

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

LIXIVIACIÓN EN MEDIO DE CLORURO DE  
SODIO Y ÁCIDO SULFÚRICO PARA LA  
RECUPERACIÓN DE COBRE DESDE  
MINERALES REFRACTARIOS

TESIS

Presentada por:

Bach. Flavio Alfredo Chipana Ayhuasi

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2021

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**LIXIVIACIÓN EN MEDIO DE CLORURO DE  
SODIO Y ÁCIDO SULFÚRICO PARA LA  
RECUPERACIÓN DE COBRE DESDE  
MINERALES REFRACTARIOS**

**TESIS**

Tesis sustentada el 30 de diciembre de dos mil diecinueve, siendo el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE



.....  
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco

SECRETARIO



.....  
Ing. Daniel Jesus Zevallos Ramos

VOCAL



.....  
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

ASESOR



.....  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

## **DEDICATORIA**

A mis padres: Josefa Ayhuasi Pérez y Fernando Chipana Yupanqui, ejemplo y compañeros de toda mi vida, gracias por el apoyo incondicional brindado en todo momento, por guiar mis pasos desde el momento que nací

A mi hermana Carolina Claudia Chipana Ayhuasi, por brindarme su amistad, apoyo y comprensión

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a Dios, por darme la oportunidad de demostrar que todo es posible y por estar siempre a mi lado guiándome y protegiéndome

A mí querida Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, de manera muy especial a mi Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales y a mis docentes, ya que me formaron en la parte académica que me permitió ser profesional y poder alcanzar mis metas

Agradezco a mi asesor Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez, por la revisión minuciosa en el desarrollo de esta tesis, agradezco por brindarme su ayuda y consejo, para la realización de este estudio

Un agradecimiento infinito a mis padres y a mis tías Ana y Manuela Ayhuasi, por toda la paciencia y dedicación hacia mí y hermana, por el sacrificio realizado para tenerlo todo hoy

Con afecto y agradecimiento eterno a todos y cada uno de mis parientes y amigos, que de alguna forma apoyaron mis estudios y motivaron para seguir adelante

## CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
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	3
1.3. Justificación e importancia	4
1.4. Alcances y limitaciones	4
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo General	5
1.5.2. Objetivo Específicos	5

1.6. Hipótesis	5
1.7. Definición operacional de las variables	7
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	
2.1. Antecedentes del estudio	8
2.2. Bases teóricas	10
2.3. Definición de términos	44
<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO</b>	
3.1. Tipo y nivel de la investigación	45
3.2. Población, muestra y material de estudio	46
3.3. Operacionalización de variables	46
3.4. Instrumentos y técnicas para recolección de datos	46
3.5. Procesamiento y análisis de datos	57
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	
4.1. Resultados	58
4.2. Discusión de resultados	65
<b>CONCLUSIONES</b>	67
<b>RECOMENDACIONES</b>	68
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la lixiviación en pilas	17
Tabla 2. Componentes principales del agua de mar en mol/kg de solución	35
Tabla 3. Composición del agua de mar, asumiendo total ionización	36
Tabla 4. Principales minerales de cobre en la lixiviación de minerales de cobre	38
Tabla 5. Resultados de la densidad aparente y real	58
Tabla 6. Resultados del análisis granulométrico	59
Tabla 7. Ley del mineral de sulfuro de baja ley	60
Tabla 8. Humedad en mineral refractario de cobre	61
Tabla 9. Recuperación de la lixiviación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y NaCl	64
Tabla 10. Potencial de lixiviación para distintos tiempos	64
Tabla 11. Determinación de iones Fe en la lixiviación	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lixiviación en pilas en Ortiz Gold mine	16
Figura 2. Tamaño de partícula del mineral	18
Figura 3. Velocidades relativas de disolución de las principales especies de cobre en soluciones de ácido sulfúrico diluido	21
Figura 4. Esquema de una pila de lixiviación estática (multi-lift) y sus principales elementos	23
Figura 5. Esquema de una pila de lixiviación – base permeable	24
Figura 6. Construcción de la pila de lixiviación	25
Figura 7. Equipo mecanizado para la carga y descarga de mineral en pilas de lixiviación	26
Figura 8. Flujo de aire a través de la pila (modelado en 2D)	27
Figura 9. PLS Cerro Verde – Perú	28
Figura 10. Diagrama de especies del sistema Cu-Cl-H <sub>2</sub> O en función de [Cl]. Condiciones: Cu (I) = Cu (II) = 0,1M	34
Figura 11. Chancadora de quijada	48
Figura 12. Mineral chancado	49
Figura 13. Cuarteo del mineral	49
Figura 14. Pesado del mineral refractario	50

Figura 15. Identificación de las bolas para la molienda	51
Figura 16. Molinos utilizados para la liberación del mineral refractario	51
Figura 17. Limpieza de las bolas culminada la molienda	52
Figura 18. Mineral como resultado de la molienda	52
Figura 19. Pesado del mineral después de la molienda	53
Figura 20. Mallas Tyler usados para el análisis granulométrico	54
Figura 21. Máquina del Rotap para la realización del ANGRA	54
Figura 22. Agitación del mineral	55
Figura 23. Filtración del mineral lixiviado	56
Figura 24. Equipo de absorción atómica	56
Figura 25. Curva del análisis granulométrico del mineral refractario	59
Figura 26. Comparación de cinética de lixiviación entre entre los reactivos $H_2SO_4$ y $NaCl$	62
Figura 27. Variación de pH y potencial Redox en soluciones de alimentación y PLS	63

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata sobre la lixiviación de minerales refractarios de cobre utilizando dos reactivos y se determinó el desarrollo del estudio de la lixiviación en medio NaCl – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para incrementar la recuperación de cobre desde minerales refractarios (sulfuros primarios y secundarios), también se realizó pruebas de lixiviación en medio NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de minerales sulfurados primarios, de los cuales se obtuvieron una buena recuperación en un tiempo de 12 días de lixiviación.

Respecto a los parámetros adecuados para el proceso de lixiviación de minerales refractarios de cobre, teniendo el tiempo de molienda en 30 minutos, un pH de 1,5 de promedio y concentraciones de lixiviantes con una pureza del 95 %, se dio a conocer el alto poder lixivante del Cl<sup>-</sup> debido al potencial levemente oxidante inducido sobre el par redox Cu<sup>2+</sup>/Cu<sup>+</sup>, con las pruebas realizadas a nivel laboratorio se determinaron las recuperaciones de la lixiviación de minerales refractarios de cobre sulfuros primarios obteniéndose una recuperación de 35,3 % con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y 35,8 % con NaCl.

**Palabras clave:** Concentración, Ley del mineral, Lixiviación, Recuperación.

## ABSTRACT

This research work deals with the leaching of refractory copper minerals using two reagents and the development of the study of the leaching in NaCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> medium was determined to increase the recovery of copper from refractory minerals (primary and secondary sulfides). carried out leaching tests in NaCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> medium of primary sulphide minerals, of which a good recovery was obtained in a time of 12 days of leaching.

Regarding the appropriate parameters for the leaching process of refractory copper minerals, having the grinding time in 30 minutes, an average pH of 1,5 and concentrations of leachants with a purity of 95 %, the high Leaching power of Cl<sup>-</sup> due to the slightly oxidizing potential induced on the redox couple Cu<sup>2+</sup> / Cu<sup>+</sup>, with the tests carried out at the laboratory level, the recoveries from the leaching of primary sulfide copper refractory minerals were determined, obtaining a recovery of 35,3 % with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and 35,8 % with NaCl.

**Keywords:** Concentration, Mineral grade, Leaching, Recovery.

## INTRODUCCIÓN

La pequeña, mediana y gran minería siguen desarrollando proyectos de explotación de minerales refractarios de cobre, mediante procesos hidrometalúrgicos, el reactivo que más se usa en lixiviación, por ser económico, de fácil manejo y obtener recuperaciones de cobre aceptables; sin embargo, los reactivos generan grandes problemas ambientales y problemas de salud y hasta conflictos sociales. Por el lado ambiental, es un material peligroso debido a que pueden derrames durante el transporte y generar problemas de contaminación por la liberación del  $\text{SO}_3$ , existen otros reactivos como cloruro de sodio y ácido sulfúrico. El presente trabajo busca alternativas de lixiviación en la hidrometalurgia.

El desarrollo de la tesis consta de cuatro capítulos, el primero desarrolla el planteamiento del problema, el segundo capítulo trata sobre el fundamento teórico correspondientes a la revisión bibliográfica de las bases teóricas que viene a ser el complemento para el desarrollo de la tesis, el tercer capítulo aborda el marco metodológico, y finalmente el cuarto capítulo detalla los resultados obtenidos.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.2. Descripción del problema**

##### **1.2.1. Antecedentes del problema**

Como antecedente del problema se tiene que la recuperación de cobre desde calcopirita por medio de lixiviación es compleja, principalmente porque la disolución tiene una cinética muy lenta en la mayoría de los medios de lixiviación, y porque se produce una solución de cobre altamente contaminada con hierro. En contraste, la lixiviación de calcopirita sulfurizada para producir cobre es un proceso muy atractivo debido a que la disolución tiene una cinética rápida y es un proceso muy selectivo en medio cloruro.

En estudios recientes, se ha determinado que mediante la reacción de calcopirita con azufre elemental (reacción de sulfurización) a temperaturas moderadas es posible transformarla en especies más fáciles de lixiviar. Dichos trabajos también demostraron que, si la sulfurización de calcopirita se realiza en el rango de temperaturas altas, se logra transformar la calcopirita.

### **1.1.2. Problemática de la investigación**

La principal problemática del cobre en los procesos de lixiviación es cómo hacer rentable y eficiente las operaciones con mayores recuperaciones y menor costo por ello nace la investigación de la realización de pruebas de lixiviación en medio cloruro de sodio y ácido sulfúrico.

