

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN METALÚRGICA DE LIXIVIACIÓN  
DE MINERALES OXIDADOS DE COBRE DE  
LA MINERA EDUVINO 2 - AREQUIPA**

**TESIS**

Presentada Por:

Bach. Santiago Augusto Vera Montes

Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERU

2 021

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN METALÚRGICA DE LIXIVIACIÓN DE  
MINERALES OXIDADOS DE COBRE DE LA MINERA  
EDUVINO 2 - AREQUIPA**


**TESIS**

Tesis sustentada el día 29 de noviembre de dos mil dieciocho por el bachiller Santiago Augusto Vera Montes, siendo el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE

  
.....  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez


SECRETARIO

  
.....  
Dr. Freddy Felipe Cori Nina

VOCAL

  
.....  
Ing. Daniel Jesús Zévallos Ramos

ASESOR

  
.....  
Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

YO, MATIAS CARLOS VIVAR COLQUICOCHA, en mi condición de asesor, acreditado por resolución de Facultad N° 9131-2024 FAIN/UNJBG, de la tesis titulado "EVALUACIÓN METALÚRGICA DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES OXIDADOS DE COBRE DE LA MINERA EDUVINO 2 – AREQUIPA" presentado por el Bachiller: **Santiago Augusto Vera Montes**, para optar el título de Ingeniero Metalurgista, habiendo cumplido con el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido que es de 16 por ciento. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención del título profesional de **Ingeniero Metalurgista**, consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente documento para que continúe con los trámites respectivos para su publicación.

Firma del asesor

Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

D.N.I. 08622167



Firma del Titulante

Santiago Augusto Vera Montes

D.N.I. 71309520



## **DEDICATORIA**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes me han mostrado el camino hacia la superación y me han inspirado a alcanzar mis sueños. A mis hermanas, Ericka y María, por su constante apoyo y compañía en cada paso de este viaje. Y a mis amigos, por enriquecer mi vida con sus valiosas lecciones y experiencias compartidas. Todo esto ha sido posible gracias a ustedes.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, expreso mi agradecimiento a mis formadores, personas de gran sabiduría que han dedicado su tiempo y esfuerzo para ayudarme a alcanzar el lugar en el que me encuentro hoy. El camino no ha sido sencillo, pero gracias a su incansable deseo de compartir sus conocimientos y a la dedicación que siempre los ha guiado, he logrado importantes metas, como culminar exitosamente mi tesis y obtener con satisfacción mi titulación profesional.

## ÍNDICE

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO I : EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	
1.1. Formulación del Problema:	3
1.2. Justificación e importancia de la Investigación:	3
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.4. Hipótesis:	5
1.5. Variables:	6
1.5.1. Identificación de las Variables	6

1.5.2.	Caracterización de las variables	6
1.5.3.	Definición operacional de las variables	6
1.6.	Limitaciones de la investigación	7
1.7.	Descripción de las características de la investigación	7
<b>CAPÍTULO II: ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO</b>		
2.1.	Antecedentes	8
2.2.	Bases teóricas	11
2.2.1.	Concepto del proceso de lixiviación	11
2.2.2.	Geología en los yacimientos de cobre	12
2.2.3.	Minerales de cobre	15
2.2.4.	Aglomeración del mineral oxidado de cobre	19
2.2.5.	Curado con ácido	22
2.2.6.	Métodos de lixiviación	26
2.2.7.	Reactivos utilizados en la lixiviación	40
2.2.8.	Tipos de soluciones utilizados en la lixiviación ácidos diluidos	44
2.2.9.	Química de la lixiviación de minerales de cobre	45
2.2.10.	Principales reacciones químicas en la lixiviación	50

2.2.11. Factores que influyen en la lixiviación de minerales de cobre	51
2.2.12. Cinética de disolución	58
2.2.13. Concentración y purificación de soluciones	62
2.2.14. Recuperación de metales	67
2.2.15. Importancia de la Ganga	68
2.3. Definición de términos	73
<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO</b>	
3.1. Caracterización del diseño de investigación	78
3.2. Acciones y actividades para la ejecución del proyecto	79
3.3. Materiales e instrumentos	80
3.4. Población y muestra de estudio	80
3.4.1. Caracterización del mineral	82
3.5. Tratamiento de datos	83
3.5.1. Procesamiento para obtención de datos	83
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
4.1. Resultados	85
4.2. Discusión	98

CONCLUSIONES	100
RECOMENDACIONES	101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXO	106

ii  
ii  
ii  
ii

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales minerales de cobre	16
Tabla 2: Clasificación de los minerales de acuerdo a su composición mineralógica	18
Tabla 3: Principales minerales de silicatos, presentes en la ganga	69
Tabla 4: Parámetros de pruebas	79
Tabla 5: Distribución del porcentaje de cobre por malla	85
Tabla 6: Tiempo de molienda con relación al porcentaje pasante m 200 (Tyler)	86
Tabla 7: Variación del pH y la extracción de cobre	86
Tabla 8: Cinética de lixiviación en la extracción del cobre, variando el pH	87
Tabla 9: Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 3	88
Tabla 10: Resultados de las pruebas a un Ph = 3	88
Tabla 11: Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 2,6	89
Tabla 12: Resultados de las pruebas a un Ph = 2,6	89
Tabla 13: Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 2,2	90
Tabla 14: Resultados de las pruebas a un pH = 2,2	90
Tabla 15: Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 1,8	91
Tabla 16: Resultados de las pruebas a un Ph = 1,8	91
Tabla 17: Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 1.6	92
Tabla 18: Resultados de las pruebas a un Ph = 1,6	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sección de un yacimiento porfídico de cobre	13
Figura 2: Aglomeración de partículas con el ácido sulfúrico	21
Figura 3: Procesos unitarios asociados a los principales métodos de lixiviación	27
Figura 4: Relación entre la ley de cobre frente al tamaño de partícula para los diferentes métodos de lixiviación	28
Figura 5: Proceso de lixiviación en pilas, SX, EW.	36
Figura 6: Lixiviación en botaderos.	39
Figura 7: minerales con cobre.	49
Figura 8: Extracciones de cobre experimentales en función del tiempo	62
Figura 9: Equipo mezclador – sedimentador del circuito de extracción	66
Figura 10: Consumo de ácido propio de la ganga en yacimiento de cobre.	71
Figura 11: Mineral oxidado de cobre (Minera Eduvino-2)	81
Figura 12: Pesado de la muestra de mineral.	82
Figura 13: Mineral oxidado de cobre (Minera Eduvino-2)	93
Figura 14: Variación de la molienda de mineral oxidado de cobre	94
Figura 15: Variación del pH y extracción de cobre en la lixiviación de mineral oxidado de cobre.	95
Figura 16: Variación del tiempo de lixiviación y extracción de cobre en la lixiviación de mineral oxidado de cobre	96
Figura 17: Cinética de lixiviación y extracción de cobre	97

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es optimizar los procesos de extracción de cobre del mineral oxidado, analizando diversos parámetros que influyen en la eficiencia de la recuperación. En particular, se ha puesto énfasis en la variación del pH durante el proceso de lixiviación por agitación, y se ha observado una mejora significativa en la recuperación de cobre a pH bajos.

Además de la variación del pH, se han investigado otros factores importantes como el tiempo de lixiviación y su impacto en la eficiencia de la extracción. Los resultados muestran que prolongar el tiempo de lixiviación hasta 12 horas puede aumentar la recuperación de cobre, especialmente a pH más bajos.

La metodología utilizada en esta investigación incluyó la preparación y caracterización del mineral oxidado, seguido de pruebas de lixiviación en diferentes condiciones de pH y tiempo.

Este estudio proporciona una base sólida para mejorar los procesos de extracción en la industria minera, ofreciendo recomendaciones específicas para ajustar los parámetros de lixiviación y lograr una mayor eficiencia en la recuperación de cobre. Los hallazgos también sugieren que implementar un control preciso del pH y del tiempo de lixiviación puede resultar en beneficios económicos y operacionales significativos para las operaciones mineras que tratan con minerales oxidados de cobre.

Palabras clave: Lixiviación, extracción, mineral, concentración, solución impregnada.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work is to optimize the processes of copper extraction from oxidized ore, analyzing various parameters that influence the recovery efficiency. In particular, emphasis has been placed on the variation of pH during the agitation leaching process, and a significant improvement in copper recovery has been observed at low pH.

In addition to pH variation, other important factors such as leaching time and its impact on extraction efficiency have been investigated. The results show that extending the leaching time up to 12 hours can increase copper recovery, especially at lower pH.

The methodology used in this research included the preparation and characterization of the oxidized mineral, followed by leaching tests under different pH and time conditions.

This study provides a solid basis for improving extraction processes in the mining industry, offering specific recommendations to adjust leaching parameters and achieve greater efficiency in copper recovery. The findings also suggest that implementing precise control of pH and leaching time can result in significant economic and operational benefits for mining operations dealing with oxidized copper ores.

**Keywords:** Leaching, extraction, mineral, concentration, impregnated solution.

## INTRODUCCIÓN

Debido al rápido crecimiento de la actividad económica, las previsiones de crecimiento del PIB para 2019 se han revisado al alza y el crecimiento del PIB del país alcanza ahora casi el 4%, entonces podemos decir que la industria minera y metalúrgica es la principal fuente de ingresos de divisas en el contexto socioeconómico. Muchas pequeñas y medianas empresas mineras se dedican a la producción de metales. Dependiendo de la materia prima se utilizan diferentes métodos de procesamiento en función de sus propiedades físicas y químicas.

La extracción de metales a partir de minerales puede llevarse a cabo mediante dos métodos principales: procesos pirometalúrgicos y procesos hidrometalúrgicos. La distinción clave entre ambos radica en las condiciones de operación. Los procesos pirometalúrgicos, realizados en seco, implican altas temperaturas y generalmente se llevan a cabo en hornos. Incluyen etapas como concentración, tostación y reducción, utilizando calor y a menudo coque como agente reductor. En contraste, los procesos hidrometalúrgicos se ejecutan en condiciones húmedas a temperaturas más bajas. Comienzan con la lixiviación del mineral en una solución acuosa, seguida de extracción y precipitación del metal deseado.

La elección entre estos métodos depende de factores como la composición del mineral, consideraciones económicas y ambientales. Ambos enfoques son valiosos en la metalurgia, cada uno con sus propias ventajas y desventajas según las características específicas de los minerales y los objetivos del proceso. En este trabajo consideraremos la minería del cobre con ayuda de la hidrometalurgia; La hidrometalurgia extrae metales mediante operaciones húmedas que tienen lugar en reacciones en fase acuosa y a bajas temperaturas. En general, los minerales obtenidos de la naturaleza no son puro pero mezclado con materiales estériles que forman el pasmo mineral. Estos materiales están presentes en la naturaleza alrededor del propio mineral y no pueden separarse extrayendo el mineral en condiciones económicas y favorables.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Formulación del Problema:**

Considerando el aumento del precio del cobre y la reposición de la demanda, es necesario realizar un estudio en profundidad del proceso productivo para satisfacer esta demanda.

A medida que aumentan los objetivos de producción de cobre y se procesan minerales adecuados en la unidad minera Minera Eduvino 2 - Arequipa, es necesario caracterizar la zona de lixiviación asociada con la operación para evaluar las mejoras del proceso.

Una vez caracterizado el mineral, se pueden obtener nuevas cinéticas de lixiviación del proceso y se pueden proponer otras alternativas que reflejen el comportamiento del proceso, ayudando a los metalúrgicos a mejorar y optimizar el proceso.

