados para determinar el consumo de ácido para el mineral fino.

Tamizado. (permite obtener un material de - m 10 para ser pulverizado)

Secado.

- La muestra obtenida en el tamiz es secada en un horno de mufla depositando el mineral en una bandeja de metal.
- Setear la temperatura del horno a 473 K (200 °C), colocar la bandeja con el mineral y dejarlo secar por un tiempo de 30 minutos.

Pulverizado.

- Una vez que la muestra esté seca, se pulveriza.
- Limpiar antes y después de usar la bandeja del pulverizador.
- Colocar la muestra secada, dentro del pulverizador, un tiempo aproximado de 180 segundos.
- Sacar la tapa, descargar el mineral y colocar en una manta extendida en la mesa de trabajo.

Homogenizado y cuarteo.

Toda la muestra obtenida en el pulverizador deberá ser homogenizada y luego se procedió a cuartear la muestra.

Agitación en vaso de 1 litros.

- En el vaso a agregar el mineral seco, adicionando una solución al 50 g/L de ácido sulfúrico.
- Colocar el agitador dentro del vaso y encender el equipo, tomar la hora de inicio, cada prueba en un vaso agitado tendrá una duración de 2, 4, 8, 12 y 24 horas.

Las muestras experimentadas se realizaron por consumo, controles adicionales se hicieron posteriormente a la toma de muestra para el análisis químico.

3.5.2.4 Pruebas lixiviación por agitación del mineral

El mineral distribuido según las mallas en la Tabla 5 ($m\frac{1}{4} + 4$, $-m6 + 10$, $-m20 + 35$, $-m35$), es pesado para cada intervalo de mallas y lixiviado con una solución ácida en un periodo tiempo adecuado. Luego se realizó la separación líquido/sólido, el PLS y los ripios son analizados por cobre.

Tamizado. (permite obtener un material de $- m 10$ para ser pulverizado)

Secado

- La muestra obtenida en el tamiz es secada en un horno de mufla depositando el mineral en una bandeja de metal.

- Setear la temperatura del horno a 473 K (200 °C), colocar la bandeja con el mineral y dejarlo secar por un tiempo de 30 minutos.

Homogenizado y cuarteo

- Toda la muestra obtenida deberá ser homogenizada totalmente.
- Seguidamente se procederá a cuartear la muestra.

Agitación en vasos de 2 litros

- En el vaso agregar el mineral seco, adicionando una solución al 50 g/L de ácido sulfúrico.
- Colocar el agitador dentro del vaso y encender el equipo, tomar la hora de inicio, cada prueba en un vaso agitado tendrá una duración de 24 horas.
- Las muestras para ensayo se realizó por cobre en los ripios, en PLS, acido libre.
- Los controles de pH y mv y CN se hicieron posteriormente a la toma de muestra para análisis químico.

Descripción

El mineral en evaluación será muestreado y preparado (homogeneizado y cuarteado), obteniéndose una muestra representativa

malla -200 para realizar análisis químicos que permitan conocer sus valores metálicos iniciales, e inferir la composición mineralógica del mineral y para las pruebas de lixiviación a diferentes granulometrías: m $\frac{1}{4}$ + 4, -m 6 + 10, -m 20 + 35, -m 35.

Pesar la cantidad necesaria de mineral referente a cada malla indicada, este peso está en relación al porcentaje de sólidos contenidos en la pulpa (esta variable es variable, depende del plan de pruebas a realizar).

Tarar el vaso, el baffle y rotular cada vaso a utilizar con una breve descripción de cada prueba y anotar en el formato correspondiente los pesos.

De igual forma pesar la cantidad necesaria de solución lixivante, la cual se prepara previamente con las concentraciones de los reactivos propios de cada evaluación.

Montar el sistema de agitación (agitador, impeller, vástago) en conjunto con el vaso de precipitados de 2 lt, con su baffles, colocar el mineral con la solución lixivante, anotar la hora y proceder a arrancar los agitadores, se regula la agitación en 400 RPM.