La extracción de metales de valor comercial con bacterias quimiolitotróficas de minerales sulfurados de baja ley, es de interés en biohidrometalurgia para la explotación de menas, que por la baja concentración del metal no se tratan con métodos tradicionales. El potencial *Thiobacillus* y archeobacteria para lixiviar minerales incluso radiactivos in situ o de reactor, abren prometedoras posibilidades para la optimización del recurso minero en la industria de metalurgia extractiva, en especial si se realizan verdaderas acciones conjuntas entre los centros de investigación y la industria.

### **1.2. Formulación del problema**

Según la problemática planteada en el estudio, se plantea la siguiente interrogante:

¿Será factible la lixiviación en medio de cloruro de sodio y ácido sulfúrico para obtener una buena recuperación de cobre desde minerales refractarios?

### **1.3. Justificación e importancia**

- Este estudio se justifica por la necesidad de reducir el tiempo de lixiviación de los sulfuros, a fin de incrementar la recuperación del cobre en la lixiviación de minerales refractarios de cobre.
- El presente estudio es la experimentación de la cinética de disolución de los minerales refractarios de cobre mediante pruebas de disolución con concentrado de lixiviantes mediante agitación mecánicamente bajo condiciones moderadas a nivel laboratorio.
- La importancia del estudio se basa en la realización de las pruebas utilizando dos lixiviantes para minerales refractarios de cobre ya que el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico) es el más usado a nivel de planta; por cuanto, hay pocos estudios realizados con el  $\text{NaCl}$  (cloruro de sodio) para los minerales refractarios de cobre en la región de Tacna.

### **1.4. Limitaciones del estudio**

Para el presente estudio, no existen limitaciones o problemas con el trabajo de investigación, ya que el asesor tiene experiencia en campo de la metalurgia extractiva, por lo que es favorable el análisis.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar del estudio de la lixiviación en medio NaCl – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para incrementar la recuperación de cobre desde minerales refractarios (sulfuros primarios y secundarios).

### **1.5.2. Objetivo específicos**

- Realizar pruebas de lixiviación en medio NaCl – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de minerales sulfurados primarios o secundarios.
- Determinar los parámetros adecuados para el proceso de lixiviación de minerales refractarios de cobre (sulfuros primarios y secundarios).
- Demostrar el alto poder lixivante del Cl<sup>-</sup> debido al potencial levemente oxidante inducido sobre el par redox Cu<sup>2+</sup>/Cu<sup>+</sup>.
- Determinar las recuperaciones de la lixiviación de minerales refractarios de cobre (sulfuros primarios y secundarios).

## **1.6. Hipótesis**

Mediante un estudio experimental se realizará la lixiviación en medio NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de tal manera, incrementar la recuperación de cobre desde minerales refractarios.

### **1.6.1. Hipótesis específicas**

- Mediante pruebas a nivel laboratorio se espera lixiviar minerales sulfurados en medio NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y lograr identificar la recuperación más alta.
- Mediante pruebas metalúrgicas se logrará identificar los parámetros adecuados para el proceso de lixiviación de minerales refractarios de cobre.
- Mediante un análisis y pruebas de lixiviación se logrará demostrar el alto poder lixivante del Cl<sup>-</sup> debido al potencial levemente oxidante inducido sobre el par redox Cu<sup>2+</sup>/Cu<sup>+</sup>.
- Mediante análisis químico se logrará comparar las recuperaciones de cobre como resultado de la lixiviación de minerales refractarios de cobre a nivel laboratorio.

## **1.7. Variables**

### **1.7.1. Identificación de las variables**

Para el estudio se identificaron las siguientes variables con las que se realizaron las pruebas metalúrgicas:

#### **Variables independientes:**

- Granulometría del mineral
- Concentración de los agentes lixiviantes
- Potencial de oxidación

- pH

**Variable Dependiente:**

- Recuperación

**1.7.2. Definición operacional de las variables**

Las variables de estudio se definen de la siguiente manera:

- La granulometría del mineral, está relacionado con el tamaño de granulometría que se selecciona para el proceso.
- Concentración de los agentes lixiviantes, relación de adición del cada reactivo al proceso.
- Potencial de oxidación, una forma de cuantificar si una sustancia es un fuerte agente oxidante o un fuerte agente reductor,
- pH, factor importante para el proceso.
- Recuperación del cobre.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del estudio

Hernández (2013), en su estudio realizado sobre el equilibrio sólido-líquido de sistemas acuosos de minerales de cobre con agua de mar, aplicado a proceso de lixiviación, sostiene que la lixiviación de un mineral que contiene calcopirita como única fuente de cobre (1,55 % CuT), utilizando diferentes ácidos ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , HCL,  $\text{HNO}_3$ ), distintos oxidantes ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) y medio clorurado (NaCl), pruebas paralelas de lixiviación por agitación, usando como solvente agua de mar y agua pura, realizadas a una temperatura de 318,15 K (45 °C) y tamaño de partícula bajo 210  $\mu\text{m}$ , el mejor resultado fue obtenido en el sistema  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1M) +  $\text{NaNO}_3$ (1M) más agua de mar con una extracción de cobre de 78,8 % en tres días de lixiviación, los sistemas que utilizaron nitrato como oxidante en un medio ácido, presentaron mejores resultados que aquellos sistemas donde el nitrato estaba ausente, debido al alto valor del potencial de oxidación que tiene los iones nitrato con respecto a los demás oxidantes utilizados en la investigación y que a mayor concentración  $\text{H}^+$  mayor su potencial.

De otro lado, Enciso (2014) respecto a la acción del ácido sulfúrico para la recuperación de cobre, investigó las dosis exactas de ácido para obtener la máxima recuperación en un proyecto minero, estudio que se viene aplicando actualmente en el Perú, optimizando esta etapa del proceso de recuperación de cobre de las menas cupríferas.

El ácido sulfúrico puede ser obtenido de tiendas proveedoras o mediante el tratamiento que generan las fundiciones, otro motivo por el cual, se usa este reactivo es por el rápido ataque a los óxidos.

Asimismo, Guiachetti (2011), en su trabajo de investigación titulado “Consumo ácido sulfúrico y cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre” llegó a la siguiente conclusión: “Se logró caracterizar de forma experimental la cinética de los procesos involucrados en la lixiviación acida de un mineral oxidado de cobre, cuya especie principal es la cuprita ( $Cu_2O$ ). Se obtuvo que la velocidad de consumo de ácido, disolución de cobre y disolución de fierro aumentado a medida que la concentración de ácido crecía, para el rango de 2 – 20 ( $g/l$ ). Para la velocidad de disolución de cobre se esperaba que exista una concentración inferior a 5 ( $g/l$ ) sobre la cual no habría un aumento en la velocidad de disolución”.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Conceptos de la lixiviación**

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico de la industria extractiva minera-metalúrgica, que se utiliza principalmente en la extracción de algunos minerales como cobre, oro y plata, por medio de la aplicación de disoluciones de ácido sulfúrico y agua en minerales oxidados (Barahona, 2014).

En la superficie, donde se conformarán las pilas de material a lixiviar, se instala una membrana impermeable sobre la cual se dispone un sistema de drenes (tuberías captadoras) que recogerán las soluciones que se infiltran a través del material. Estas soluciones de sulfato de cobre limpio, son llevadas a la planta de extracción por solvente (Barahona, 2014).

#### **2.2.1.1. Procesos para la lixiviación**

Para la realización de la lixiviación se cumple con los siguientes procesos:

**Chancado:** El material extraído de la mina, con minerales oxidados de cobre, es procesado a través de un chancado primario y secundario (eventualmente terciario), con el fin de obtener un material mineralizado de un tamaño máximo de 1,5 a  $\frac{3}{4}$  pulgadas. Este tamaño es suficiente

para dejar expuestos los minerales oxidados de cobre a la infiltración de la solución ácida (Barahona, 2014).

**Formación de la pila:** Barahona (2014) también señala que el material es transportado por cinta o camión al lugar de acopio donde se formará la pila. En este trayecto, el material es sometido a una primera irrigación con una solución de agua y ácido sulfúrico, llamada “curado”, de manera de iniciar ya en el camino el proceso de sulfatación del cobre contenido en los minerales oxidados.

Sobre las pilas, se instala un sistema de riego por goteo y aspersores, permitiendo la humectación de toda el área.

### **2.2.2. Reactivos utilizados en la lixiviación**

Los reactivos usados para lixiviar minerales deben ser fáciles de regenerar y capaces de disolver rápidamente los minerales deseados en este caso se tiene el cobre, pero no los minerales de ganga (Ortiz, 2012).

Asimismo, Ortiz indica que los disolventes que se utilizan en la lixiviación incluyen tanto soluciones ácidas como alcalinas, así como también algunas sales, pero el ácido sulfúrico es el que se emplea universalmente. Esto se debe en parte, a su eficiencia como disolvente

y en parte a que es fácil de conseguir y de bajo costo; es fácil de manejar y su pérdida durante el proceso son bajas.

La disolución de minerales oxidados requiere de la presencia de un oxidante. Los más usados son el oxígeno y los iones férricos. Las soluciones alcalinas como hidróxido de amonio con oxígeno o carbonato de amonio más hidróxido de amonio se usa para lixiviar menas de cobre nativo y carbonatos metálicos (azurita y malaquita).

La ventaja de usar una solución de lixiviación alcalina con una ganga carbonatada (calcita, dolomita) es que la solución alcalina no ataca los minerales de ganga, mientras que el uso de lixiviación ácida consumiría una cantidad considerable de ácido debido al ataque de la ganga (Ortiz, 2012).

Cuando el cobre se lixivia con una solución alcalina conteniendo amoníaco, el cobre se puede precipitar como  $\text{CuO}$  mediante calentamiento, lo cual también expulsa el amoníaco y el dióxido de carbono de la solución permitiendo la recuperación de estos gases.