#### **1.2. Justificación e importancia de la Investigación:**

El trabajo de investigación se centra en facilitar a un sector específico de la pequeña minería o minería artesanal el acceso a tecnologías adecuadas y eficientes para la extracción de minerales, con el objetivo de lograr una recuperación máxima de cobre por cada

cantidad de mineral procesada. La meta es optimizar el rendimiento económico de estas operaciones. Es crucial destacar que todas las actividades relacionadas con la extracción de minerales se llevan a cabo en estricto cumplimiento de las normas y leyes establecidas por el Estado peruano.

En este contexto, el trabajo de investigación busca proporcionar orientación a los pequeños mineros para la correcta aplicación de las tecnologías apropiadas. Esto implica no solo la introducción de métodos eficientes de extracción, sino también la capacitación y asesoramiento sobre el cumplimiento de las regulaciones gubernamentales. Al promover el uso de tecnologías modernas y sostenibles, se busca mejorar la eficiencia operativa y, al mismo tiempo, garantizar el respeto por las normativas ambientales y de seguridad laboral.

El objetivo final es contribuir al desarrollo sostenible de este sector, permitiendo a los pequeños mineros maximizar la recuperación de cobre de manera responsable y rentable, lo que a su vez se traducirá en beneficios económicos a largo plazo para la comunidad minera y para la economía en general.

Este trabajo de investigación es trascendental ya que tiene como objetivo mejorar las condiciones socioeconómicas de los pequeños mineros de la zona de Eduvino 2, quienes también necesitan participar como empresas formales para contribuir a la economía nacional.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Evaluación de la lixiviación de minerales oxidados de cobre de la Minera Eduvino 2 – Arequipa

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Estudio de la caracterización mineralógica.
- Extracción del cobre lixiviable en función a la variación del pH.
- Cinética de lixiviación de cobre lixiviable.

### **1.4. Hipótesis:**

Sí, es posible mejorar el proceso de lixiviación de minerales oxidados de cobre de la zona Eduvino 2 mediante una optimización de varios factores clave. Una adecuada caracterización del mineral permitirá entender mejor su composición y propiedades, lo que facilitará ajustar las condiciones del proceso. Al variar el pH de la solución lixivante, se puede mejorar la solubilidad del cobre y optimizar las reacciones químicas involucradas. Además, ajustar el tiempo de lixiviación es crucial para maximizar la recuperación del metal sin incurrir en pérdidas de eficiencia.

Controlar la granulometría del mineral garantiza una mayor superficie de contacto, favoreciendo el proceso de disolución. Por último, modificar la concentración de la solución lixivante puede aumentar la capacidad de extracción del cobre, lo que resultará en un proceso más eficiente y rentable.

## **1.5. Variables:**

### **1.5.1. Identificación de las Variables**

- Granulometría
- Dosificación de la solución lixivante
- Concentración de la solución lixivante
- Tiempo de aglomeración
- Tiempo de lixiviación
- Recuperación

### **1.5.2. Caracterización de las variables**

#### **Variables independientes**

- Granulometría
- Dosificación de la solución lixivante
- Concentración de la solución lixivante
- Tiempo de aglomeración
- Tiempo de lixiviación

#### **Variables dependientes**

- Recuperación

### **1.5.3. Definición operacional de las variables**

Estos procedimientos permiten evaluar si las variables son cuantificables, facilitando la identificación de los indicadores necesarios para diseñar los instrumentos de medición adecuados. Además, resultan esenciales para la recolección de datos que permitirán verificar y validar las hipótesis planteadas en la investigación.

## **1.6. Limitaciones de la investigación**

El muestreo del mineral se llevará a cabo en las zonas de Moquegua, una región conocida por su abundancia de minerales oxidados de cobre. Esta área ofrece condiciones ideales para la extracción y estudio de estos minerales, lo que permitirá obtener muestras representativas para un análisis detallado y la posterior optimización del proceso de lixiviación.

## **1.7. Descripción de las características de la investigación**

- **Tipo de Estudio:** Aplicada
- **Nivel de investigación:** Predictivo.

## **CAPÍTULO II**

### **ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

La industria minera se enfrenta al desafío de procesar minerales con leyes cada vez más bajas, lo que significa que contienen menos concentración de los metales deseados, como el cobre. Este fenómeno se debe a la explotación de depósitos minerales de alta ley en el pasado y a la necesidad actual de recurrir a yacimientos de menor calidad para satisfacer la creciente demanda mundial de metales.

En este contexto, la lixiviación se ha convertido en una tecnología de importancia creciente. La lixiviación es un proceso químico en el que se utiliza una solución para extraer los metales valiosos de los minerales. Este método es particularmente útil para tratar minerales complejos y de baja ley, ya que permite recuperar metales valiosos de manera eficiente incluso cuando están presentes en concentraciones relativamente bajas.

Existen varios tipos de lixiviación, incluida la lixiviación en pilas, en tanques y la lixiviación en situ.

Cada uno de estos métodos tiene sus propias aplicaciones y ventajas dependiendo de las características específicas del mineral y las condiciones del sitio. Esta técnica permite el procesamiento económico de materiales que, hasta hace poco, se consideraban desmonte.

La lixiviación implica la extracción selectiva de los componentes valiosos de un mineral a través de la disolución en soluciones acuosas.

Esta tecnología es especialmente valiosa para minerales de baja ley, donde las concentraciones de metales son relativamente bajas. Además, la lixiviación es eficaz para minerales complejos con presencia de impurezas o minerales asociados; De esta forma se pueden eliminar de forma económica materiales que hace poco tiempo se consideraban residuos. (Davenport et al., 2011).

La lixiviación es de hecho uno de los procesos hidrometalúrgicos más importantes en la extracción de cobre en la actualidad. Aproximadamente el 20% de la producción mundial de cobre se obtiene a través de este método.

La lixiviación de cobre se utiliza principalmente para tratar minerales de baja ley o minerales que no pueden ser económicamente procesados por métodos convencionales, como la flotación y la fundición.

Este proceso implica disolver el cobre contenido en el mineral mediante el uso de soluciones ácidas o alcalinas. Estas soluciones percolan a través del mineral, disolviendo el cobre en forma de ion cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), que luego se recupera y purifica mediante una serie de etapas adicionales, según Ghorbani et al. (2011). aunque el concepto básico de lixiviación puede parecer simple, los subprocesos involucrados en estos métodos son realmente complejos y su comprensión total aún no se ha

alcanzado por completo. La lixiviación implica una serie de fenómenos físicos, químicos y termodinámicos que interactúan entre sí de maneras intrincadas.

Algunos de los subprocesos que pueden ocurrir durante la lixiviación incluyen la difusión de los reactivos de lixiviación a través de la matriz mineral, la disolución de los componentes metálicos, la reacción química entre los reactivos y los minerales, la adsorción y desorción de especies químicas en la superficie del mineral, y la migración de los iones disueltos a través de la solución lixivante.

La comprensión completa de todos estos subprocesos y sus interacciones es fundamental para optimizar la eficiencia y la selectividad de la lixiviación, así como para minimizar los impactos ambientales y los riesgos para la salud y la seguridad.

Sin embargo, debido a la complejidad inherente de estos sistemas, todavía hay muchos aspectos que requieren investigación adicional.

Esta confusión surge en parte porque muchos estudios se han centrado en estudiar procesos internos separados.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Concepto del proceso de lixiviación**

La lixiviación se define como el proceso de extraer minerales solubles a través de la acción química de una solución solvente (Iv an B., 2015). Por otro lado, la hidrometalurgia es un campo de estudio centrado en el uso de reacciones químicas en soluciones acuosas para extraer metales de sus minerales y concentrados. Este campo incluye una variedad de procesos y técnicas que facilitan la recuperación eficiente de metales de manera económica y ambientalmente sostenible.

Además de estos métodos de lixiviación, la hidrometalurgia también incorpora técnicas electroquímicas como la electrooxidación, la electrodeposición y la electrorefinación para llevar a cabo procesos específicos, como la purificación y refinación de metales.

Otros procesos incluidos en la hidrometalurgia son la extracción por solventes, el intercambio iónico y la adsorción con carbón activado. Estos métodos se utilizan para separar y recuperar metales de soluciones acuosas mediante procesos de extracción, intercambio de iones o adsorción en superficies específicas.

En resumen, la hidrometalurgia es un campo multidisciplinario que engloba una variedad de técnicas y procesos químicos para la extracción y recuperación de metales a partir de sus fuentes minerales.

Estos métodos brindan soluciones alternativas y especializadas para la separación y recuperación de metales a partir de soluciones acuosas, aumentando la versatilidad de la extracción y el procesamiento de minerales. La extracción con disolventes, el intercambio iónico y la adsorción con carbón activado pertenecen a procesos hidrometalúrgicos.

La combinación de tecnologías de lixiviación en pilas, lixiviación manta y lixiviación in situ ha llevado a importantes avances en el campo de la metalurgia húmeda, particularmente en la extracción de cobre.

Estos métodos permiten el procesamiento eficiente de minerales de baja ley y minerales refractarios, así como la extracción directa de cobre de minerales oxidados y sulfurados. Además, el desarrollo del concentrado de cobre respalda los siguientes pasos. Esto se debe principalmente al desarrollo comercial del proceso SX-EW después de 1968. Constan en general de las siguientes etapas:

- Disolución de cobre por lixiviación.
- Purificación-concentración de solución mediante SX.
- Obtención del metal por EW.

### **2.2.2. Geología en los yacimientos de cobre**

Desde el punto de vista geológico, los depósitos de cobre se clasifican principalmente en tres tipos: estratificados, de sulfuros en bloques y de pórfidos. De estos, los depósitos de pórfido son los más importantes y se destacan como la principal fuente de producción de cobre.

Su importancia radica en su gran volumen, lo que los convierte en una opción económicamente atractiva incluso cuando las concentraciones de cobre son relativamente bajas, cercanas al 0,4%. (Ivan B.,2015).

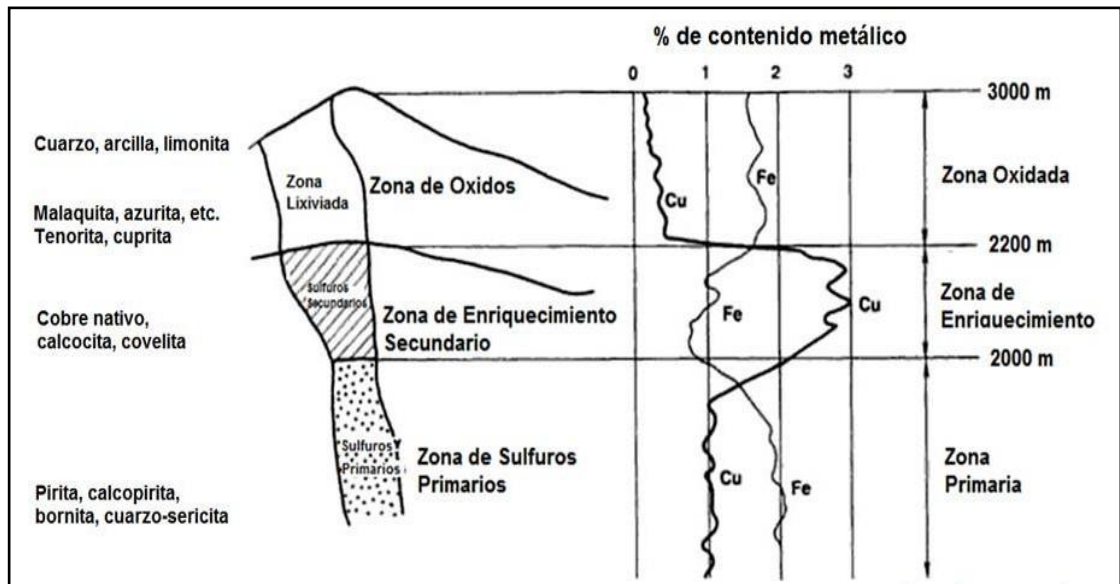


Figura 1. Sección de un yacimiento porfídico de cobre Fuente: (Bartlett, 1998).