Se mide pH - Eh inicial y final, ambos en agitación, teniendo cuidado de no golpear los electrodos.

Al término de las pruebas, se apaga el agitador, inmediatamente se pesan los vasos y se deja sedimentar hasta que se clarifique la solución.

Filtrar en un matraz kitasato con aire de vacío la solución, emplear papel watman 40, o centrifugar la solución obteniendo una muestra para análisis.

Analizar los ensayos respectivos a la solución de acuerdo a los requerimientos de la prueba a realizar.

De ser necesario, el sólido resultante lavarlo con agua. Secar el residuo sólido en la mufla a 353 K (80 °C) por 4 horas (depende de su humedad). Pesar el sólido total, cuartear y separar 3 muestras, una de testigo y 2 para rotular y enviarlas al laboratorio. Los análisis a realizar serán los mismos que para el caso del mineral de cabeza.

Con los valores de análisis químicos obtenidos y las leyes de mineral, se procede a realizar los cálculos respectivos a fin de conocer las recuperaciones finales.

Parámetros de las pruebas de lixiviación en agitación:

A. Condiciones de operación : m ¼ + 4

Ley mineral	:	1,1 %
Peso del mineral por prueba	:	250 g
Cobre fino	:	2,75 g
Granulometría	:	m ¼ + 4
Concentración de ácido por prueba:		50 g/L
Dilución	:	1,5
Tiempo	:	1, 3, 6, 12 hora

B. Condiciones de operación : -m 6 + 10

Ley mineral	:	0,85 %
Peso del mineral por prueba	:	250 g
Cobre fino	:	2,13 g
Granulometría	:	m ¼ + 4
Concentración de ácido por prueba:		50 g/L
Dilución	:	1,5
Tiempo	:	1, 3, 6, 12 hora

C. Condiciones de operación : -m 20 + 35

Ley mineral	:	0,94 %
Peso del mineral por prueba	:	250 g
Cobre fino	:	2,35 g
Granulometría	:	m $\frac{1}{4}$ + 4
Concentración de ácido por rueba	:	50 g/L
Dilución	:	1,5
Tiempo	:	1, 3, 6, 12 hora

D. Condiciones de operación : -m 35

Ley mineral	:	0,82 %
Peso del mineral por prueba	:	250 g
Cobre fino	:	2,05 g
Granulometría	:	$\frac{1}{4}$ + 4
Concentración de ácido por rueba	:	50 g/L
Dilución	:	1,5
Tiempo	:	1, 3, 6, 12 hora

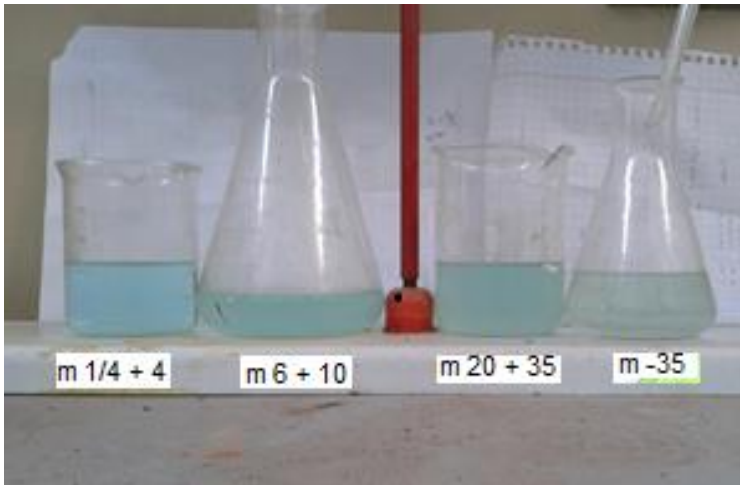


Figura 11 Lixiviación por agitación de mineral clasificado en diferentes mallas.
Fuente: Elaboración propia



Figura 12 Ripios de Lixiviación por agitación de Mineral clasificado en diferentes mallas.
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2 RESULTADOS

4.1.1 Distribución granulométrica

Distribución granulométrica del mineral fino

Todos los experimentos realizados se dividieron en dos etapas: las pruebas de lixiviación por intervalo de mallas como se observa en la Tabla 7, y las pruebas consideradas al mineral tal como se observa en la Tabla 6.