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 (Ortiz, 2012):

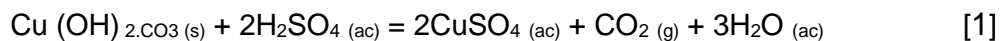
- Lixiviación ácida: Comprende la lixiviación con ácido sulfúrico concentrado, lixiviación con ácido sulfúrico diluido y oxígeno, lixiviación con ácido clorhídrico, lixiviación con ácido nítrico, lixiviación férrica, lixiviación con tiurea.
- Lixiviación alcalina: Comprende la lixiviación amoniacal, 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 electro oxidación.
- Lixiviación oxidante con oxígeno a presión en autoclaves.
- Lixiviación bacteriana o Lixiviación férrica combinada con lixiviación bacteriana.

La lixiviación se puede aplicar fácilmente a distintos tipos de minerales oxidados y con ayuda bacteriana a minerales sulfurados de

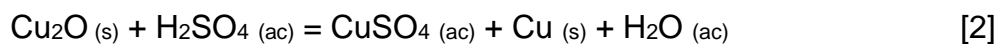
enriquecimiento secundario. Pueden tratarse minerales, relaves o concentrados. En el caso de minerales cuya aplicación es mayoritaria, las operaciones de lixiviación ocurren en bateas, botaderos, pilas o in-situ. En el caso de relaves y concentrados, estas se llevan a cabo normalmente por agitación (Ortiz, 2012).

En el caso de los óxidos, la lixiviación se aplica a minerales de fácil disolución como:

**Malaquita:**



**Cuprita:**



**Tenorita:**



**Calcita:**



### 2.2.3. Tipos de lixiviación

En mención a los tipos de lixiviación tenemos lo siguiente:

- Lixiviación in situ
- Lixiviación en botaderos
- Lixiviación en bateas o percolación
- Lixiviación en pilas o columnas

- Lixiviación por agitación
- Lixiviación bacteriológica

De los tipos de lixiviación mencionados, a continuación conceptualizaremos el tipo de lixiviación en pilas, por ser el más aplicativo en la industria actual.

#### **2.2.3.1. 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 km<sup>2</sup> (Davenport et al., 2011).

El lixivante que contiene H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 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 (Broggi, 2015).



Figura 1. Lixiviación en pilas en Ortiz Gold mine  
Fuente: Broggi, 2013

#### **2.2.3.2. Ventajas y desventajas de la lixiviación en pilas**

La lixiviación en pilas presenta un número de ventajas y desventajas comparadas con el proceso de molienda y flotación de minerales sulfurados, tal como se observa en la siguiente tabla:

**Tabla 1***Ventajas y desventajas de la lixiviación en pilas*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo capital y bajos costos de operación</li> <li>- Ausencia de molienda pero podría requerir chancado y aglomerado</li> <li>- Puede ser usado para tratar minerales de baja ley, minerales de desecho aplicables a yacimientos pequeños</li> <li>- La ausencia de etapas de separación sólido líquido permite operar en contracorriente.</li> <li>- Puede alcanzarse el contenido metálico deseado por medio de reutilización de soluciones en las pilas.</li> <li>- Simplicidad de equipos y operación</li> <li>- Tiempos de arranque más breve</li> <li>- Regulaciones ambientales menos intensivas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Largos ciclos de lixiviación y retención de soluciones.</li> <li>- Menores recuperaciones que los procesos que involucran molienda/ flotación o molienda/ lixiviación</li> <li>- Extensos programas de pruebas de pilotaje</li> <li>- Largos ciclos de lixiviación y retención de soluciones</li> <li>- Impacto económicos y ambientales de largo plaza</li> <li>- Posibles emisiones medio ambiente de PLS</li> </ul>

Fuente: Ghorbani et al. (2011)

**2.2.3.2. Principales variables de la lixiviación en pilas**

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 (Broggi, 2013):

**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,1986).

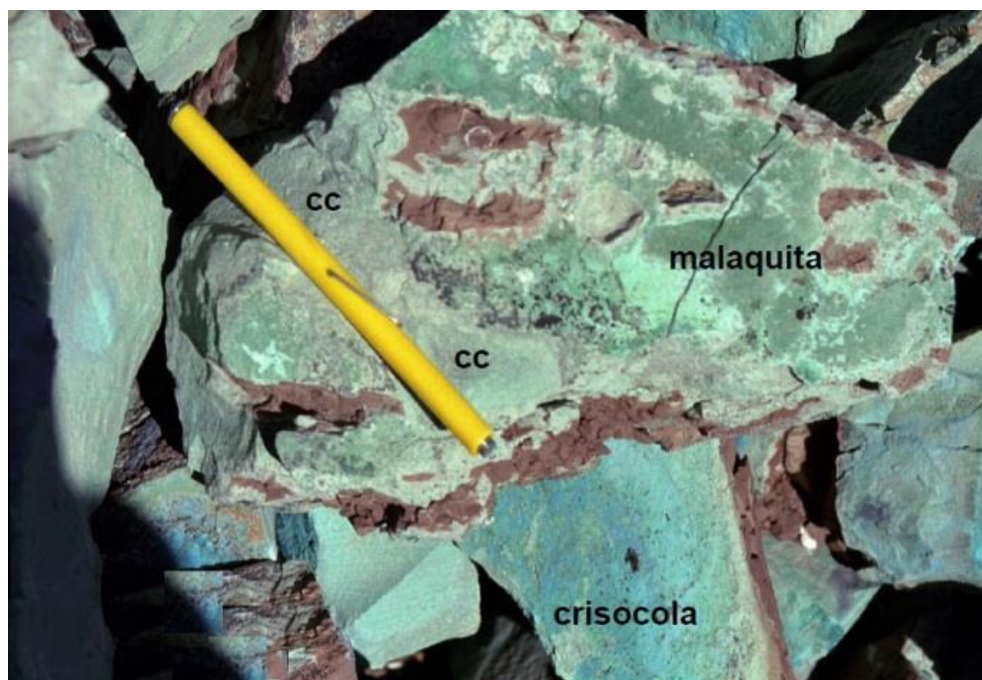


Figura 2. Tamaño de partícula del mineral  
Fuente: Broggi, 2013

**Concentración de ácido en la solución lixiviante:** 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 lixiviantes permite alcanzar mayores recuperaciones de cobre, aunque también se produce un elevado consumo de ácido (Broggi, 2013).

**Flujo específico de soluciones:** Broggi (2013) refiere que el flujo de lixiviante determina la velocidad de transporte de los reactivos y productos hacia y desde la pila, usualmente puede variar entre 5 a 30 l/m<sup>2</sup>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 no superar los 8 m por cada nueva capa (Domic, 2004).

**Tiempo de lixiviación:** Broggi (2013) señala que 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, 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 ripios 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  $0,5 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{t}$  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 perdidas por evaporación y arrastre físico del viento (Broggi, 2013).

**Influencia mineralógica en la lixiviación en pilas:** Además, precisa Broggi (2013) que “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 Figura:

CINETICA RELATIVA	TIEMPO DE REFERENCIA	ESPECIES MINERALES DE COBRE
<b>MUY RAPIDA</b> (A temperatura ambiente)	<b>Segundos a minutos</b> Disolución completa	Carbonatos (malaquita, azurita), sulfatos (chalcantita, brochantita y antlerita) y cloruros (atacamita)
<b>RAPIDA</b> (Requiere mayor acidez)	<b>Horas</b> Disolución completa	Óxidos cúpricos (tenorita) y silicatos (crisocola y dioplasa)
<b>MODERADA</b> (Requiere un agente oxidante)	<b>Días a semanas</b> 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)
<b>LENTA</b> (Requiere un agente oxidante)	<b>Semanas a meses</b> Disolución puede ser completa	Sulfuros simples (calcosina, digenita, djurleita, covelina)
<b>MUY LENTA</b> (Requiere un agente oxidante)	<b>Años</b> Disolución es incompleta	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita, tetrahedrita)

Figura 3. Velocidades relativas de disolución de las principales especies de cobre en soluciones de ácido sulfúrico diluido  
Fuente: Domic, 2004

**Consumo de reactivos:** Dreier (1999) precisa que las especies minerales de la ganga presentan reactividades al ácido que dependen fundamentalmente de su composición. El autor, clasifica a la ganga según su reactividad en:

**a) Ganga altamente reactiva:** Esta categoría incluye especies minerales carbonatadas (calcita, dolomita, siderita, etc.), que reaccionan con el ácido con rapidez.

**b) 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.

**c) Ganga moderadamente reactiva:** En esta categoría se encuentran la ortoclasa, biotita, albita y cuarzo.

**d) Ganga no reactiva:** las areniscas cuarcíferas son casi inertes a las soluciones de lixiviación.

### **2.2.3.3. Práctica industrial de la lixiviación en pilas**

Las pilas de lixiviación pueden desarrollarse de dos formas:

**a) Pilas estáticas (*multi-lift*):** Consisten en un apilamiento de un nivel inicial sobre una superficie impermeable, después de que dicho nivel se ha lixiviado, se apilan nuevos niveles sobre los anteriores. Cada nivel tiene una altura de entre 5 a 8 m y la altura total de la pila puede llegar hasta los 200 m (Broggi, 2013).

**b) Pilas dinámicas (on/off):** El mineral es apilado en un sólo nivel, aproximadamente de entre 7 a 8 metros, construidos sobre una base impermeable. El material es removido después de ser lixiviado y reemplazado por mineral nuevo (Broggi, 2013).