Los depósitos de pórfido cuprífero, en su estado inicial de formación, corresponden a intrusiones en las que inicialmente se mineralizan calcopirita y pirita finamente distribuidas por la influencia del oxígeno de las aguas superficiales por su cercanía al medio ambiente, atmósfera y sales disueltas. y el efecto catalítico de las bacterias. En estas condiciones, el cobre, el hierro y otros elementos importantes se oxidan, se disuelven y migran. El transporte de soluciones mineralizadas a través de las rocas provoca reacciones que forman

nuevas especies minerales (sulfuros secundarios), Pueden acumularse cantidades económicamente importantes, formando la llamada "segunda zona de enriquecimiento". Una mayor oxidación de esta zona concentrada puede conducir a la formación de los llamados minerales oxidados. En algunos casos, la erosión juega un papel importante, donde algunas áreas pueden estar ausentes o áreas de composición mixta. (Domic, 2004).

#### **2.2.2.1. Geología de depósitos metálicos en la región de Arequipa**

La región de Arequipa se caracteriza por grandes depósitos de cobre, como el Cinturón de Cobre Cerro Verde del Paleoceno, que también incluye otros depósitos en las provincias de Moquegua y Tacna al sur, como Cuajone, Quelaveco y Toquepala. La región también cuenta con algunos proyectos de pórfido de alta calidad susceptibles de exploración, como Zafranal, y otros proyectos en etapa de exploración, como Alto Quemado, Rosario, Pecoy, Andarai, Clavelinas, Erica, Markahui, etc. Al oeste, a pocos kilómetros de la zona, se encuentra el nuevo depósito de pórfido Tía María, el cual se encuentra en construcción detallada y en implementación. En la costa se encuentran los yacimientos de hierro de Pampa de Pongo, que datan del Paleozoico, Jurásico y Cretácico, muy similares en origen y tamaño a Marcona. Por otro lado, el famoso cinturón aurífero Nazca-Oconiano cuenta con numerosos yacimientos de vetas que contienen cuarzo y oro, entre ellos Capitana, San Juan de Chorunga, Chaparra, Calpa, Ishihuinca, Eugenia, etc. Entre las rocas volcánicas y pórfidos terciarios de la parte más alta de la región se encuentra la zona térmica de metales preciosos Puquio-Cailloma, que incluye las minas de Orcopampa, Chipmo, Cailloma, Ares y Arcata y varios prospectos.

Algunos depósitos limitados de cobre y oro se encuentran al este de los Epitrópicos, lo que indica una mineralización de cobre y oro en curso en la región de Andahuaylas-Yauri. (Cabos, 2009).

### **2.2.3. Minerales de Cobre**

El cobre se combina con una variedad de elementos para formar numerosos minerales. De hecho, se han identificado más de 150 especies minerales que contienen cobre en su composición. Sin embargo, como mencionas, solo unas pocas de estas especies son de importancia económica significativa.

Las especies minerales de cobre de mayor importancia económica suelen ser aquellas que contienen altas concentraciones de cobre y que son relativamente fáciles de extraer y procesar, la más importante de las cuales es la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) (Brown et al., 2010).

La Tabla 1 muestra los minerales más importantes desde el punto de vista económico.

**Tabla 1***Principales minerales de cobre*

Tipo	Minerales comunes	Fórmula química	% Cu teórico
Sulfuros minerales primarios (sulfuros hipogénicos)	Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	36,6
	Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63,3
Minerales secundarios (sulfuros supergénicos)	Calcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$	79,9
	Covelita	$\text{CuS}$	66,5
Cobre nativo	Metal	$\text{Cu}^0$	100
Carbonatos	Malaquita	$\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$	57,5
	Azurita	$2\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$	55,5
Hidroxi-silicatos	Crisocola	$\text{CuOSiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36,2
Hidroxiclорuros	Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	59,5
Óxidos	Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	88,8
	Tenorita	$\text{Cu}_2\text{O}$	79,9
Sulfatos	Antierita	$\text{CuSO}_4\cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$	53,7
	Brocantita	$\text{CuSO}_4\cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	56,2

Fuente: (Davenport et al., 2002).

Por lo general, se encuentran como minerales de sulfuro en la corteza terrestre y como minerales oxidados que se combinan con otros sulfuros metálicos para formar sulfuros complejos, sulfuros complejos, macrosulfuros o sulfuros polimetálicos. (Ortiz, 2012).

Según su composición química se pueden dividir en cuatro grupos (Tabla 2). El primer grupo consta de sulfuros primarios de calcopirita y pórfido y sulfuros secundarios de calcopirita y azurita, que se encuentran comúnmente en depósitos de pórfido de cobre. Todos estos tipos de minerales están asociados en cierta medida con la pirita y, en ocasiones, con el arsénico y el disulfuro de antimonio. (Ortiz, 2012).

**Tabla 2***Clasificación de los minerales de acuerdo a su composición mineralógica*

Mineral	Composición	% Cu
I. Sulfuros		
a) Simples		79,86
Calcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$	
Covelita	$\text{CuS}$	66,48
b) Dobles (Cu/Fe)		
Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63,33
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	34,64
c) Dobles (Cu/As-Sb)		
Enargita	$\text{Cu}_2\text{AsS}_4$	48,42
Tetraedrita	$\text{Cu}_8\text{AsS}_7$	52,07
Estannita	$\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$	29,58
II. Oxidados		
Cuprita		88,82
Tenorita	$\text{Cu}_2\text{O}$	
	$\text{CuO}$	79,70
Azurita	$2\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$	55,30
Malaquita	$\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$	57,60
Crisocola	$\text{CuOSiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36,10
Dioptasa	$\text{CuSiO}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$	57,90
Brocantita	$\text{CuSO}_4\cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	56,20
	$\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	56,20
Calcantita	$\text{CuSO}_4\cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$	25,46
Antlerita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	53,76
Atacamita	$\text{Cu}$	59,50
Cobre matálico		
III. Sulfuros complejos	(Fe – Cu – Pb – Zn)	
IV. Mixtos	Óxidos - Sulfuros	

Fuente: (Llorente, D. E., et al., 1991, p. 63)

#### **2.2.4. Aglomeración del mineral oxidado de cobre**

El proceso de aglomerado-curado es una técnica utilizada en la industria minera para mejorar la eficiencia de la lixiviación de minerales de baja ley o minerales que generan una cantidad significativa de finos durante los procesos de reducción de tamaño. En el proceso de aglomerado, el mineral triturado se mezcla con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) u otro agente lixivante para promover la adhesión de las partículas finas a las partículas gruesas. Esto ayuda a formar aglomerados más grandes y cohesivos que son más permeables a la solución lixivante.

Después del aglomerado, el material se somete a un proceso de curado, donde se permite que los aglomerados formados reaccionen y se endurezcan antes de ser sometidos a la lixiviación. El curado puede realizarse en pilas o en tambor, y suele implicar la aplicación de calor para acelerar la reacción entre el agente lixivante y el mineral. Además de mejorar la eficiencia de la lixiviación, el proceso de aglomerado-curado también puede reducir los costos operativos al minimizar la generación de finos, que pueden causar problemas de manejo y tratamiento de residuos.

La cantidad adecuada de líquido en el proceso de aglomerado es fundamental para lograr la tensión superficial necesaria y facilitar la adhesión de los finos a las partículas más gruesas.

Cuando el mineral se humedece con la cantidad adecuada de líquido, se crea una película delgada de líquido alrededor de las partículas, lo que reduce la tensión superficial entre las partículas y facilita su unión.

La tensión superficial es una propiedad física de los líquidos que se manifiesta en la superficie de contacto entre el líquido y el aire. Cuando las partículas minerales se humedecen con el líquido adecuado, esta película delgada de líquido ayuda a reducir la tensión superficial en la superficie de las partículas, lo que facilita que los finos se adhieran a las partículas más gruesas.

Cuando las partículas en el material aglomerado colisionan entre sí durante el proceso de aglomerado, la película delgada de líquido actúa como un agente de unión, permitiendo que los finos se adhieran a las partículas más gruesas.

Esto ayuda a formar aglomerados más grandes y cohesivos que son más permeables a la solución lixivante y más fáciles de manipular y transportar. En esencia, el ácido sulfúrico actúa como agente aglomerante al mejorar las propiedades superficiales del mineral, permitiendo la formación de aglomerados más grandes y cohesionados.

En el proceso de chancado, que consiste en la reducción de tamaño de los minerales, es posible generar partículas finales que pueden perjudicar la permeabilidad de la pila de minerales.

Esto puede afectar negativamente la capacidad de la solución lixivante para percolar de manera eficiente a través de la pila. Para superar este problema y garantizar una buena percolación y dispersión de la solución lixivante, es común realizar un pretratamiento.

El pretratamiento tiene como objetivo mejorar las características del material chancado para favorecer la eficiencia en la lixiviación. Esto puede lograrse de varias maneras, y una de ellas es el aglomerado-curado, como se mencionó anteriormente. Otros métodos de pretratamiento pueden incluir la adición de agentes aglomerantes, la compactación del material, o incluso el lavado del mineral para eliminar finos indeseados antes de la lixiviación. (Martin L., 2007).

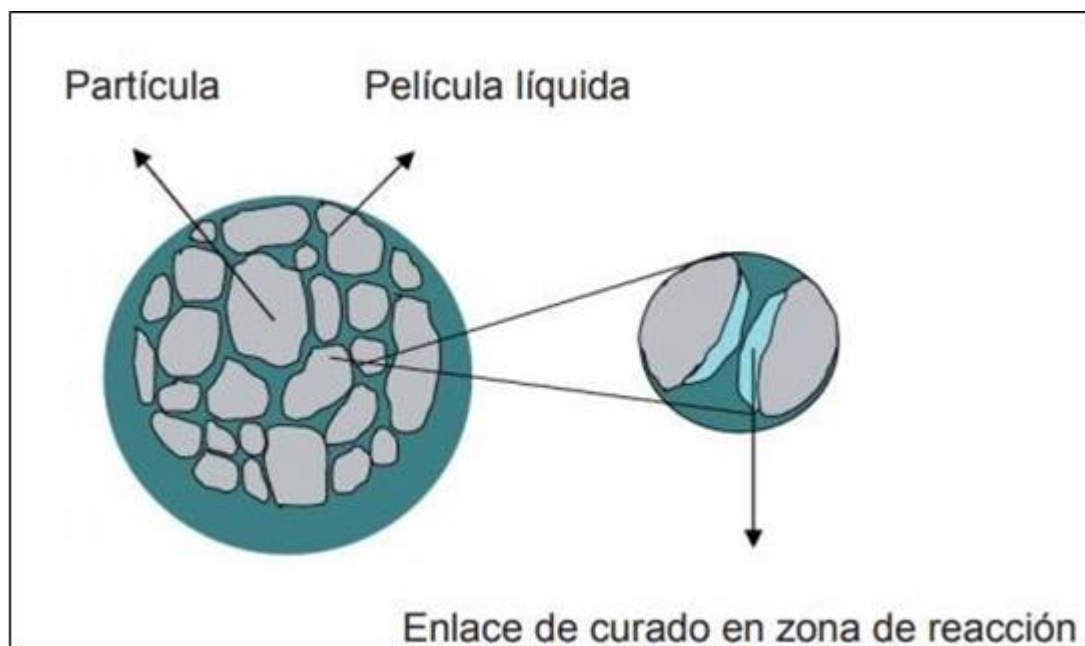


Figura 2: Aglomeración de partículas con el ácido sulfúrico

Fuente: (Martin, 2007).