El material con el tamaño de partícula - 10 mallas Tyler, se utilizó para la lixiviación estática (sin agitación).

Se puede apreciar en la figura el 47,47 % pasante a la malla 35, presenta la mayor cantidad de fino y menor cantidad de cobre.

Tabla 6

Distribución granulométrica del mineral fino

Abertura (malla)	Abertura (um)	peso (g)	peso (%)	peso retenido (%)	pasante (%)
1/4	6250	116	13,66	13,66	86,34
4	4750	67	7,89	21,55	78,45
6	3327	62	7,30	28,86	71,14
10	1651	79	9,31	38,16	61,84
20	850	64	7,54	45,7	54,30
35	500	58	6,83	52,53	47,47
-35	--	403	47,47	100	0
		849	100		

Fuente: Elaboración propia

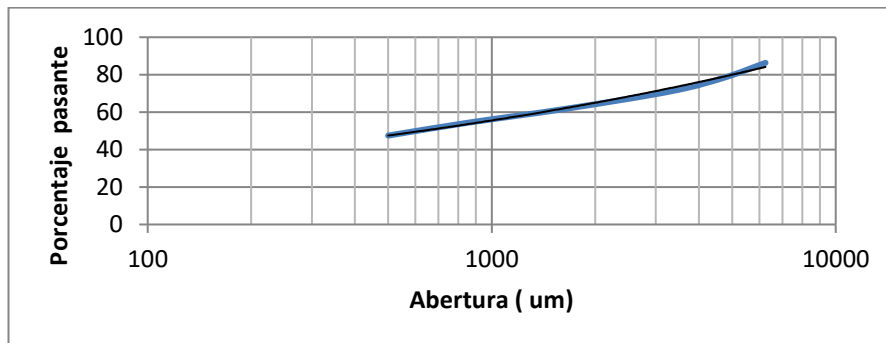


Figura 13 Distribución granulométrica del mineral fino abertura vs. porcentaje pasante.

Fuente: Elaboración propia

La muestra N° 1 presenta mejor alternativa seguida de la muestra 2 y 3.

La muestra 4 se observa baja concentración de cobre en solución, representa el mineral muy fino equivalente al 47,47 % pasante a la malla

35.

Tabla 7

Distribución granulométrica del mineral fino por mallas

N° pruebas	apertura (malla)	peso (g)	peso (%)	retenido (%)	pasante %
1	1/4 + 4	183	21,55	21,55	78,45
2	6 + 10	141	16,61	38,16	61,84
3	20 + 35	122	14,37	52,53	47,47
4	-35	403	47,47	100	0
		849	100		

Fuente: Elaboración propia

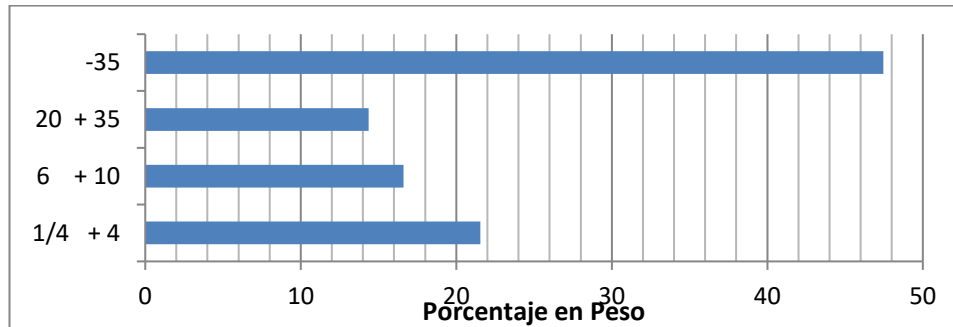


Figura 14 Distribución granulométrica del mineral fino por mallas

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Resultados de las pruebas de lixiviación por agitación

Los resultados obtenidos de las muestras descritas en las Tablas 8, 9, 10 y 11, donde la lixiviación por agitación realizada a las muestras que corresponde a intervalos de mallas 1/4 + 4, -m 6 + 10, -m 20 + 35 y -m 35, que fueron utilizadas para la determinación de extracción de cobre, se consideraron las mismas condiciones de operación.