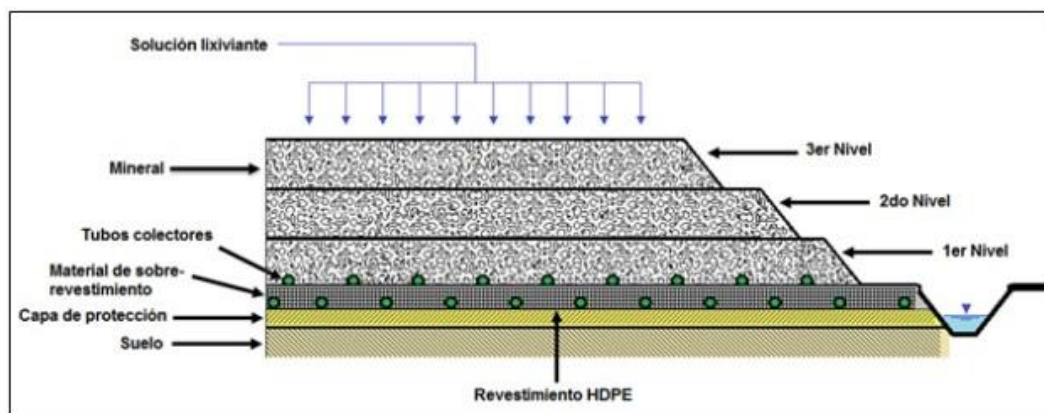


Figura 4. Esquema de una pila de lixiviación estática (multi-lift) y sus principales elementos  
Fuente: Broggi, 2013

### Base impermeable

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 (Broggi, 2013).



Figura 5. Esquema de una pila de lixiviación – base permeable  
Fuente: Broggi, 2013



Figura 6. Construcción de la pila de lixiviación  
Fuente: Broggi, 2013

### **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 TM/d), se usan correas modulares articuladas, que terminan en un apilador de correa. Sin embargo, para faenas aún mayores (de 75 000 a 15 0000 TM/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 cachos o rotopalas (Broggi, 2013).



Figura 7. Equipo mecanizado para la carga y descarga de mineral en pilas de lixiviación. A) Apilador móvil; B) Rotopala para descarga de rípios, minera Radomiro Tomic, Chile (10745 t/h)  
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 (Davenport et al., 2011).

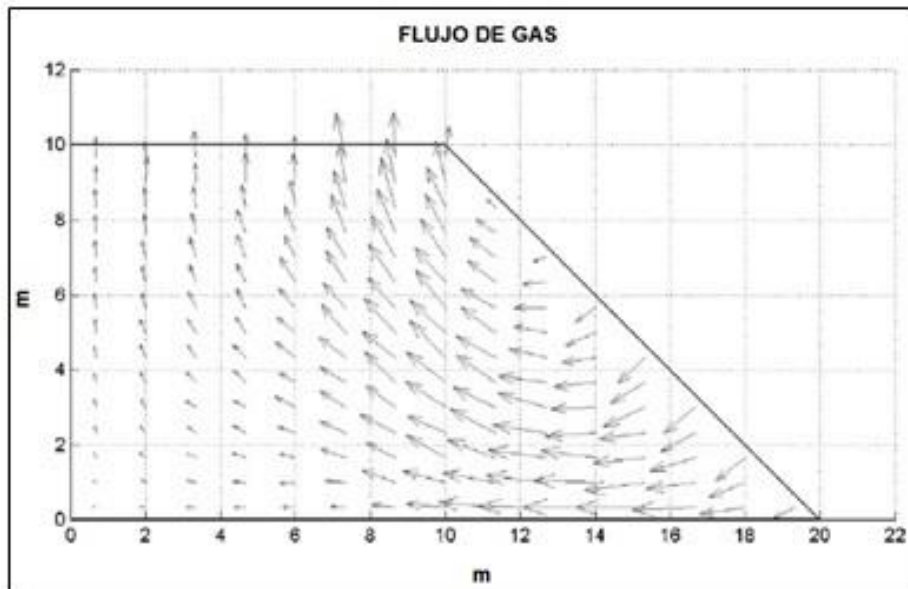


Figura 8. Flujo de aire a través de la pila (modelado en 2D)  
Fuente: Sidborn et al., 2003

### **Irrigación de la pila**

El lixiviante es suministrado por medio de una red de tuberías distribuidas regularmente, con goteros o aspersores extendidos en la superficie de la pila.

### **Recolección de soluciones**

El PLS acumulado en la base de la pila fluye por gravedad a través de tuberías plásticas de drenaje (aproximado 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 9. PLS Cerro Verde – Perú  
Fuente: Broggi, 2013

El término lixiviación se utiliza para referirse al lavado que se le realiza a una sustancia que ha sido pulverizada con el objetivo de poder extraer todas sus partes que son solubles. Es un mecanismo con el cual se debe de tener extremo cuidado, pues produce el envenenamiento por los componentes del cianuro y la gran cantidad de agua que se utiliza (Broggi, 2013).

Consiste en un proceso hidrometalúrgico por medio del cual se logra provocar la disolución de un elemento determinado desde el mineral que lo contiene para que luego pueda llegar a ser recuperado en etapas posteriores por medio de la electrólisis (Broggi, 2013).

Existen dos tipos de lixiviación que son los siguientes:

**Lixiviación natural:** Este tipo es el que produce el desplazamiento de sustancias solubles o dispersables y es un proceso muy característico de climas húmedos. El proceso produce que las partes superiores del suelo pierdan compuestos nutritivos, ya que son arrastrados por el agua ocasionando que los suelos se vuelvan más ácidos, y en algunos casos produciendo toxicidad. Debido a este tipo de lixiviación natural se producen grandes pérdidas de fertilizantes y de compuesto nutritivos (Broggi, 2013).

Cuando el clima es húmedo, esta misma condición hace que la vegetación funcione como una capa protectora contra la lixiviación, pero cuando el hombre destruye esta capa forestal, el proceso se altera y se deja de retener nutrientes. El uso de fertilizantes muy altos en ácidos, el riego excesivo y cultivos que retienen muchos nutrientes del suelo también afectan el proceso (Broggi, 2013).

**Lixiviación química minera:** Es un proceso por medio del cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, por medio de la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se pueden llegar a difundir desde el sólido a la fase líquida, lo que ocasiona una separación de los componentes originales que tiene el sólido (Broggi, 2013).

#### **2.2.4. Lixiviación en medio de cloruro de sodio**

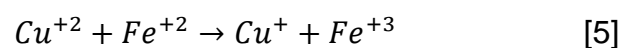
Los cloruros poseen un poder altamente solubilizante debido a su alta electronegatividad que significa que tienen la capacidad de atraer electrones, por lo que se han utilizado en diversas investigaciones para el tratamiento hidrometalúrgico de minerales sulfurados. Se han estudiado diversos procesos utilizando distintos agentes oxidantes como iones cúpricos, férricos, oxígeno, cloro, pero todos en medio lixivante con altas concentraciones de cloruro (Hernandez et al., 2012).

Debido a la naturaleza de los iones cloruros, la mayoría de los metales no ferrosos de interés son altamente solubles en agua. Las reacciones electroquímicas son altamente reversibles. Generalmente, la lixiviación de los sulfuros, ocurre más fácilmente en disoluciones de cloruro que en sulfato, debido a la formación de complejos con iones metálicos presentes en el mineral que se transforman en los agentes lixiviantes y son continuamente regenerados durante el proceso de lixiviación (Herreros, 2007).

Además, las energías de activación de los sistemas en medio clorurado son más bajas que en medio sulfatado y el cloruro interviene en la capa de producto que se forma al lixiviar minerales sulfurados, produciendo cambios en la morfología de la capa de ceniza logrando que sea porosa y permitiendo una buena difusión de la solución

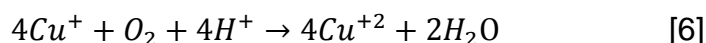
lixiviante al interior del mineral. La facultad que tienen los procesos de lixiviación con cloruro de generar azufre elemental, sin alterar la pirita los hace muy útiles para el tratamiento de sulfuros pírnicos complejos (Lu et al., 2000).

En general el proceso de lixiviación de minerales sulfurados de cobre involucra una interacción entre los iones cúpricos, cuprosos, férricos, ferrosos y cloruros en un medio ácido. Se inicia la oxidación de los sulfuros de cobre, con el ión férrico ( $Fe^{+3}$ ), dejando como producto de la reacción iones cúpricos ( $Cu^{+2}$ ) y ferrosos ( $Fe^{+2}$ ). En presencia de cloruro, el ión cúprico es capaz de oxidar parcialmente al ión ferroso según ecuación 1 (Hernández et al., 2012):



Esta reacción corresponde a un equilibrio termodinámico, por lo que la reacción se detiene para un conjunto de valores de concentración de los cuatro iones, que depende de la constante de equilibrio. La constante de equilibrio depende de la concentración de cloro (que actúa como catalizador). Esto se debe a la formación de complejos con el cloro. En general, mientras más altos en cloro son los complejos ( $CuCl_2^-$ ,  $CuCl_3^{2-}$ ,  $CuCl_4^{3-}$ ) más grande es la constante de equilibrio de formación. Luego el ión férrico vuelve a oxidar más sulfuros y, por otra

parte, el ión cuproso se oxida fácilmente, gracias al oxígeno del aire (Hernández et al., 2012):



El ión cúprico formado en esta reacción junto al ión ferroso, formado en las reacciones de oxidación de los sulfuros, vuelven a reaccionar generando nuevamente los iones férricos y cuprosos y repitiéndose nuevamente el mismo ciclo. Así, este conjunto de reacciones conforma un sistema de oxidación autogenerado y aparentemente interminable. Como la reacción de oxidación del ión cuproso es muy rápida, la reacción de equilibrio queda determinada por la capacidad del sistema de producir el ión ferroso, es decir por la velocidad de oxidación de los sulfuros. Esto quiere decir que la velocidad de oxidación de los sulfuros es muy rápida al comienzo y se va haciendo menor a medida que la difusión del ión férrico en las partículas se hace más lenta (Hernández et al., 2012).