La aglomeración se utiliza con los siguientes objetivos:

- a) Facilitar el transporte y almacenamiento del material.
- b) Mejorar la permeabilidad del lecho en la pila de lixiviación.
- c) Lograr una distribución homogénea de la solución lixivante a lo largo del lecho.
- d) Proporcionar una estructura física estable en la pila.
- e) Aumentar la cinética de extracción de los metales valiosos.

Características del material aglomerado:

- a) Debe ser adecuado desde el punto de vista químico y fisicoquímico.
- b) Debe poseer una densidad uniforme.
- c) Debe contar con un grado homogéneo de porosidad.
- d) Debe presentar la misma resistencia mecánica.

Para cumplir con estos requisitos, es fundamental garantizar una alimentación constante del material.

### **2.2.5. Curado con ácido**

En el contexto del proceso de aglomerado-curado, el curado con ácido sulfúrico implica la adición de ácido sulfúrico al mineral triturado como un pretratamiento antes de la lixiviación. Este pretratamiento tiene el objetivo de promover la formación de sulfato de cobre en la superficie del mineral.

El ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) reacciona con el mineral de cobre para formar sulfato de cobre ( $CuSO_4$ ) en la superficie de las partículas. Este sulfato de cobre en la superficie del mineral actúa como un agente lixiviable que mejora la eficiencia de la lixiviación del cobre durante el proceso posterior.

El curado con ácido sulfúrico es especialmente útil en minerales de cobre de baja ley o minerales que generan una cantidad significativa de finos durante el proceso de trituración. Al pretratar el mineral con ácido sulfúrico, se promueve la adhesión de los finos a las partículas más gruesas, lo que facilita la formación de aglomerados más grandes y cohesivos durante el proceso de aglomerado.

Además, la formación de sulfato de cobre en la superficie del mineral durante el curado con ácido sulfúrico también puede mejorar la eficiencia de la lixiviación al proporcionar una mayor superficie de contacto entre el mineral y la solución lixiviante.

En resumen, el curado con ácido sulfúrico como pretratamiento en el proceso de aglomerado-curado tiene como objetivo principal promover la formación de sulfato de cobre en la superficie del mineral, lo que mejora la eficiencia de la lixiviación del cobre durante el proceso posterior.

El efecto que produce el curado ácido es variado, siendo lo más importante:

Reduce el tiempo de lixiviación.

- **Sulfatación de los minerales y deshidratación de las gangas:** Durante el proceso de aglomerado-curado, la sulfatación de los minerales implica la formación de sulfatos metálicos en la superficie del mineral, lo que mejora la eficiencia de la lixiviación. La deshidratación de las gangas, por otro lado, se refiere a la eliminación del agua de las impurezas o materiales no deseados en el mineral, lo que puede facilitar su manejo y procesamiento.
- **Homogenización del ácido:** La homogenización del ácido implica mezclar el ácido sulfúrico (u otro agente lixivante) de manera uniforme con el mineral triturado. Esto facilita la sulfatación de los minerales y mejora las características mecánicas del mineral, así como el comportamiento hidráulico general del lecho poroso.
- **Agua como aglomerante y formación de sulfatos metálicos hidratados:** El agua no solo actúa como agente aglomerante para unir las partículas finas y gruesas, sino que también permite la formación de sulfatos metálicos hidratados en la superficie del mineral. Estos sulfatos metálicos hidratados son más solubles en agua y pueden mejorar la eficiencia de la lixiviación.
- **Estabilización de la sílice:** Durante el proceso de aglomerado-curado, la sílice generada por la descomposición de los silicatos de la ganga puede estabilizarse. Esto puede ser importante para mejorar la integridad estructural de los aglomerados y prevenir la

formación de lodos o materiales finos indeseados durante la lixiviación.

En conjunto, estos procesos y características contribuyen a mejorar la eficiencia y la efectividad del proceso de lixiviación en la extracción de metales valiosos de minerales de baja ley o minerales que generan finos durante los procesos de trituración y molienda

La introducción del proceso de aglomerado-curado en los procesos hidrometalúrgicos ha representado avances significativos en términos de mejorar la eficiencia de la lixiviación y la recuperación de metales valiosos, especialmente en minerales de baja ley o minerales con problemas de generación de finos.

Sin embargo, también ha surgido una serie de problemas operacionales específicos que están estrechamente relacionados con las condiciones mineralógicas particulares de cada tipo de mineral. Sin embargo, de manera general, estos problemas se asocian a menudo con la presencia de finos y ultrafinos, es decir, material con un tamaño de partícula inferior a 75 micras. Esto contrasta con la granulometría normalmente considerada en estos procesos, que suele comprender tamaños de alimentación entre 9,5 y 12,7 mm, con contenidos variables de hierro, sílice y arcilla.

La presencia de finos y ultrafinos puede dar lugar a varios desafíos operativos, como la obstrucción de los equipos, la reducción de la permeabilidad de las pilas de lixiviación y la dificultad en la separación eficiente de los componentes valiosos del mineral. Estos finos pueden

generar problemas tanto en la etapa de aglomerado como durante el proceso de lixiviación.

Además, la variabilidad en los contenidos de hierro, sílice y arcilla en los minerales puede afectar la eficiencia de los procesos al influir en la calidad del aglomerado, la percolación de la solución lixivante y otros aspectos operativos.

Estos elementos alteran las reacciones esperadas en los procesos posteriores, lo que resulta en una reducción de la extracción de cobre y un alto contenido de sólidos suspendidos en la solución enriquecida, lo que aumenta los costos operativos.

#### **2.2.6. Métodos de lixiviación**

Estos métodos varían en su aplicación y condiciones específicas de operación, pero todos comparten el objetivo común de disolver el cobre contenido en el mineral mediante la acción química de una solución lixivante.

Cada método tiene sus ventajas y limitaciones, y la selección del método adecuado depende de factores como la naturaleza del mineral, la ley de cobre, la viabilidad económica y las consideraciones ambientales: lixiviación in situ, lixiviación en pilas, lixiviación en pilas, lixiviación TL, lixiviación por percolación (lixiviación en barriles) y lixiviación por mezcla. Estos métodos representan diferentes enfoques para la lixiviación de minerales de cobre, cada uno con sus propias aplicaciones específicas, ventajas y limitaciones.

La selección del método de lixiviación adecuado depende de diversos factores, como la naturaleza del mineral, la ley de cobre, la viabilidad económica y las consideraciones ambientales. Existen seis métodos para la lixiviación de minerales de cobre, lixiviación in situ, lixiviación en botaderos (dump leaching), lixiviación en pilas (heap leaching), lixiviación TL, lixiviación por percolación (vat leaching) y lixiviación por agitación (Ivan B. , 2015).

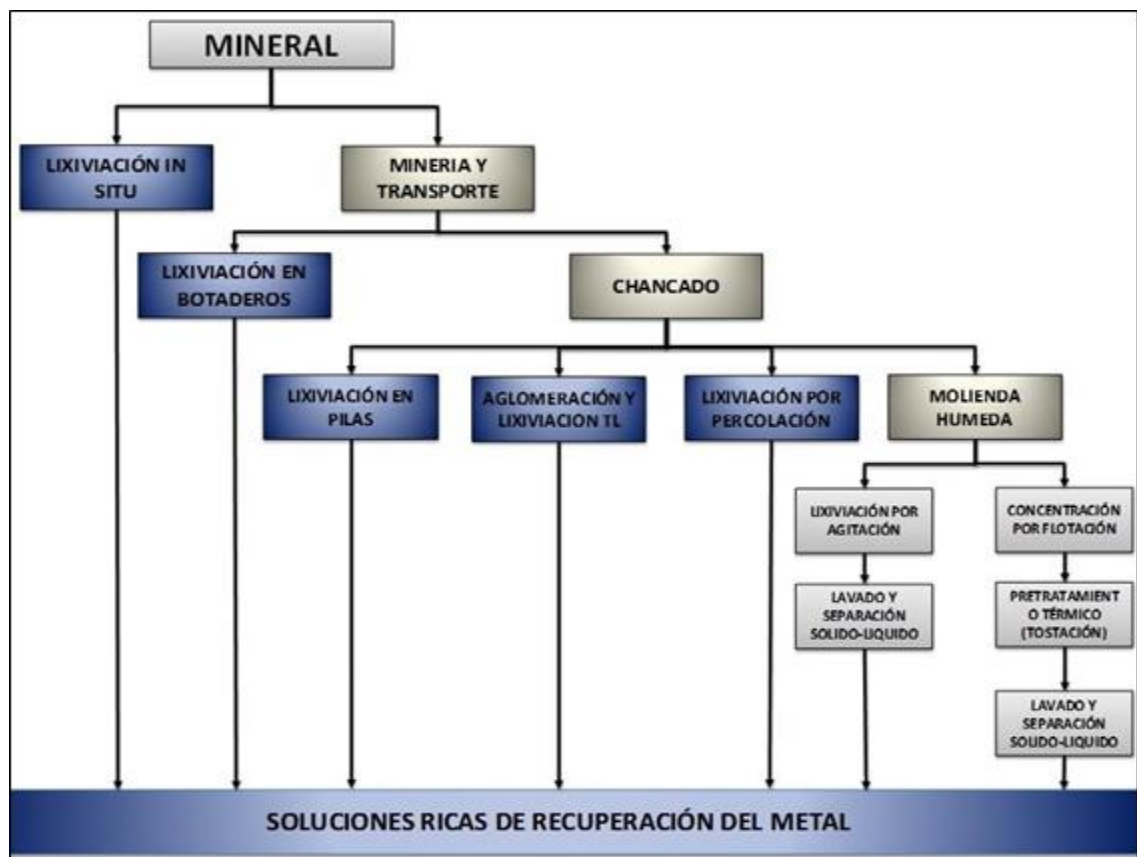


Figura 3: Procesos unitarios asociados a los principales métodos de lixiviación  
Fuente: (Domic, 2004).

Los diversos métodos disponibles para implementar procesos de lixiviación tienen como objetivo lograr el máximo beneficio económico al tiempo que reducen los costos y la complejidad. La elección del método de lixiviación adecuado dependerá en gran medida del equilibrio financiero y deberá tener en cuenta una serie de factores importantes:

- a) Esta es la tasa de recuperación que puede esperar con cada método.
- b) Costos de minería, métodos de minería y métodos de transporte a la fábrica.
- c) Costo de procesos previos como reducción de tamaño, trituración, molienda, clasificación y pretratamiento para aglomeración y/o coagulación.
- d) La relativa facilidad y costo de los reactivos para solubilizar las especies deseadas.