Tabla 8*Recuperación de cobre de mineral fino mallas 1/4 + 4*

tiempo (horas)	abertura (malla)	volumen (L)	cobre (g/L)	cobre (g)	recuperación parcial	cobre % acumulado
1	1/4 + 4	0,375	1,27	0,48	17,32	17,32
3		0,375	1,74	0,65	23,73	41,05
6		0,375	2,1	0,79	28,64	52,36
12		0,375	2,2	0,83	30,00	58,64
Total				2,74		

Fuente: Elaboración propia**Tabla 9***Recuperación de cobre de mineral fino mallas -m 6 + 10*

tiempo (horas)	abertura (malla)	volumen (L)	cobre (g/L)	cobre (g)	recuperación parcial	cobre % acumulado
1	-m6+10	0,375	0,9	0,34	12,27	12,27
3		0,375	1,2	0,45	16,36	28,64
6		0,375	1,71	0,64	23,32	39,68
12		0,375	1,73	0,65	23,59	46,91
total				2,08		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10*Recuperación de cobre de mineral fino mallas -m 20 + 35*

tiempo horas	abertura (malla)	volumen (L)	Cu (g/L)	Cu (g)	recuperación cobre % parcial	acumulado
1	-m20+35	0,375	1,11	0,42	15,14	15,14
3		0,375	1,33	0,50	18,14	33,27
6		0,375	1,86	0,70	25,36	43,50
12		0,375	1,89	0,71	25,77	51,14
total				2,32		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11*Recuperación de cobre de mineral fino mallas -m 35*

Tiempo (horas)	abertura (malla)	volumen (L)	Cobre (g/L)	cobre (g)	recuperación cobre % parcial	acumulado
1	-m 35	0,375	0,82	0,31	11,18	11,18
3		0,375	0,95	0,36	12,95	24,14
6		0,375	1,65	0,62	22,50	35,45
12		0,375	1,69	0,63	23,05	45,55
total				1,92		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Resumen de la recuperación de cobre de mineral fino mallas: 1/4 + 4, -m 6 + 10, -m 20 + 35 y -m 35

recuperación cobre %				
tiempo (horas)	acumulado 1/4 + 4	acumulado -m 6 + 10	acumulado -m 20 + 35	acumulado -m 35
1	17,32	12,27	15,14	11,18
3	41,05	28,64	33,27	24,14
6	52,36	39,68	43,50	35,45
12	58,64	46,91	51,14	45,55

Fuente: Elaboración propia

La Figura 15 muestra los resultados obtenidos para el porcentaje de extracción de cobre en función del tiempo para diferentes muestras: mallas 1/4 + 4, -m 6 + 10, -m 20 + 35 y -m 35, siguiendo los pasos indicados en la sección anterior correspondiente a la metodología utilizada para la determinación de parámetros.

En el caso de la lixiviación agitación (Figura 15) la recuperación de los metales cobre tiene un comportamiento diferente, al variar la granulometría del mineral fino.

A las cinco horas de agitación se observa en la Figura 15, un incremento del 32 al 53 % de recuperación de cobre y en las siguientes

10 horas entre 40 a 58 %, según granulometría del mineral fino 1/4 + 4, -m 6 + 10, -m 20 + 35.

En la lixiviación con agitación, las cantidades de cobre que se disuelven alcanzan valores de 2,2 g/L.