La mayor parte de los metales de transición tienen fuerte tendencia a formar complejos con los iones cloruros. Basados en los valores de las constantes de formación de los respectivos complejos y datos de solubilidad, Berger y Winand ordenaron las sales de cloruro según su fuerza como aceptores de  $Cl^-$  del modo siguiente (Berger, 1984):

- (Aceptoras de Cl<sup>-</sup>) AgCl > CuCl > PbCl<sub>2</sub> > ZnCl<sub>2</sub> > CuCl<sub>2</sub> > FeCl<sub>3</sub> > FeCl<sub>2</sub> > NiCl<sub>2</sub> > HCl, NaCl, KCl (Donantes de Cl<sup>-</sup>)

Las salesceptoras son aquellas cuyos cationes tienden a formar complejos con el ión cloruro, mientras que las sales donantes son aquellas cuyos cationes no tienen tendencia a formar iones complejos con cloruro. En un medio sulfato, los complejos con iones cúpricos (Cu<sup>+2</sup>) son más estables que los iones cuprosos (Cu<sup>+</sup>), en cambio, en un medio clorurado los complejos con iones Cu<sup>+</sup> son más estables que los iones Cu<sup>+2</sup>. La situación es al revés a lo que ocurre en medio sulfato y si la concentración de cloruro es suficientemente elevada es posible tener el cobre en solución predominantemente en el estado cuproso (Berger, 1984).

En la Figura 10, se muestra la variación de las concentraciones de Cu<sup>+</sup> y Cu<sup>+2</sup> a concentraciones crecientes de cloruro en una solución acuosa que contiene 0,1 M de Cu<sup>+</sup> y 0,1 M de Cu<sup>+2</sup> a 318,15 K (25 °C).

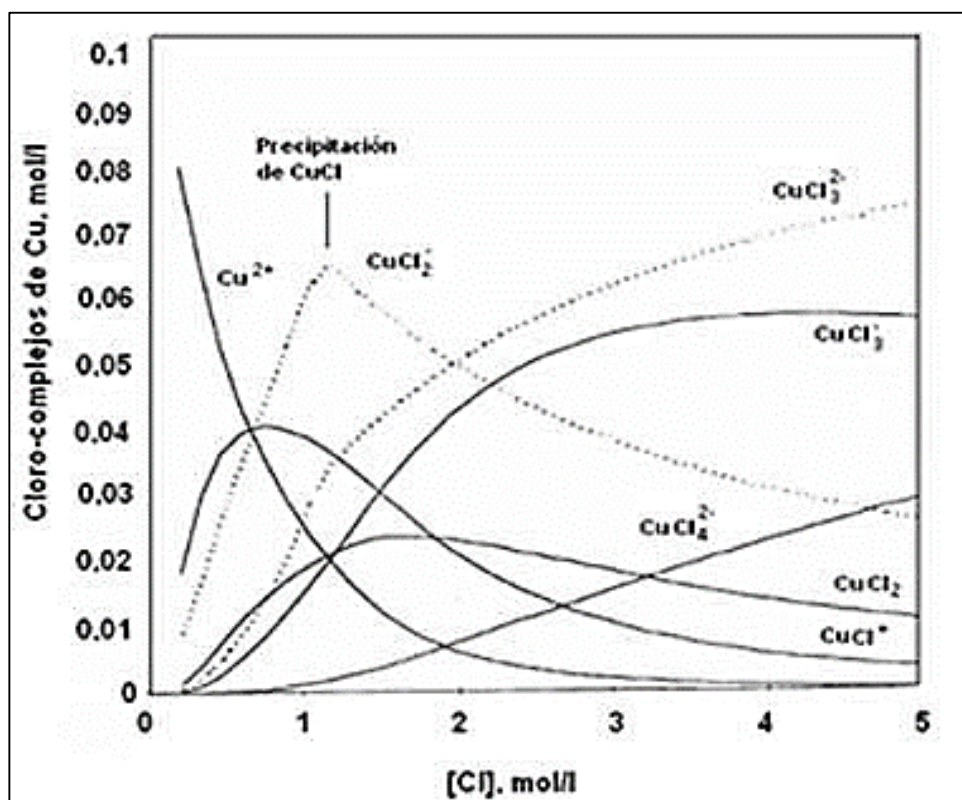


Figura 10. Diagrama de especies del sistema Cu-Cl-H<sub>2</sub>O a 318,15 K (25 °C) en función de [Cl]. Condiciones: Cu(I) = Cu(II) = 0,1M  
Fuente: Ruiz, 2007

En general, el cloruro contribuye a la formación de complejos de cloro-cobre que favorecen la velocidad de disolución de minerales de cobre a través de la mediación de iones cuprosos, los cloruros tienen un poder altamente solubilizantes y la lixiviación en medio cloruro hace uso del hecho que en tal medio el ión cuproso es estable, generando un ciclo redox virtuoso equivalente al de la biolixiviación (Ruiz, 2007).

Un número de procesos han sido propuestos en la hidrometalurgia clorurada a lo largo del tiempo.

### 2.2.4.1 Agua de mar

El agua de mar, es una solución acuosa en la que se encuentran disueltos una amplia variedad de sólidos (sales principalmente) y gases atmosféricos, sumándose materiales sólidos suspendidos del tipo orgánico e inorgánico.

Las Tablas 2 y 3, muestran los principales componentes presentes en el agua de mar.

**Tabla 2**

*Componentes principales del agua de mar en mol/kg de solución*

Componente	Unidades/Mol/kg
NaCl	0,41040
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,02824
KCl	0,00937
CaCl <sub>2</sub>	0,01028
MgCl <sub>2</sub>	0,05282
NaF	0,00007
KBr	0,00084
SrCl <sub>2</sub>	0,00009
NaHCO <sub>3</sub>	0,00205
B(OH) <sub>3</sub>	0,00042

Fuente: Millero, 2006.

**Tabla 3***Composición del agua de mar, asumiendo total ionización.*

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
Cloruro, Cl <sup>-</sup>	55,082
Sodio, Na <sup>+</sup>	30,646
Sulfato, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,691
Magnesio, Mg <sup>2+</sup>	3,686
Calcio, Ca <sup>2+</sup>	1,161
Potasio, K <sup>+</sup>	1,103
Bicarbonato, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,406
Bromuro, Br <sup>-</sup>	0,174
Estroncio, Sr <sup>2+</sup>	0,029

Fuente: Singh, 1973.

La salinidad del mar no es igual en todas partes del mundo. A ello contribuyen diferentes factores como el derretimiento de las masas de hielo de los polos, la desembocadura de los ríos, la propia evaporación, la lluvia, las nevadas, el viento, el movimiento de las olas y las corrientes marinas. Se considera que la mayoría del agua contenida en los mares y océanos contiene, como promedio, un 3,5 % de sal (35 gramos por litro), así como otros minerales disueltos. El mar Muerto en cambio, presenta una salinidad aproximada de un 22 %. Al variar la salinidad del agua de mar, algunas de sus propiedades cambiarán, aumentando o disminuyendo su valor. Algunas propiedades que dependen de la salinidad son: densidad, viscosidad, tensión superficial, índice de refracción, conductividad eléctrica, entre otras. La salinidad está dada, principalmente, por los cloruros, sulfatos y carbonatos que se encuentran

disueltos en el agua del mar, y su distribución no es uniforme ni constante. El factor fundamental que determina las variaciones de salinidad en un área marítima concreta, es la pérdida o ganancia de agua.

En promedio el agua de mar posee una densidad de  $1,027 \text{ kg/m}^3$  y una viscosidad de  $1,21 \text{ cp}$ , mientras que el pH varía entre  $7,5-8,4$ , lo que equivale a una solución alcalina. Además, presenta una fuerza iónica de  $0,7 \text{ mol/kg}$ .

#### **2.2.5. Lixiviación en medio ácido sulfúrico**

La lixiviación ácida es uno de los procesos ampliamente utilizados para la extracción de cobre metálico de complejos minerales de cobre oxidados. La lixiviación en pilas de minerales metálicos está probada proceso, especialmente en la industria del cobre donde muchos millones de toneladas de cátodo el cobre se ha producido utilizando extracción por solvente y electro obtención para muchos años de una manera más barata (Emirhan, 2014).

En su método más simple, el proceso de lixiviación en pilas ácidas consiste en construir un gran montón de mineral triturado e irrigar la superficie del montón con un diluir la solución de ácido. A medida que el ácido penetra a través del montón, disuelve el metal en el mineral que se toman en solución. La solución embarazada se recolecta en la

parte inferior del montón, generalmente en un foro de goma impermeable, y bombeado para un tratamiento posterior usando varios procesos químicos dictados por el metal que es recuperado y los constituyentes químicos del mineral. La Figura 9 a continuación muestra un simple esbozo del proceso o de lixiviación en pilas (Emirhan, 2014).

Existe una extensa literatura sobre el proceso de lixiviación ácida para minerales refractarios especialmente para minerales de cobre oxidados debido a su complejidad para aplicaciones de flotación por espuma. La tabla 4 a continuación muestra la lista de minerales de cobre encontrados durante la lixiviación de minerales de cobre en el orden de susceptibilidad a la lixiviación.

**Tabla 4**

*Principales minerales de cobre en la lixiviación de minerales de cobre*

<b>Copper Minerals</b>	<b>Chemical Fórmula</b>
Malachite	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
Azurite	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
Cuprite	$\text{Cu}_2\text{O}$
Chrysocolla	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Chalcocite	$\text{Cu}_2\text{S}$
Covellite	$\text{CuS}$
Bornite	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$
Chalcopyrite	$\text{CuFeS}_2$

Fuente: Emirhan, 2014

Durante los procesos de lixiviación de ácido sulfúrico, es importante optimizar el proceso total de acuerdo con los tiempos de reacción (Emirham, 2014).