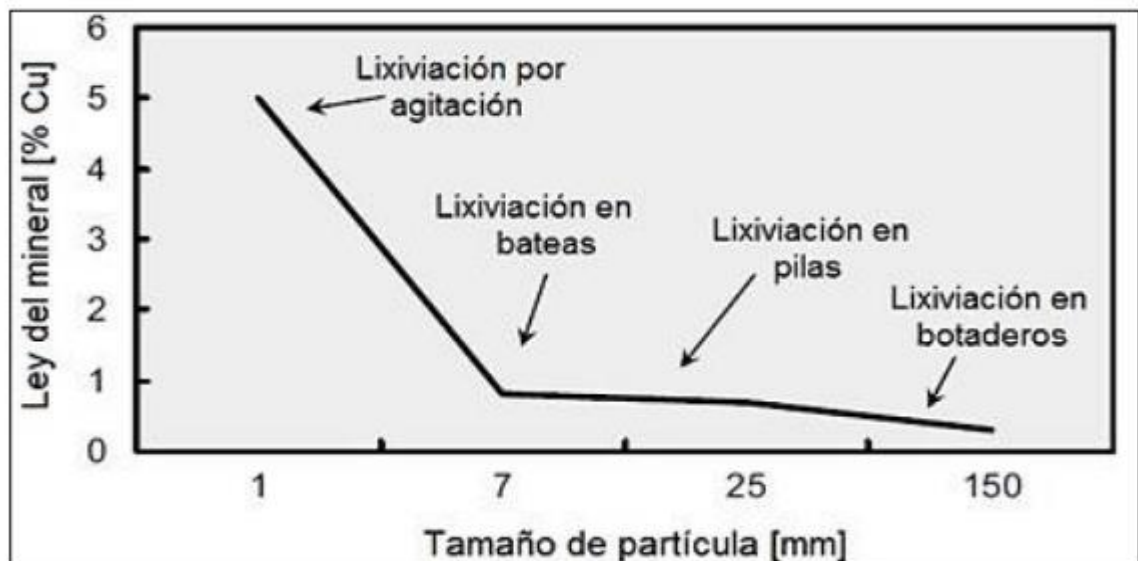


Figura 4: Relación entre la ley de cobre frente al tamaño de partícula para los diferentes métodos de lixiviación

Fuente: (Davenport, Schlesinger, King, & Sole, 2011)

Otra clasificación más generalizada puede ser la siguiente:

a) Lixiviación de menas:

- Menas de alta ley.
- Menas de baja ley.

b) Lixiviación de concentrados productos de tratamiento:

- Concentrados de flotación.
- Colas de proceso.
- Calcinas.
- Lodos Anódicos.

#### **2.2.6.1. Lixiviación por agitación**

Consiste en una secuencia de operaciones específicas en la lixiviación de minerales, conocido como lixiviación en estanques agitados. Inicialmente, se realiza la trituración y molienda del mineral en húmedo, buscando reducir el tamaño de las partículas a una granulometría inferior a 100 mallas Tyler. La pulpa resultante de este proceso se somete a la lixiviación en estanques agitados, donde la mezcla de mineral molido y solución lixivante, generalmente con ácido sulfúrico, interactúa de manera eficiente gracias al constante movimiento en los estanques agitados. Este método opera de manera continua, y tras el tiempo necesario de lixiviación, la pulpa es filtrada para separar la fase líquida de la sólida.

Como resultado, se obtienen soluciones clarificadas con concentraciones de cobre típicamente entre 5 y 15 gramos por litro, representando un enfoque efectivo para la extracción de metales, como el cobre, con un énfasis en la optimización de la eficiencia del proceso mediante el control de la granulometría y la implementación de estanques agitados. (Cortez, 2012).

Este sistema es adecuado para minerales oxidados cuyas especies de cobre tienen una cinética de disolución rápida y cuya ley es superior a Cobre 5% por altos costos de inversión y operación.

Las tasas de extracción de cobre suelen superar el 90%, principalmente debido a la molienda previa del mineral, que favorece la cinética de disolución de las especies oxidadas (Cortez, 2012).

La lixiviación mixta se lleva a cabo en tanques cilíndricos fabricados con una variedad de materiales, como madera, metal, fibra de vidrio y acero inoxidable. Estos tanques están recubiertos con materiales como gaulo, epoxi u otros recubrimientos para evitar la corrosión causada por las soluciones lixiviantes. El fondo del tanque puede ser plano o cónico, siendo el fondo cónico más ventajoso ya que ayuda a mantener todas las partículas en suspensión de manera más efectiva.

Para evitar la precipitación de partículas y, por consiguiente, el efecto de vórtice en el interior del tanque, se instalan deflectores o baffles. Estos deflectores son estructuras internas que se colocan estratégicamente en el tanque para romper el flujo de la solución lixiviantes y evitar la formación de corrientes de vórtice. Usualmente, se instalan entre 4 y 6 deflectores, distribuidos a lo largo de la altura del tanque, para asegurar una mezcla adecuada de la solución lixiviantes con el material de alimentación.

La presencia de deflectores ayuda a mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación mixta al promover una mezcla más uniforme de la solución lixiviantes con el material de alimentación y evitar la segregación o sedimentación de las partículas en el fondo del tanque. Esto garantiza una extracción más completa de los componentes valiosos del mineral y una mayor eficiencia del proceso en general.

Con respecto a la agitación, esta se logra de dos maneras:

- a) Mecánica: por hélices, paletas o turbinas.
- b) Neumática: por air-lift o sistemas pachuca (reactores).

Como se puede observar existen diferentes mecanismos para la lixiviación de minerales y es necesario distinguir y elegir el método más adecuado.

La lixiviación por agitación es un proceso eficiente que implica la rápida disolución de partículas finas, generalmente de tamaño entre 90% y 75  $\mu\text{m}$ . Este método se aplica generalmente a concentrados de óxido de cobre o productos recocidos obtenidos de un proceso de recocido. La agitación se realiza en soluciones ácidas altamente concentradas, cuya cantidad es de 50 a 100 kg de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  por metro cúbico.

Lo distintivo de la lixiviación por agitación es su velocidad notable en comparación con otros métodos lixiviantes. Mientras que la lixiviación in situ, en pilas y en terreros puede extenderse a lo largo de varios años, y la lixiviación en tanques puede demorar días, la lixiviación

por agitación logra su efecto en un tiempo significativamente más corto, generalmente de 2 a 5 horas.

Las razones para esta rápida velocidad de lixiviación son:

- a) El tamaño fino de las partículas sólidas.
- b) La rápida saturación de la solución de lixiviación de la superficie de mineral como resultado de la agitación vigorosa.

Ventajas de la lixiviación por agitación:

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

Desventajas de la lixiviación por agitación:

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

Una característica especial de los sistemas de lixiviación con agitación es que se pueden utilizar varios factores para mejorar la cinética, por ejemplo:

- a. Temperaturas de hasta 523,15 K (250 °C)
- b. Agitación intensa
- c. Presión de gases controlada
- d. Uso de reactivos exóticos y oxidantes altamente agresivos.

### **2.2.6.2. Lixiviación en pilas**

El proceso de lixiviación en pilas consiste en rociar o verter una solución lixivante (generalmente una solución ácida o alcalina) sobre la pila de mineral. Esta solución lixivia a través del mineral, disolviendo los metales valiosos presentes en él. La solución que se filtra a través de la pila, conocida como lixiviado, contiene los metales disueltos y otros iones.

Posteriormente, de que el lixiviado ha interactuado con el mineral en el proceso de lixiviación, se recoge y se somete a procesos adicionales para separar y recuperar los metales deseados. Estos procesos pueden incluir la precipitación de los metales en forma de compuestos sólidos o la extracción por solventes para separar selectivamente los metales de la solución lixivante.

La lixiviación en pilas es una técnica comúnmente utilizada en la extracción de metales como oro, cobre y uranio. Es particularmente efectiva para tratar minerales de baja ley que no serían económicamente viables de procesar mediante métodos convencionales, como la fundición o la flotación. La lixiviación en pilas es rentable debido a su capacidad para procesar grandes cantidades de mineral a bajo costo, utilizando soluciones lixiviantes relativamente simples y de bajo costo.

Después de la lixiviación en pilas, el lixiviado se recoge en sistemas de drenaje y se transporta a plantas de procesamiento adicionales

donde se llevan a cabo los procesos de recuperación de metales. Estos procesos pueden incluir la precipitación química para separar los metales de la solución, la adsorción en resinas o carbón activado, o la extracción por solventes para extraer selectivamente los metales de interés. Una vez recuperados los metales, el lixiviado se trata para su disposición final o se recicla para su reutilización en el proceso de lixiviación.

Antes de la precipitación, los minerales deben triturarse hasta alcanzar un tamaño de partícula suficiente para garantizar una lixiviación rápida y óptima; normalmente se utilizan tamaños de partícula de  $-1/4"$  a  $-3/4"$ .

La selección de un tamaño de partícula apropiado durante el proceso de lixiviación en pilas depende de los minerales a tratar y luego requiere pruebas para determinar el tamaño de partícula óptimo. (Fredy E. Cortez 2012).

Una vez que los minerales se hayan pegado, haga una pila, asegúrese de que el material esté distribuido uniformemente y déjelo reposar durante unos días. Este período de descanso se llama endurecimiento y permite que el óxido existente se sulfate. Posteriormente el compost se riega con lixiviados mediante aspersores o sistemas de riego por goteo a razón de 5 a 40 l/h/m<sup>2</sup>. Para minerales oxidados, el riego suele ser continuo.

Por otro lado, para minerales mixtos o sulfurados se utilizan sistemas de riego continuo que utilizan pequeños volúmenes de solución para aumentar la concentración de cobre en el efluente. (Cortez, 2012)

Si la operación utiliza un circuito de solución cerrado, se realiza un ciclo continuo entre el paso de recuperación de cobre (por ejemplo, extracción por solvente y circuito de regeneración eléctrica) y la celda de electrólisis. Esto tiene ventajas en cuanto a la cantidad de solución a tratar y al consumo neto de ácido. Un sistema operativo típico para esto se muestra en la Figura 5.

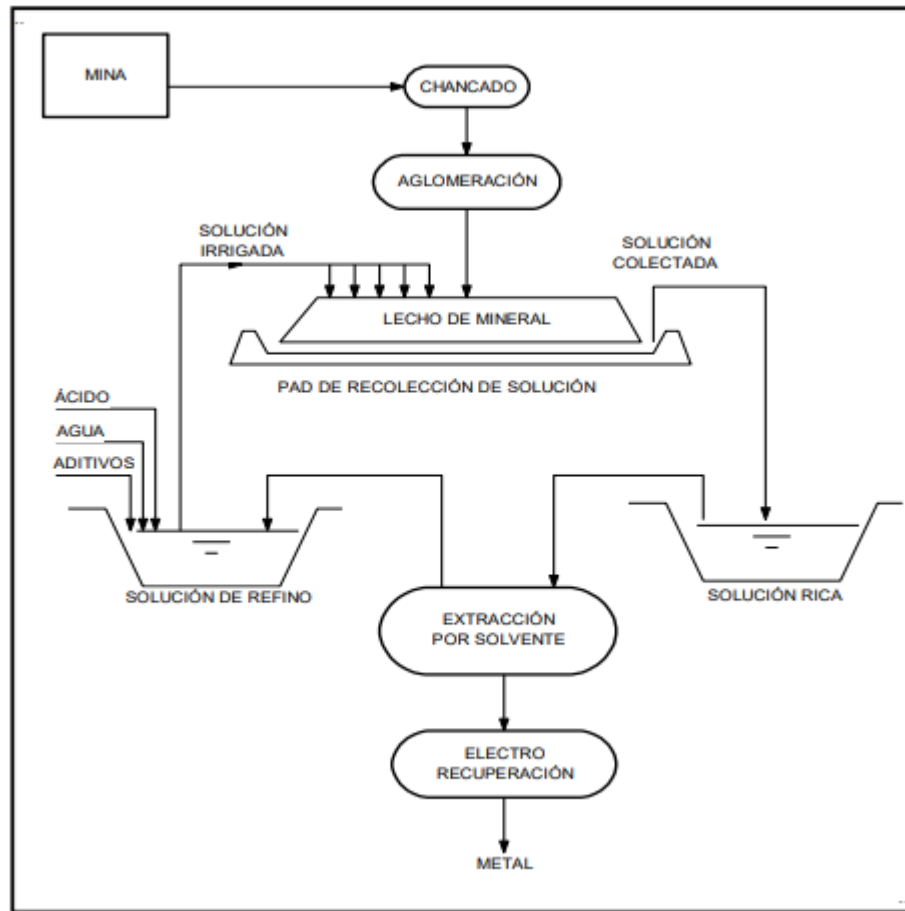


Figura 5: Proceso de lixiviación en pilas, SX, EW.