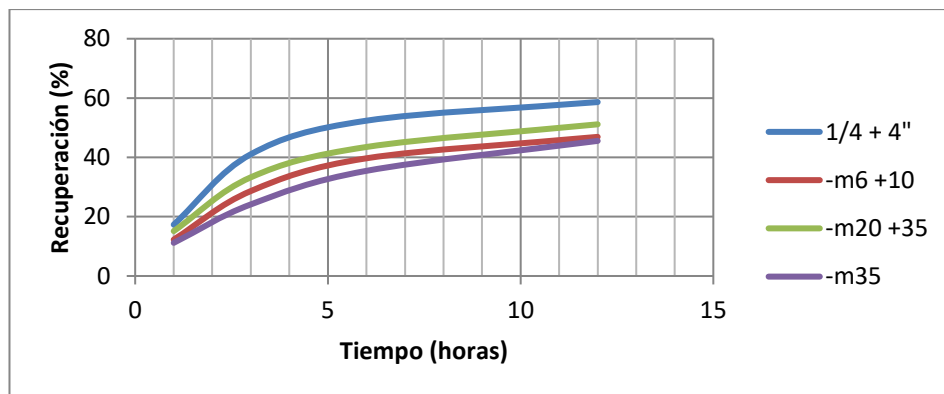


Figura 15 Recuperación del cobre de mineral fino a diferentes mallas

Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Resultados de las pruebas de lixiviación en botella malla -m 4

Tiempo agitación (h)	ley PLS (g/L) Cobre	contenido finos (g) Cobre	extracción (%) Cobre
0		0,00	0,0
2	1,11	8,33	17,0
4	1,45	10,88	22,2
8	1,9	14,25	29,1
12	2,0	16,50	33,7
TOTAL		49,95	

Fuente: Elaboración propia

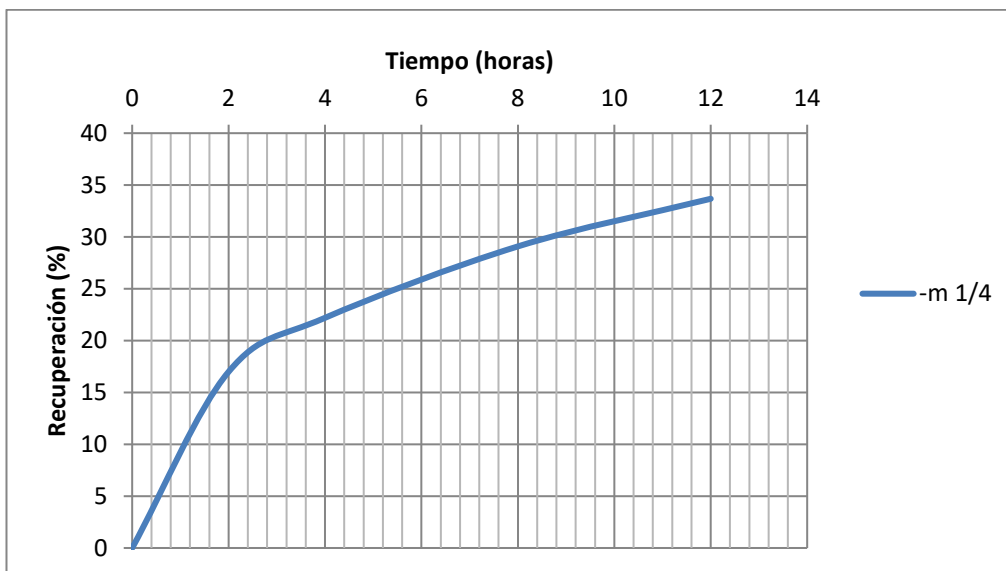


Figura 16 Recuperación del cobre de mineral fino malla -m 4

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la lixiviación en botella (Figura 16) la recuperación de los metales cobre tiene un comportamiento a analizar, la granulometría del mineral fino no se varió, obteniendo recuperación de cobre que sobrepasan el 33,7 % de extracción.