### 2.2.6. 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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el intervalo de concentración 2-10 %, que además es el más barato. Se utiliza en la lixiviación en terrenos y en tanques por agitación (Ortiz, 2016).

– **Sulfato férrico en solución ácida (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)**

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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 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  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  quedando el cobre en forma de óxido o en forma elemental en polvo al reducirse con gases (Ortiz, 2016).

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 (Ortiz, 2016).

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 (Ortiz, 2016).

## **2.2.7. Riesgos y acciones preventivas en la lixiviación de minerales refractarios de cobre**

### **2.2.7.1. Riesgos químicos en el proceso de electro obtención**

Según estudios dan a conocer que los agentes químicos de importancia, pueden encontrarse presentes en el aire durante el proceso (Barahona, 2014).

- **Ácido sulfúrico:** En el ánodo se libera oxígeno en forma de burbujas que se rompen en la superficie del líquido, generando pequeñas gotitas de solución ácida que se suspenden en el aire, contaminando el ambiente de trabajo.
- **Plomo:** Las gotitas que se generan producto del burbujeo en el ánodo, contienen una serie de agentes químicos disueltos, entre los que se destaca el plomo (por su toxicidad). También se acumula en las borras que decantan en el fondo de las celdas.
- **Hidrógeno:** Si la concentración de cobre se encuentra deprimida, por ejemplo, por corte del flujo de solución, en el cátodo puede ocurrir la formación de hidrógeno.

### **2.2.7.2. Riesgos para la salud**

La exposición a ácido sulfúrico puede causar irritación de las vías respiratorias, dificultad para respirar, edema pulmonar, laringitis y

bronquitis. Además, el contacto con los ojos puede producir irritación severa, quemaduras y opacidad de la córnea (Barahona, 2014).

Por su parte, el plomo puede ingresar al organismo por la vía respiratoria y también digestiva. Afecta principalmente al riñón y sistemas nervioso, hematológico y cardiovascular. Puede ocasionar anemia, cólico saturnino, polineuropatía, hipotiroidismo, hipertensión crónica y nefritis crónica (Barahona, 2014).

El hidrógeno no es tóxico, pero es un gas altamente inflamable y explosivo.

### **2.2.7.3. Recomendaciones preventivas**

Para controlar la emisión de gotitas de solución con ácido sulfúrico, plomo y otros agentes disueltos, se utilizan las siguientes estrategias (Barahona, 2014):

- Instalar extracción localizada en las celdas.
- Agregar reactivos que modifican la tensión superficial para minimizar la formación de gotitas al romperse las burbujas.
- Colocar flotando en la superficie capas de barras o pelotas de material plástico para capturar las gotas.
- Utilizar protección respiratoria en las tareas que el personal deba realizar en la proximidad de las celdas.

Para controlar la exposición a plomo en la tarea de retiro de borras, se recomienda (Barahona, 2014):

- Mantener húmedo el material lo máximo posible
- Utilizar protección respiratoria
- Ducharse al terminar la faena

Para controlar el riesgo de inflamación y explosión del hidrógeno, se aconseja:

- Instalar sistema de extracción en las celdas.
- Controlar los parámetros de operación, evitando que disminuya la concentración de iones de cobre.
- Instalar detectores de hidrógeno en las celdas calibrados para emitir alarma cuando la concentración alcance un 25 % del límite inferior de inflamabilidad.

### 2.3. Definición de términos

**Cobre:** Metal rojo muy maleable y dúctil que es un buen conductor de la electricidad.

**Depósito:** Un cuerpo mineralizado que se ha delimitado físicamente con suficiente perforación, excavación de zanjas y/o trabajos subterráneos y que se ha encontrado contiene una ley promedio suficiente de metal o metales para garantizar la exploración y/o los gastos de desarrollo. Un depósito como este no califica como un cuerpo de mineral comercialmente minable, ni como uno que contenga reservas de mineral, hasta que se hayan resuelto los factores legales, técnicos y económicos finales.

**Depósito de cobre porfirítico:** Un depósito de baja ley de gran tonelaje diseminado en el que el mineral de cobre se presenta como granos discretos y pequeñas venas en todo un gran volumen en roca.

**Electrodeposición:** El proceso de eliminación de cobre de la solución por la acción de las corrientes eléctricas.

**Lixiviación:** Un proceso químico por el cual un compuesto metálico soluble se extrae del mineral disolviendo los metales en un solvente.

**Recuperación:** El porcentaje de metal valioso en el mineral que se recupera por medio de un tratamiento metalúrgico.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Tipo y diseño de la investigación

##### a) Tipo y nivel de investigación:

###### **Tipo**

Por el tipo de investigación, el estudio reúne las condiciones metodológicas de una **investigación aplicada**, en razón, que se utilizarán conocimientos de los metalúrgicos, a fin de aplicarlas en el proceso de las pruebas de laboratorio.

###### **Nivel**

De acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación, se utilizará el nivel de las características de un estudio descriptivo – exploratorio.

##### b) Diseño de investigación

El diseño de la investigación por la naturaleza del estudio será el **experimental**. Este tipo de estudio consiste en encontrar parámetros óptimos para una mejor recuperación del cobre en la lixiviación con ácido cítrico; en base a ensayos y pruebas en laboratorio.

### **3.2. Población y muestra**

Para este estudio se trabajó con muestras de minerales refractarios de cobre, el tipo de muestreo fue por el método probabilístico.

### **3.3. Operacionalización de variables**

Para el estudio se operacionalizó las variables con las que se realizaron las pruebas metalúrgicas, como se indica a continuación:

#### **Variable Independiente:**

- Granulometría del mineral ( $\mu\text{m}$ )
- Concentración de los agentes lixiviantes (g/l)
- Potencial de oxidación
- pH

#### **Variable Dependiente:**

- Recuperación (%)

### **3.4. Instrumento y técnicas para recolección de datos**

Para la investigación se ha requerido de materiales, equipos y reactivos, los cuales se mencionan a continuación:

#### **3.4.1. Instrumentos:**

- 06 Vasos precipitados de 500 ml
- 06 soporte universal
- 06 matraz
- 01 varilla de agitación de vidrio

- 01 pizeta de 250 ml
- Papel filtro
- 06 luna de reloj

**Equipos e instrumentos:**

- Chancadora de mandíbulas
- Molino de bolas
- Agitadores
- Balanza analítica.
- PH metro
- Cuarteador
- Estufa
- Rotap con juego de mallas

**Reactivos:**

- Ácido sulfúrico
- Cloruro de sodio

**3.4.2. Técnicas para recolección de datos**

Las técnicas para la recolección de datos fueron realizadas mediante procedimientos de pruebas de laboratorio metalúrgico en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, desarrollándose de la siguiente manera:

Primeramente, se recepcionó el mineral solicitado por medio de la ESME a SPC para poder llevar a cabo las pruebas de lixiviación, lo que aproximadamente fueron 90 kg, de los cuales se utilizó 10 kg de mineral. Se utilizó una chancadora de quijada para reducir el tamaño del mineral y proceder con el siguiente proceso.



Figura 11. Chancadora de quijada  
Fuente: Recolección propia

Luego, el mineral reducido es recepcionado de la chancadora en una manta para el cuarteo y obtención de una muestra representativa.



Figura 12. Mineral chancado  
Fuente: Recolección propia



Figura 13. Cuarteo del mineral  
Fuente: Recolección propia

En seguida, se procedió al pesado del mineral utilizando una balanza analítica, para pasar una parte a la etapa de la molienda, y la otra se destinará para la determinación de la densidad aparente y real del mineral.



Figura 14. Pesado del mineral refractario  
Fuente: Recolección propia

Una vez realizada la molienda de las muestras, se calculó el collar de bolas que se utilizó en la molienda de minerales. Estos cálculos se realizaron según las dimensiones del molino del Laboratorio de

Mineralurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales.



Figura 15. Identificación de las bolas para la molienda  
Fuente: Recolección propia



Figura 16. Molinos utilizados para la liberación del mineral refractario  
Fuente: Recolección del autor.

El tiempo utilizado para la molienda fue de 40 minutos, por lo que, el mineral presenta una dureza alta. Terminado el proceso de molienda se procedió a retirar las bolas de acero y se obtuvo el mineral molido.



Figura 17. Limpieza de las bolas culminada la molienda  
Fuente: Recolección propia



Figura 18. Mineral como resultado de la molienda  
Fuente: Recolección propia

Luego de obtener la muestra molida se procedió a realizar el pesado para determinar el análisis granulométrico según corresponde al procedimiento establecido para el estudio.



Figura 19. Pesado del mineral después de la molienda  
Fuente: Recolección propia

Nuestra malla de control fue la 100; para ello, se trabajó con un tiempo de zarandeo de 15 minutos, en seguida, se procedió a la lixiviación por agitación en vaso precipitado. Las pruebas se realizaron en distintos tiempos de lixiviación.



Figura 20. Mallas Tyler usados para el análisis granulométrico  
Fuente: Recolección propia



Figura 21. Máquina del Rotap para la realización del ANGRA  
Fuente: Recolección propia

En las figuras 22, 23 y 24 se puede observar la agitación del mineral refractario, cumpliéndose los tiempos de lixiviación se procedió a filtrar las soluciones obteniéndose solución PLS, y por último las soluciones filtradas pasaron a ser analizadas con el equipo de absorción atómica de la ESME.



Figura 22. Agitación del mineral refractario  
Fuente: Recolección propia



Figura 23. Filtrado de la solución lixiviada  
Fuente: Recolección propia



Figura 24. Equipo de absorción atómica  
Fuente: Recolección propia.

### **3.5. Procesamiento y análisis de datos**

Para las pruebas y determinación de las características físicas del mineral refractario se usó el programa c. Microsoft office (Excel). Y para el procesamiento y análisis cuantitativo de datos se utilizó el equipo de absorción atómica de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados

De las pruebas realizadas se obtuvo los siguientes resultados:

#### **Resultados de la densidad aparente y real**

Se obtuvieron los siguientes resultados de la densidad aparente y real, cada prueba se realizó 3 veces para tener un valor promedio.