Fuente: (Cortez 2012).

La altura del pilote es un factor determinante importante y su selección depende de la permeabilidad del pilote, la aireación del sistema y la concentración esperada de la solución. A veces, las columnas más pequeñas recuperan más, pero requieren más área de columna, lo cual es importante cuando el espacio es limitado.

Además, existen límites para las alturas de pilotes alcanzables según el equipo utilizado y la estabilidad de la pendiente.

Según el tipo de funcionamiento, las baterías se pueden dividir en dos tipos: estáticas y dinámicas:

**a) Pila Dinámica:** significa que los materiales existen en una pila en diferentes etapas del ciclo de procesamiento. Esto implica reciclar continuamente la misma plataforma, retirar el mineral residual de la plataforma y almacenarlo en un vertedero para dejar espacio para cargar mineral fresco. Con este método, se requiere muy poco terreno, pero la alfombra debe ser muy fuerte para permitir el movimiento continuo del material a medida que se carga o descarga desde diferentes lugares.

**b) Pila Estática:** consiste en someter todos los minerales recolectados en la plataforma a diferentes etapas del ciclo de tratamiento (solidificación - lixiviación – reposo – lavado) al mismo tiempo. Las tasas de producción son variables y se deben combinar diferentes ciclos de lixiviación para mantener las condiciones de alimentación para la extracción con solventes.

Los métodos de operación anteriores deben combinar uno de los siguientes métodos de construcción:

**a) Pila Permanente:** En esta configuración, los minerales se depositan en la planta y cuando se completa el ciclo de procesamiento, se

retiene y puede usarse como base sobre la cual se recolecta otra pila de minerales o simplemente se descarta.

- b) Pila Renovable:** En este caso, los minerales se cargan en pilas de mineral y, después del procesamiento, los fragmentos se retiran y se entierran en vertederos y se reemplazan con mineral fresco. Cabe señalar que las baterías dinámicas siempre son renovables.

Otros factores que afectan el rendimiento de la pila (y por lo tanto deben gestionarse eficazmente) son el flujo de riego y la composición de la solución de lixiviación utilizada. Cabe recordar que la solución contiene agentes lixiviantes que atacan a los minerales y luego actúan como portadores de los productos de la reacción, especialmente las especies metálicas de interés.

### **2.2.6.3. Lixiviación en Botaderos**

Cuando los mineros extraen principalmente de tajos abiertos, los desechos mineralizados de subrasante (menos del 0,4%) o de sobrecarga se entierran en vertederos de baja permeabilidad y luego se lixivian, utilizando el término "lixiviación de vertederos" (o "lixiviación de vertederos"). La mayoría de los vertederos se construyen en lugares adecuados cerca de las minas. (Zabala, 2013).

El tamaño del mineral utilizado para la fundición es el mismo que para la minería (ROM), excepto que el tamaño de los trozos más grandes de mineral se reduce a aproximadamente 10 a 20 cm (4 a 8

pulgadas). Este tipo de proceso no requiere inversión en minería ni transporte, lo que lo convierte en un proyecto económicamente atractivo.

La tasa de recuperación de cobre es del 40% al 60% después de aproximadamente 3 años de uso. (Zabala, 2013).

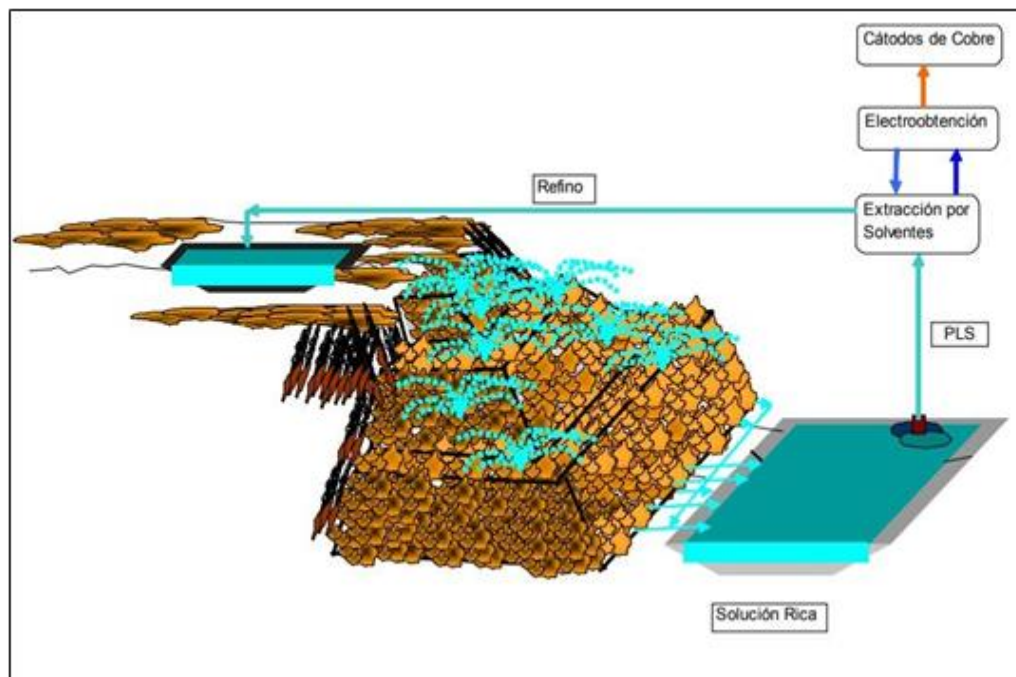


Figura 6: Lixiviación en botaderos.

Fuente: (Zabala, 2013)

#### 2.2.6.4. Lixiviación por Percolación o en Bateas

Por ahora, y desde hace algún tiempo, este tipo de lanzamientos son de naturaleza histórica, no porque sean menos eficientes que los

lanzamientos en montón, sino porque representan un nivel adicional de inversión para tareas más complejas.

Este tipo de lixiviación se suele realizar en tanques o cubetas de hormigón armado, madera, acero inoxidable, hierro o fibra de vidrio con un contenido mineral moderado (1/2 a 1/4); Se permite que el estanque circule durante un período de tiempo (tiempo de contacto) y finalmente se descarga (en un sistema intermitente) o se transfiere a un estanque adyacente (en un sistema continuo). (Zabala, 2013).

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

Los reactivos utilizados para la lixiviación de minerales deben cumplir ciertos criterios importantes para garantizar una extracción eficiente y efectiva de los metales deseables. En el caso específico de la lixiviación de minerales de cobre, estos reactivos deben ser fácilmente recuperables y capaces de disolver rápidamente los minerales deseados, preferiblemente sin afectar a los minerales enlazados que no contienen el metal objetivo.

Al seleccionar los reactivos lixiviantes adecuados, se busca optimizar la eficiencia del proceso de lixiviación, garantizando al mismo tiempo la recuperación máxima del metal deseado y minimizando los impactos ambientales y los costos operativos.

Los disolventes comúnmente utilizados para la lixiviación incluyen tanto soluciones ácidas como alcalinas, así como algunas sales.

Entre estos, el ácido sulfúrico es uno de los solventes más ampliamente utilizados en la industria de la lixiviación, especialmente para la extracción de metales como el cobre. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el ácido sulfúrico puede generar problemas adicionales, como la generación de calor excesivo y la corrosión de equipos, que deben ser abordados adecuadamente en el diseño y la operación de los procesos de lixiviación. Además, otros disolventes como las soluciones alcalinas y algunas sales también pueden ser utilizados según las características específicas del mineral y los requisitos del proceso.

La disolución de minerales oxidados, como los minerales de cobre oxidado y los carbonatos metálicos (como la azurita y la malaquita), requiere la presencia de agentes oxidantes para facilitar el proceso de lixiviación. Entre los agentes oxidantes más utilizados se encuentran los iones de oxígeno y hierro.

Para la lixiviación de minerales naturales de cobre y carbonatos metálicos como la azurita y la malaquita, se suelen emplear soluciones alcalinas. Estas soluciones pueden incluir hidróxido de amonio con oxígeno o carbonato de amonio con hidróxido de amonio.

La presencia de una base alcalina ayuda a mejorar la solubilidad de los minerales y facilita su disolución en la solución lixivante.

Una ventaja significativa de utilizar una solución de lixiviación alcalina para minerales que contienen carbonatos (como la calcita y la dolomita) es que la solución alcalina no corroe los minerales presentes en los relaves. En contraste, el uso de lixiviación ácida puede conducir a una mayor corrosión de los minerales en los relaves, lo que resulta en una mayor pérdida de ácido y en un mayor consumo de reactivos.

En resumen, el empleo de soluciones alcalinas en la lixiviación de minerales oxidados y carbonatos metálicos ofrece ventajas como la prevención de la corrosión de los minerales de relaves y una mayor eficiencia en el proceso de lixiviación. Esto contribuye a una operación más rentable y sostenible en la extracción de metales valiosos.

Cuando el cobre se lixivía con una solución alcalina que contiene amoníaco, el cobre puede precipitar en forma de óxido de cobre (CuO) al calentar la solución. Este proceso se conoce como precipitación térmica del cobre.

Durante la precipitación térmica, el amoníaco (NH<sub>3</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presentes en la solución se eliminan, ya que son liberados como gases.

En general, la lixiviación implica el uso de un solvente líquido para disolver sustancias solubles mezclándolas con sólidos insolubles.

Es una operación de separación industrial basada en transferencias de masa. El disolvente puede ser agua, una solución química o un disolvente orgánico. La extracción de metales a partir de minerales es un tipo de lixiviación metalúrgica que utiliza disolventes líquidos para disolver selectivamente metales solubles y separarlos de las impurezas minerales. Realizado en ambiente oxidante, neutro o reductor. Existen los siguientes sistemas para disolver metales:

- a) Lixiviación ácida - Lixiviación con ácido sulfúrico concentrado, lixiviación con ácido sulfúrico diluido y oxígeno, lixiviación con ácido clorhídrico, lixiviación con ácido nítrico, ácido férrico y ácido tiónico.
- b) Lixiviación alcalina - incluye lixiviación de amoníaco, hidróxido de sodio, cianuro de sodio, sulfuro de sodio, etc.
- c) Lixiviación neutra - enjuague con tiosulfato de sodio y cloro gaseoso.
- d) Lixiviación por electrooxidación.
- e) Lixiviación oxidante con oxígeno a presión en autoclaves.
- f) Lixiviación bacteriana o Lixiviación férrica combinada con lixiviación bacteriana.