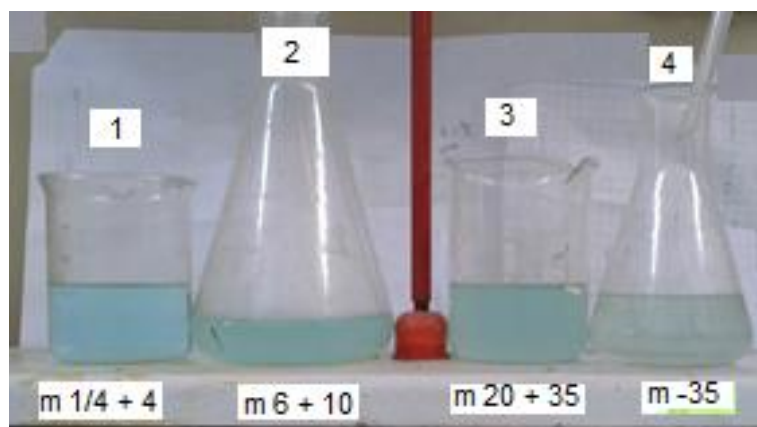


Figura 17 Recuperación del cobre a diferente malla

Fuente: Elaboración propia

4.2. DISCUSIÓN

El mineral fino clasificado por mallas 1/4 + 4, -m 6 + 10, -m 20 + 35, se logra obtener diferencias en la extracción del cobre logrando recuperaciones hasta 58 % en intervalo de mallas ¼ +4 58, con disoluciones de cobre hasta 2,2 g/L.

En el caso de la lixiviación en botella (Figura 16) la extracción de cobre no supera el 33,7 % de extracción, este mineral fino es lixiviado tal como está en los botaderos.

CONCLUSIONES

El medio ácido formado es suficiente para disolver la crisocola, la maquita y otros óxidos minerales de cobre, y ligeramente al hierro.

Las mejores condiciones en la lixiviación con agitación en vaso se muestran en mallas 1/4 + 4: con las que se obtiene una recuperación de 58,64 % Cu (2,2 g/l).

Las mejores condiciones en la lixiviación con agitación en botella se muestran en la malla 100 % -m 4: con las que se obtiene una recuperación de 33,70 % Cu (2,0 g/l).

Los resultados obtenidos indican que es posible la recuperación del cobre de estos botadores que son cientos de toneladas existentes que han sido retirados de planta para disminuir el porcentaje de finos; que pueden aportar cobre a la planta de lixiviación de Corocoro.

RECOMENDACIONES

Es necesario hacer un estudio mineralógico para determinar las especies que existen en el mineral y un análisis de cationes y aniones, según se reporte en el análisis, para poder realizar la reconstrucción mineralógica con el fin de tener información para establecer ecuaciones estequiométricas del proceso de lixiviación.

Se debe considerar el método de lixiviación en bateas para el tratamiento de minerales finos, debido a las bajas leyes de estos botaderos que contienen estos minerales finos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Biswas K. A. Davenport G. W.(1993) “El Cobre Metalurgia extractiva”, Ed. Limusa.

Domic, E. M., (2001). “Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones,” Domic, Chile.

Edelstein, Daniel L., (2010), “Copper”, U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries.

Fathi Habashi (1993). Métallurgie extractive, Québec, Enr. Technology & Engineering

Habashi Fathi (1999), “Hydrometallurgy”, 2^a edición, Universidad de Laval, Quebec, Canadá.

Ortiz Martínez Arturo (2012), “Lixiviación Ácida de Minerales Oxidados de Cobre (Crisocola) con poca disolución de Fe al utilizar KHSO₄”, Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM

Oscar Benavente (2004). "Proceso Lixiviación"

Antofagasta, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

R. M. Nadkarni, M. E. Wadsworth (1968), "Kinetic Study of the Cementation of Copper with Iron", Advances in Extractive Metallurgy, The Institution of Mining and Metallurgy, 44 Portland Place, London.

Terkel Rosenqvist (2004). Principles of Extractive Metallurgy.

Van Arsdale, D. George (1965), "Hidrometalurgia de Metales Comunes", 1ª edición, México. Unión Tipográfica, Editorial Hispano Americana.