**Tabla 5**

*Resultados de la densidad aparente y real*

Muestra	Densidad g/cm <sup>3</sup>	
	Aparente	Real
M1	1,256	1,319
M2	1,243	1,310
M3	1,250	1,20

Fuente: Elaboración propia

#### **Resultados del análisis granulométrico (ANGRA)**

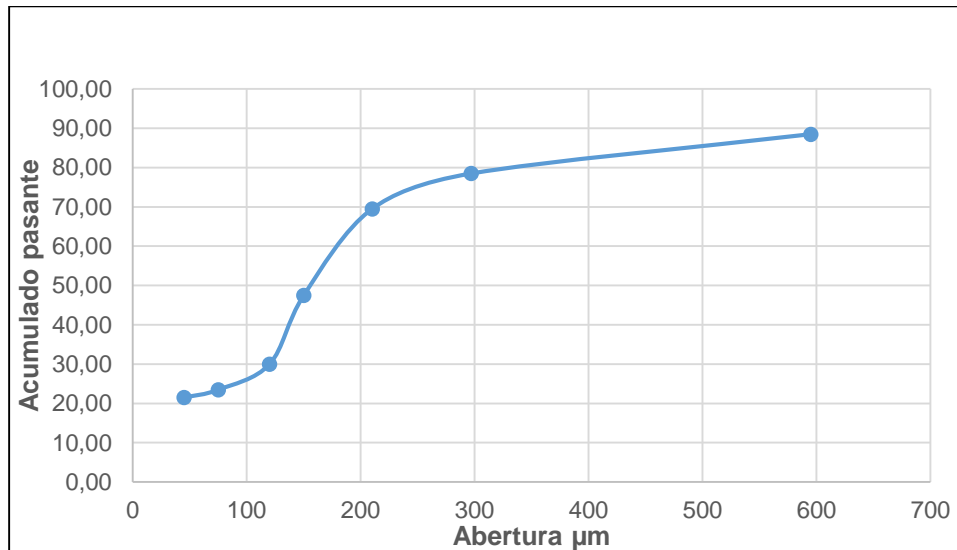
A continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis granulométrico de las muestras después de la molienda realizado en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales de la UNJBG.

**Tabla 6**

Resultados del análisis granulométrico

ANGRA mineral refractario						
N° de malla TYLER	Abertura $\mu\text{m}$	Peso kg	Peso (g)	% parcial	% Acumulado retenido	% Acumulado pasante
30	595	0,023	23	11,50	11,50	88,50
50	297	0,02	20	10,00	21,50	78,50
70	210	0,018	18	9,00	30,50	69,50
100	150	0,044	44	22,00	52,50	47,50
140	120	0,035	35	17,50	70,00	30,00
200	75	0,013	13	6,50	76,50	23,50
325	45	0,004	4	2,00	78,50	21,50
CIEGA		0,043	43	21,50	100,00	0,00
TOTAL			200	100		

Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Curva del análisis granulométrico del mineral refractario  
Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de ley, se enviaron tres muestras, las cuales fueron analizadas con la respectiva granulometría y malla control Tyler 100. Se analizó la ley de cobre en las tres muestras, y los resultados de esos análisis son apreciables en la tabla 7. Se destaca que la cantidad de cobre soluble es bastante menor que la de Cu total; por lo que, podemos deducir que es un sulfuro de baja ley.

**Tabla 7**

*Ley del mineral de sulfuro de baja ley*

Muestras	Cobre total (%)	Cobre soluble (%)	Cobre insoluble (%)
M 1	0,747	0,221	0,528
M 2	0,749	0,223	0,526
M 3	0,748	0,221	0,525

Fuente: Análisis Laboratorio Metalúrgico, ESME.

No se aprecia un aumento en el cobre soluble luego del ser liberado el tamaño de partícula con la molienda.

### **Resultados del ensayo de humedad en mineral refractario de cobre**

Se realizaron 3 ensayos de humedad para el mineral, obteniéndose los siguientes resultados, expresados en la tabla 8.

**Tabla 8**  
*Humedad en mineral refractario de cobre*

Ensayo	Masa inicial (g)	Masa final (g)	% humedad
M1	100	98,78	1,22
M2	100	98,80	1,2
M3	100	98,79	1,21
Promedio	100	98.79	1,21

Fuente: Elaboración propia

Se obtiene como resultado que la humedad promedio del es 1,21 %. Es necesario considerar la humedad presente en el mineral al iniciar la prueba, ya que el usar la masa húmeda, alteraría la cantidad de agua a utilizar en la lixiviación.

### **Resultados del análisis comparativo de la lixiviación por agitación**

Para verificar un análisis que diferencie el comportamiento de cada prueba por agitación, se prefirió realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos por cada prueba, los resultados se presentan a continuación:

La cinética de lixiviación por agitación en vaso se puede apreciar en la figura 26.

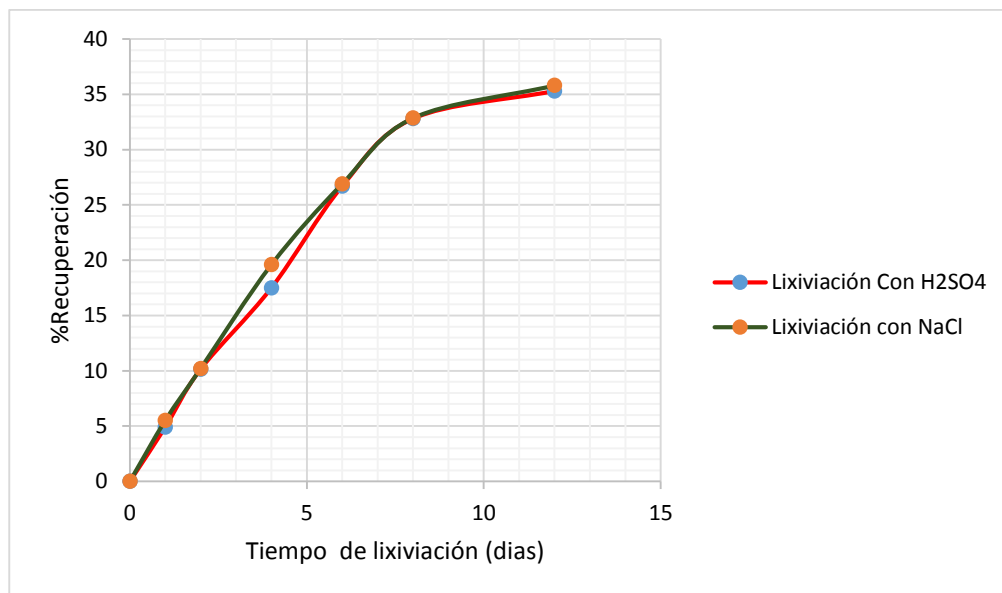


Figura 26. Comparación de cinética de lixiviación entre los reactivos H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaCl  
Fuente: Elaboración propia

### Resultados de la lixiviación con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaCl

El resultado de la lixiviación con NaCl durante el ciclo de lixiviación fue el esperado para mineral refractario sulfurado. En este sentido, en la cinética de lixiviación para sulfuros, el aumento en la recuperación es lento pero sostenido en el tiempo, casi formando una línea recta desde el día 8 al día 12.

### Resultados de la variación en pH y potencial redox

Se evalúa en la figura 27, las mediciones diarias de los parámetros de pH y potencial redox para la lixiviación, en donde los pH de PLS es sustancialmente mayor que la alimentación, durante todo el ensayo, lo que verifica un consumo de ácido de la prueba en las reacciones de lixiviación. Así mismo, se evidencia que los potenciales redox de la

lixiviación por agitación, son menores en los PLS que en la alimentación, lo que puede indicar, una presencia menor de iones férricos.

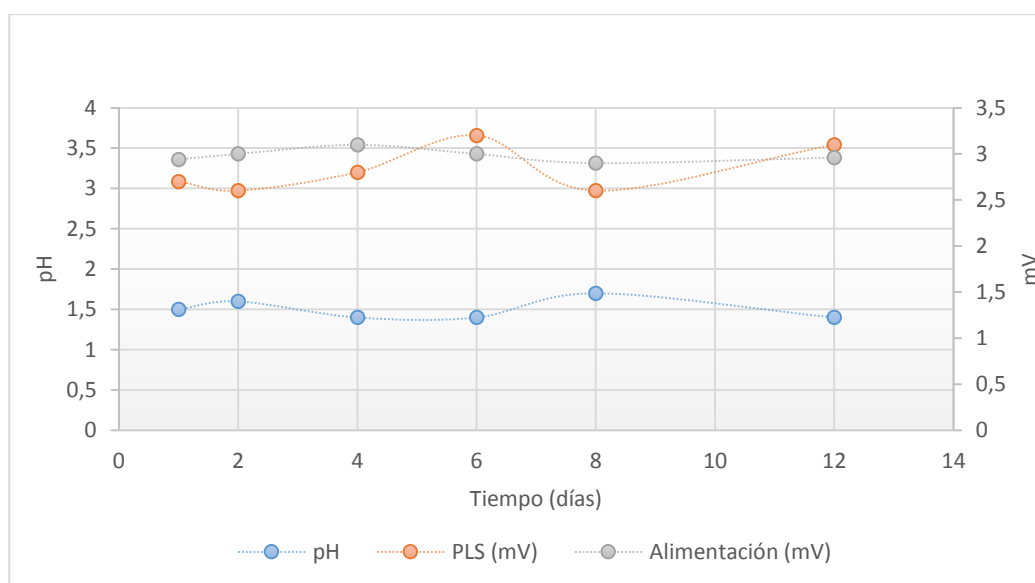


Figura 27. Variación de pH y Potencial Redox en soluciones de alimentación y PLS.  
Fuente: Elaboración propia

Se puede advertir en este ensayo la lixiviación de sulfuros de baja ley, es factible para el tipo de proceso de la planta ya que sin la adición de ningún promotor más que los que se presentan naturalmente en las soluciones de lixiviación, se logra una recuperación de 34 % en este ensayo.