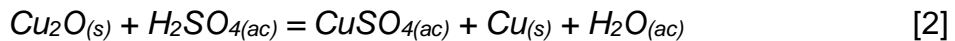
La lixiviación se puede aplicar fácilmente a varios tipos de minerales oxidados y minerales sulfurados utilizando bacterias para el enriquecimiento secundario. Se pueden procesar minerales, relaves o concentrados. Para los minerales más utilizados, las operaciones de lixiviación se producen en bandejas, pilas, pilas o in situ. Para residuos y concentrados, esto suele hacerse mediante agitación.

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

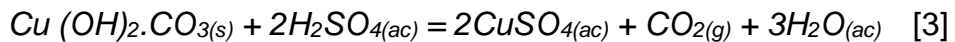
**Malaquita:**



**Cuprita:**



**Tenorita:**



**Calcita:**



### 2.2.8. Tipos de soluciones utilizados en la lixiviación Ácidos diluidos

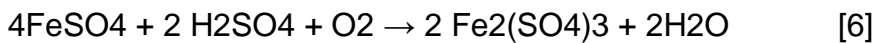
Para minerales oxidados es suficiente la ausencia de una capa de calcita o dolomita. El ácido más utilizado es el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, disponible en concentraciones del 2 al 10% y el menos costoso. Utilizado en tanques de lixiviación y mezcla de suelos. (Ortiz, 2012).

**Sulfato férrico en solución ácida (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):** Además de minerales carbonatados como la ganga, también se utiliza para sulfuros y óxidos de cobre.

Los sulfuros se oxidan con el sulfato férrico:



El sulfato ferroso reacciona con el oxígeno del aire en presencia de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para reducir el sulfato ferroso:



**Soluciones alcalinas amoniacales con carbonato de amonio:** se utiliza para minerales de hongos que son fácilmente solubles en ácido. El cobre se disuelve para formar el complejo [Cu<sub>2</sub>(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>CO<sub>3</sub>], que al calentarse libera NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>, quedando el cobre como óxido o como polvo elemental, convirtiéndose en gas (Ortiz, 2012).

La minería económica del cobre requiere el procesamiento de minerales de baja ley utilizando solventes especiales, ya que los minerales ricos en cobre causan dificultades de lixiviación porque:

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

### **2.2.9. Química de la lixiviación de minerales de cobre**

Los minerales de óxido de cobre se disuelven rápidamente en ácido sulfúrico diluido. Los minerales de óxido de cobre más fácilmente alcalinizables son los sulfatos (calcopirita) y los sulfatos alcalinos (ironita y azurita), seguidos de los carbonatos (malaquita y azurita), acerita y aquerita. Los sulfatos de cobre como la calcocita son altamente solubles en ácido sulfúrico diluido y se disuelven rápidamente en presencia de

este ácido. Los sulfatos alcalinos como la ironita y la azurita también se lixivian con relativa facilidad en ácido sulfúrico diluido.

Los carbonatos de cobre, como la malaquita y la azurita, también son susceptibles a la lixiviación en ácido sulfúrico diluido, aunque su velocidad de disolución puede ser menor en comparación con los sulfatos.

Otros minerales de óxido de cobre, como la acerita y la tenorita, también pueden ser lixiviados con ácido sulfúrico diluido, aunque a una velocidad más lenta en comparación con los sulfatos y carbonatos.

En general, la disolución de minerales de óxido de cobre en ácido sulfúrico diluido es un proceso eficaz y comúnmente utilizado en la industria para la extracción de cobre de minerales oxidados. La selección del método de lixiviación y la concentración del ácido sulfúrico dependen de varios factores, incluida la composición mineralógica del mineral, la velocidad de disolución requerida y las condiciones específicas de la planta de procesamiento.

Por otro lado, la cuprita, que es un mineral de óxido de cobre, requiere la presencia de un oxidante para disolverse completamente. Esto se debe a que la cuprita es menos soluble en ácido sulfúrico diluido en comparación con otros minerales de óxido de cobre, como los sulfatos y los carbonatos. Por lo tanto, para lixiviar cuprita completamente, se suele agregar un oxidante al ácido sulfúrico diluido para mejorar su capacidad de disolver este mineral.

Además, la cinética de lixiviación del silicato de cobre, que es otro tipo de mineral de cobre, es generalmente más lenta en comparación con los minerales de óxido de cobre.

Esto significa que el proceso de disolución del cobre en forma de silicato puede ser más lento y requerir condiciones específicas para lograr una extracción eficiente del metal.

En cualquier sistema de lixiviación, es común que ocurra la dilución simultánea con otras impurezas presentes en el mineral. Esto puede conducir a la formación de una solución poliiónica que contiene múltiples iones metálicos y otros componentes. Antes de poder recuperar el cobre de esta solución, es necesario purificarla para separar y eliminar las impurezas no deseadas.

La purificación de la solución lixiviantes se puede llevar a cabo mediante una variedad de métodos, como la precipitación selectiva de los metales indeseables, la extracción por solventes para separar los metales de interés, o la adsorción en resinas específicas. Estos procesos ayudan a obtener una solución pura de cobre que luego puede ser tratada para recuperar el metal de manera eficiente y rentable.

En algunos casos, los productos de la propia reacción de lixiviación pueden convertirse en impurezas nocivas. Este es el caso de la atamanita, que libera iones de cobre, lo que puede causar problemas

en la extracción de cobre de la solución de lixiviación. Otro ejemplo es la lixiviación. Malaquita de silicio.

La malaquita de sílice es uno de los minerales oxidados más comunes, tiene una tasa de lixiviación relativamente lenta y produce dióxido de silicio coloidal como producto de lixiviación. Este silicio puede causar serios problemas en su sistema SX.

Los minerales de sulfuro de cobre son generalmente insolubles en ácido sulfúrico diluido a menos que haya un agente oxidante presente en la solución. Esto se debe a que los sulfuros de cobre son más estables y menos reactivos que los óxidos y carbonatos de cobre. Incluso cuando se añade un agente oxidante, la velocidad de lixiviación de los minerales de sulfuro de cobre puede ser bastante lenta a menos que las condiciones oxidantes en el sistema sean lo suficientemente fuertes.

Los iones de oxígeno y hierro son los oxidantes más comúnmente utilizados en la lixiviación de minerales de sulfuro de cobre. Estos oxidantes facilitan la oxidación de los sulfuros de cobre, convirtiéndolos en especies solubles que pueden ser lixiviadas en la solución.

La presencia de iones de oxígeno y hierro en la solución lixiviantes promueve la formación de especies como el ion cúprico ( $\text{Cu}^{2+}$ ), que son más solubles y pueden ser disueltas más fácilmente en la solución ácida.



Figura 7: minerales con cobre.

Fuente: <https://es.slideshare.net/iessuel/la-parte-slida-de-la-tierra-3-minerales-importantes>.

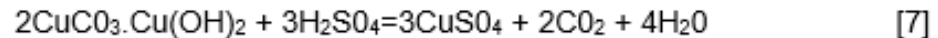
Es importante destacar que la concentración y disponibilidad de los agentes oxidantes en la solución lixiviantes son factores críticos que afectan la velocidad y eficiencia de la lixiviación de los minerales de sulfuro de cobre. Por lo tanto, es necesario controlar cuidadosamente las condiciones de lixiviación, incluyendo la concentración de oxidantes y otros parámetros como la temperatura y el pH, para optimizar el proceso y maximizar la recuperación del cobre.

### 2.2.10. Principales reacciones químicas en la lixiviación

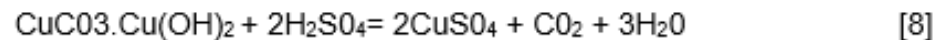
Entre las principales reacciones químicas de la lixiviación de minerales oxidados se tiene:

a. Disolución de minerales oxidados de cobre:

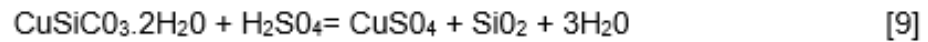
**Azurita:**



**Malaquita:**



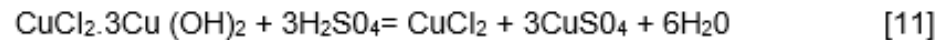
**Crisocola:**



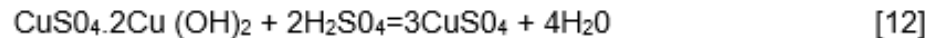
**Tenorita:**



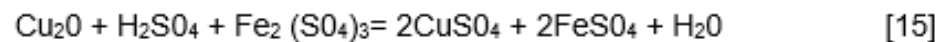
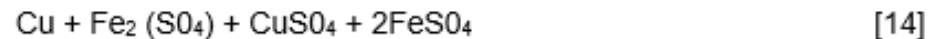
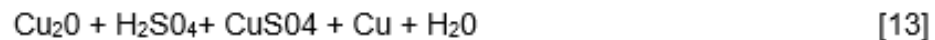
**Atacamita:**



**Antlerita:**



**Cuprita:**



### 2.2.11. Factores que influyen en la lixiviación de minerales de cobre

Para realizar la lixiviación del cobre, así como de otros metales, es crucial tener en cuenta una serie de factores que pueden influir en la eficiencia y el éxito del proceso.

Teniendo en cuenta estos factores, se puede diseñar y operar un proceso de lixiviación eficiente y rentable para la extracción de cobre u otros metales a partir de minerales oxidados, sulfurosos u otros tipos de mineralización.

**a) Naturaleza del mineral:** La lixiviación depende en gran medida de las propiedades físicas y químicas del mineral. La composición mineralógica y la actividad del mineral son factores críticos que influyen en la eficacia de la lixiviación. Por ejemplo, un alto contenido de calcio en el mineral puede hacer que el consumo de ácido sea antieconómico, ya que el calcio puede reaccionar con el ácido y consumirlo. Del mismo modo, un alto contenido de sílice en el mineral puede hacer que sea resistente a la acción de los solventes, dificultando su disolución. Estos factores deben considerarse al seleccionar el método de lixiviación adecuado y al diseñar las condiciones operativas del proceso. (Cortez, 2012).

**b) Tamaño de partícula:** La trituración del mineral antes de la lixiviación es crucial para facilitar el contacto entre el solvente y el mineral, así como para permitir una separación eficiente del solvente en un tiempo razonable. La reducción del tamaño de partícula aumenta la superficie de contacto entre el mineral y el solvente, lo que mejora la cinética de la reacción de lixiviación y, por lo tanto, aumenta la eficiencia del proceso. Un tamaño de partícula adecuado es fundamental para optimizar la velocidad y la recuperación del metal deseado durante la lixiviación.

La granulometría del mineral está en función de:

- El tipo de mineralización.
- Porosidad del mineral.
- Forma de distribución del mineral.
- Porcentaje de finos producidos en el chancado.

Los minerales densos tienden a absorber el lixivante más lentamente que los minerales porosos.

Esto se debe a que los minerales densos tienen una estructura más compacta y menos porosidad, lo que limita la capacidad del lixivante para penetrar en el interior del mineral y reaccionar con los componentes deseados.

En contraste, los minerales porosos tienen una mayor porosidad y una estructura más abierta, lo que facilita la entrada del lixivante y acelera la velocidad de lixiviación.

En resumen, la velocidad y eficiencia de la lixiviación pueden verse afectadas por la densidad y porosidad del mineral, así como por el tamaño de grano. Estos factores deben tenerse en cuenta al diseñar y operar un proceso de lixiviación para garantizar una extracción eficiente de los metales valiosos del mineral.