### Variación del tiempo y la concentración de lixiviación

En la tabla 9 se puede observar la variación de la recuperación con respecto al tiempo de lixiviación.

**Tabla 9**  
*Recuperación de la lixiviación con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaCl*

Tiempo (Días)	% Recuperación	
	Lixiviación Con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Lixiviación con NaCl
0	0	0
1	4,9	5,5
2	10,15	10,2
4	17,5	19,6
6	26,7	26,9
8	32,8	32,85
12	35,3	35,8

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 10**  
*Potencial de lixiviación para distintos tiempos*

Tiempo	pH	Pls. mV	Alim. mV
1	1,5	2,7	2,94
2	1,6	2,6	3
4	1,4	2,8	3,1
6	1,4	3,2	3
8	1,7	2,6	2,9
12	1,4	3,1	2,96

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11**  
*Determinación de iones Fe en la lixiviación*

Tiempo (Días)	Fe <sup>2</sup> alim (g/L)	Fe <sup>2</sup> Res. (g/L)	Fe <sup>3</sup> alim (g/L)	Fe <sup>3</sup> Res. (g/L)
1	7	9,1	6,4	9,3
2	7,6	16,5	4,3	1,2
4	6,5	8,5	5,5	4,6
6	5,7	1,5	4,4	11,4
8	5	1,2	3,6	10,2
12	4,9	1,1	3,7	6,3

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2. Discusión de resultados

Se realizaron 3 experiencias para intentar determinar el cobre en solución obtenible desde muestra de mineral refractario de cobre, pero en ambas ocasiones el resultado fue que no existían sulfatos de cobre en las muestras de mineral.

Es entendible ya que el sulfuro no tiende a ser soluble en ácido, a menos que exista presencia de algún agente oxidante, pero si durante el proceso de lixiviación en pilas se agrega el Fe<sup>+3</sup>.

Por ello, se deduce que es importante la cantidad de azufre que se comienza a acumular en el exterior de la partícula, ya que el cobre

depositado en la superficie del mineral, ya ha sido disuelto por la lixiviación y se entra totalmente a la zona difusional.

Es entonces, cuando debería verse reflejada la influencia de la sal, ya que a medida que avanza la lixiviación en el área superficial de la partícula, el azufre resultante de la reacción se comienza a acumular en superficie, impidiendo la reacción redox, al no ser el azufre conductor eléctrico. Los iones cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) presentes en la solución lixivante, actúan en el azufre elemental que recubre la partícula, creando porosidades en su superficie, por los cuales pueda ingresar tanto iones de  $\text{Fe}^{3+}$ , como ácido y oxígeno, para no detener la lixiviación.

La importancia fundamental de este ensayo, es que además de ser el punto de comparación para los estudios relativos a la influencia del  $\text{NaCl}$  en la lixiviación frente a la lixiviación con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , da una perspectiva de la recuperación posible en una lixiviación sin ningún cambio respecto a la operación.

Según la figura 24 se ofrece una posible explicación de este fenómeno, es una disminución de la lixiviación de sulfuros, y en consecuencia una disminución de consumo de iones férricos, lo que aumentaría su concentración en las soluciones efluentes. El fenómeno se sostiene desde el día 6 hasta la finalización de las pruebas.

## CONCLUSIONES

1. Se determinó el estudio de la lixiviación en medio NaCl – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para incrementar la recuperación de cobre desde minerales refractarios el resultado obtenido para el tipo de mineral y utilizando los dos lixiviantes son similares teniendo una diferencia del 0,5 % de recuperación.
2. Al realizar las pruebas de lixiviación en medio NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de minerales sulfurados primarios, se obtuvo una recuperación mayor utilizando NaCl.
3. En el proceso de lixiviación de minerales refractarios de cobre, se estableció los parámetros adecuados, teniendo el tiempo de molienda en 30 minutos, un pH de 1,5 de promedio y concentraciones de lixiviantes con una pureza del 95 %.
4. Además, se definió el alto poder lixiviante del Cl<sup>-</sup> debido al potencial levemente oxidante inducido sobre el par redox Cu<sup>2+</sup>/Cu<sup>+</sup>.
5. Utilizando el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y 35,8 % con NaCl, se concretó las recuperaciones de la lixiviación de minerales refractarios de cobre sulfuros primarios obteniendo una recuperación del 35,3 %

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar pruebas con distintos tipos de lixiviante y que estos sean amigables con el medio ambiente, a fin de obtener buenas recuperaciones de cobre.
2. Se debe seguir investigando la manera de recuperar estos materiales refractarios a nivel de planta, ya que es un plus en la minería, como recomendación general se deja al estudio la lixiviación con sulfato férrico para aumentar la extracción y además el estudio del efecto de estos reactivos en el orgánico del proceso de extracción por solvente.
3. En la caracterización mineralógica del sólido se recomienda efectuar un análisis más profundo en el reconocimiento y tipificación de especies que perturban el proceso de lixiviación, tales como las gangas, arcillas que aportan finos, coloides e impurezas que consumen ácidos y agentes oxidantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barahona, Rodrigo. (2014). "*Lixiviación en minería Riesgos y acciones preventivas*". Grupo Editorial EMB. Santiago – Chile. Recuperado el 02 de agosto:

<http://www.emb.cl/hsec/articulo.mvc?xid=528&edi=24&xit=lixiviacion-en-mineria-riesgos-y-acciones-preventivas>

Berger, J., Winand, R. (1984). "*Solubilities, densities and electrical conductivities of aqueous copper (I) and copper (II) chlorides in solutions containing other chlorides such as iron, zinc, sodium and hydrogen chlorides*". *Hydrometallurgy*, 12 (1), 61-81.

Broggi, Ivan. (2015). "*Lixiviación fundamentos y aplicaciones*". Recuperado el 15 de julio de 2019 de: <https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/2015/04/16/hola-mundo/>

Davenport, W. G., Schlesinger, M. E., King, M. J., & Sole, K.C. (2011). "*Extractive Metallurgy of Copper*" (5ta ed.). Oxford, UK: Elsevier Ltd.

Direct Industry. (2014). "*The online industrial exhibition*". Recuperado el 13 de Noviembre de 2014, de Ten ova Takraf:

<http://www.directindustry.com/prod/takraf/mobile-bridge-stackers-58547-1519875.html>

Domic Mihovilovic, E. M. (2004). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago de Chile.

Dreier, J. E. (noviembre de 1999). *John E. Dreier Geologist*. Recuperado el 26 de Octubre de 2014, de Copper Leaching: [http://jedreiergeo.com/copper/article1/Chemistry\\_of\\_Copper\\_Leaching.html](http://jedreiergeo.com/copper/article1/Chemistry_of_Copper_Leaching.html)

Enciso Solano, Carlos. (2014). "*Efectos del ácido sulfurico en la extraccion de cobre mediante el metodo de lixiviacion de minerales*". Tesis de grado de la Universidad de Ingeniería, Lima – Perú.

Guiachetti, D. (2011). *Consumo ácido Sulfúrico y cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre*. Obtenido de Repositorio Academico de la Universidad de Chile: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104139>

Ghorbani, Y., Becker, M., Mainza, A., Franzidis, J., & Petersen, J. (2011). *Large particle effects in chemical/biochemical heap leach processes – A review. Minerals Engineering 24*, Págs. 1172-1184.

Hernández Avendaño, Pia. (2013). "*Estudio del equilibrio sólido – líquido de sistemas acuosos de minerales de cobre con agua de mar,*

*aplicado a proceso de lixiviación.* Tesis doctoral de la Universidad de Antofagasta – Chile.

Hernández, P.; Galleguillos, H.; Graber, T.; Flores, E.; Taboada, M. (2012).

*Effect of Seawater on the Solubility and Physicochemical Properties of Acidic Copper Sulfate Solutions.* J. Chem. Eng. Data. 57.

Herreros, O.; Viñals, J. (2007). *Leaching of sulfide copper ore in a NaCl–*

*H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–O<sub>2</sub> media with acid pre-treatment.* Hydrometallurgy, 89 (3–4), 260-268.

Lu, Z. Y.; Jeffrey, M. I.; Lawson, F. (2000). *The effect of chloride ions on the dissolution of chalcopyrite in acidic solutions.* Hydrometallurgy, 56 (2), 189-202.

Millero, F. J.; Graham, T. B.; Huang, F.; Bustos-Serrano, H.; Pierrot, D.

(2006). *Dissociation constants of carbonic acid in seawater as a function of salinity and temperature.* Marine Chemistry, 100 (1–2), 80-94.

Ortiz Martinez, A. (2016) “*Lixiviación ácida de minerales oxidados de cobre (crisocola) con poca disolución de Fe al utilizar KHSO<sub>4</sub>.*”

Ruiz, M. (2007). *Hidrometalurgia.* Departamento de Ingeniería Metalúrgica ed.; Concepción, U. d., Ed. Concepción; p 197.

Sidborn, M., Casas, J., Martínez, J., & Moreno, L. (2003). *Two-dimensional dynamic model of a copper sulphide ore bed. Hydrometallurgy*, 71, págs. 67-74.

Singh, D.; Bromley, L. A. (1973). *Relative enthalpies of sea salt solutions at 0.deg. to 75.deg. Journal of Chemical & Engineering Data*, 18 (2), 174-181.

Wadsworth, M. E. (1986). *Cinética de los procesos en metalurgia extractiva*. Mexico: Trillas.