**c) Concentración del disolvente:** El consumo de ácido es otro factor crucial que afecta tanto la eficiencia como el costo del proceso de lixiviación. El ácido es uno de los reactivos principales utilizados en muchos procesos de lixiviación ácida para disolver los metales de interés del mineral.

Es esencial encontrar el consumo óptimo de ácido en cada etapa del proceso de lixiviación. Un consumo excesivo de ácido puede aumentar significativamente los costos operativos, ya que el ácido es un renglón de gasto importante en la industria de la lixiviación.

Por otro lado, un consumo insuficiente de ácido puede resultar en una lixiviación incompleta y una menor recuperación de los metales valiosos, lo que puede comprometer la eficiencia del proceso.

La elección de la solución y la concentración del disolvente también son factores críticos que deben equilibrarse cuidadosamente. La concentración del disolvente, ya sea ácido, alcalino u otro agente lixivante, debe ser óptima para facilitar la disolución de los metales de interés en el mineral,

pero al mismo tiempo debe ser económica y rentable. Además, la selección del tipo de disolvente y su concentración también puede verse influenciada por consideraciones ambientales y de seguridad. (Cortéz, 2012).

Dado que generalmente es el reactivo más caro, la concentración de ácido debe optimizarse para minimizar el consumo de ácido. La concentración de ácido en la solución de lixiviación es un factor crítico que impacta directamente la recuperación de cobre durante el proceso.

Cuando la concentración de ácido es insuficiente, es decir, menor que el valor óptimo, la disolución del cobre puede ser incompleta, lo que resulta en una recuperación reducida del metal. Por otro lado, aumentar la concentración de ácido puede mejorar la recuperación de cobre al hacer que el ácido sea más reactivo, pero esto también puede conllevar a un mayor consumo de ácido y, por ende, a costos operativos más altos. Por tanto, es crucial encontrar un equilibrio entre la concentración de ácido, la eficiencia de la lixiviación y los costos operativos para lograr una recuperación de cobre óptima y rentable. Esto requiere un monitoreo constante y un control cuidadoso de la concentración de ácido en la solución de lixiviación a lo largo de todas las etapas del proceso.

La obtención de imágenes de la concentración de ácido suele ser el reactivo más caro, lo que lo convierte en una actividad necesaria para minimizar el consumo de ácido.

Si la concentración de ácido es inferior a la óptima, la recuperación se ve afectada.

El aumento de la concentración de ácido de la solución de lixiviación da como resultado un mayor consumo de ácido pero una mayor recuperación de cobre.

**d) Tiempo de contacto:** El tiempo de contacto es un parámetro crucial en los procesos de lixiviación, especialmente cuando se trata de minerales que lixivian lentamente, como los sulfuros. Este tiempo se refiere al período durante el cual los minerales están en contacto directo con la solución lixiviantes. Es esencial para permitir que el proceso de disolución ocurra de manera efectiva y maximizar la recuperación del metal deseado.

En el caso específico de la lixiviación de sulfuros de disolución lenta, como los minerales de cobre sulfurados, el tiempo de contacto puede ser especialmente importante debido a la cinética de la reacción de lixiviación más lenta. Un tiempo de contacto adecuado permite que la solución lixiviantes penetre en el mineral y disuelva los componentes metálicos de manera eficiente.

Es importante gestionar el tiempo de contacto de manera óptima, considerando las diversas variables involucradas en el proceso, como la concentración de la solución lixiviantes, la

temperatura, la presión y otras condiciones operativas. Ajustar y controlar el tiempo de contacto de manera adecuada puede ayudar a maximizar la recuperación del metal valioso en el menor tiempo posible, lo que puede traducirse en una mayor eficiencia y rentabilidad del proceso de lixiviación. (Cortez, 2012).

**e) Temperatura del disolvente:** La temperatura es un factor crucial en los procesos de lixiviación de sulfuros de cobre y otros minerales. La solubilidad de los sulfuros de cobre, como la calcopirita, aumenta significativamente a medida que aumenta la temperatura del sistema de lixiviación.

Esto se debe a que el aumento de la temperatura incrementa la energía cinética de las moléculas en la solución lixiviantes, lo que facilita la ruptura de los enlaces químicos en los minerales y promueve la disolución de los componentes metálicos en la solución.

Por lo tanto, mantener la temperatura adecuada en el sistema de lixiviación es crucial para mejorar la cinética de la reacción de disolución y aumentar la eficiencia de la lixiviación de los sulfuros de cobre. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la temperatura óptima puede variar dependiendo de las condiciones específicas del proceso y de las propiedades del mineral.

Un control preciso de la temperatura y una comprensión profunda de su impacto en la cinética de la reacción son fundamentales para optimizar el proceso de lixiviación y maximizar la recuperación del cobre.

- f) PH:** La acidez de la solución en los procesos de lixiviación de cobre es un factor crítico, especialmente en lo que respecta al posterior proceso de extracción del cobre.

Un pH específico en la solución lixiviantes es crucial para garantizar la eficiencia y la selectividad de la extracción del cobre de la solución después de la lixiviación.

El pH óptimo para la solución lixiviantes suele estar en el rango de 1.8 a 2. Este rango de pH es ácido y está específicamente diseñado para disolver eficientemente el cobre de los minerales, especialmente de los minerales de sulfuro.

En condiciones ácidas, el cobre se disuelve en la solución lixiviantes como complejos solubles, lo que facilita su extracción posterior.

- g) Tiempo de lixiviación:** Dependiendo de la naturaleza mineral del mineral, el período de lixiviación puede variar mucho. En el caso de los óxidos, se necesitan entre 30 y 60 días; en el caso de los sulfuros, depende más del tamaño de las partículas y de la mineralogía (por ejemplo, ROM).

minerales (es decir, sólo minerales tratados), los sulfuros secundarios duran de 6 a 9 meses

La primera trituración puede tardar varios años, o hasta 10 años en el caso de la calcopirita.

### 2.2.12. Cinética de disolución

En cuanto a la velocidad de disolución, existe una gran diferencia cualitativa dependiendo del tipo de mineral en cada región de yacimientos minerales. Por tanto, los tipos más comunes se pueden clasificar en cinco categorías según su dinámica relativa (Domic, 2001): muy rápido/rápido/medio/lento/muy lento.

**a. Cinética muy rápida:** están presentes sulfato, cloruro y carbonato de cobre. Todos estos son muy ligeramente ácidos y solubles a temperatura ambiente. Los sulfatos sólo son solubles en agua. El cloruro separa fácilmente los metales del cloro. Los carbonatos reaccionan violentamente liberando gases de cobre y CO<sub>2</sub>.

**b. Cinética rápida:** Los silicatos y óxidos de cobre que contienen Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> y Mn<sup>4+</sup> suelen requerir un entorno más ácido para su disolución en comparación con otros minerales de cobre. Estos minerales suelen encontrarse en forma de vetas y escombros en la naturaleza, con grandes superficies expuestas que facilitan su acceso a las soluciones lixiviantes.

Por ejemplo, la crisocola, un mineral de cobre común, tiene una estructura fibrosa y porosa que permite que las soluciones lixiviantes penetren más fácilmente en su matriz. La disolución de estos

minerales generalmente implica la ruptura de enlaces Cu-O relativamente débiles en su estructura. Se ha observado que la facilidad con la que se disuelven los silicatos está directamente relacionada con la solubilidad del óxido original presente en el mineral.

Debido a estas características, el proceso de lixiviación de minerales que contienen silicatos y óxidos de cobre puede requerir un entorno ácido más pronunciado para facilitar la disolución de estos componentes y maximizar la extracción de cobre. Por lo tanto, el control cuidadoso de la acidez en la solución lixiviantes es esencial para garantizar una disolución efectiva de estos minerales y una recuperación óptima del cobre.

**c. *Cinética moderada:*** La categoría de cinética intermedia en el proceso de lixiviación de minerales de cobre incluye minerales como el cobre nativo y los óxidos "reducidos", que contienen cobre en el estado  $\text{Cu}^{1+}$  y hierro en el estado  $\text{Fe}^{2+}$ , respectivamente.

Estos minerales requieren la presencia de un agente oxidante para disolverse, y son sensibles a factores como el movimiento, la temperatura y la oxigenación del medio.

Estas especies de minerales suelen encontrarse en grietas y fracturas de la roca, pero tienen la desventaja de necesitar un cambio de valencia, es decir, una transferencia adicional de electrones, para disolverse.

Este proceso de transferencia de electrones adicional es conocido por ser cinéticamente lento, lo que significa que la velocidad de disolución de estos minerales puede ser bastante reducida en comparación con otros tipos de minerales de cobre.

Dado que la transferencia de electrones adicional es un paso cinético lento, se deben tomar medidas para optimizar las condiciones de lixiviación y acelerar este proceso. Esto puede incluir el control de factores como la temperatura y la oxigenación del medio para mejorar la velocidad de disolución de estos minerales y aumentar la eficiencia del proceso de lixiviación en general. Además, el uso de agentes oxidantes adecuados puede ser crucial para facilitar la disolución de estos minerales y mejorar la recuperación del cobre durante el proceso de lixiviación.

**d. *Cinética lenta:*** La siguiente categoría de cinética lenta en el proceso de lixiviación de minerales de cobre incluye los sulfuros de cobre simples. La velocidad de disolución de estos minerales es más lenta en comparación con otras especies debido al proceso de oxidación necesario para convertir el azufre presente en el mineral de su estado de sulfuro a sulfato.

Para disolver los sulfuros de cobre simples, es necesario oxidar el azufre del estado de sulfuro a sulfato ( $S^{2-}$  a  $S^{6+}$ ), lo que implica la transferencia de ocho electrones. Además, puede ser necesario un proceso adicional de transferencia de electrones cuando el cobre presente en el mineral está en su forma reducida.

Debido a la complejidad de este proceso de oxidación y transferencia de electrones, la velocidad de disolución de los sulfuros de cobre simples es considerablemente más lenta en comparación con otros tipos de minerales de cobre.

Esto puede representar un desafío en el proceso de lixiviación, ya que la velocidad de disolución más lenta puede afectar la eficiencia y la recuperación del cobre.

Para abordar este desafío, se pueden emplear diferentes estrategias, como el uso de agentes oxidantes adecuados, la optimización de las condiciones de lixiviación, como la temperatura y el pH, y el diseño de sistemas de lixiviación que promuevan una interacción más efectiva entre la solución lixiviantes y el mineral de sulfuro de cobre.

Estas medidas pueden ayudar a acelerar la velocidad de disolución de los sulfuros de cobre y mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación en general. Básicamente, necesitas un agente oxidante para disolverlo.

**e) Cinética muy lenta:** La categoría de movimiento muy lento en el proceso de lixiviación de minerales de cobre incluye minerales como los sulfuros dobles de cobre y hierro, así como los sulfuros dobles de cobre y arsénico. Estos minerales tienen una velocidad de disolución aún más lenta en comparación con los sulfuros de cobre simples debido a su composición química más compleja y a los procesos

adicionales involucrados en su disolución. Por ejemplo, en el caso de la calcopirita, el cobre (II) debe oxidarse a cobre (II) y el sulfuro debe oxidarse a sulfato, transfiriendo 17 electrones.

En este caso, no sólo no se requiere un agente oxidante, sino que a menudo no se disuelve completamente y se detiene después de alcanzar un cierto nivel.

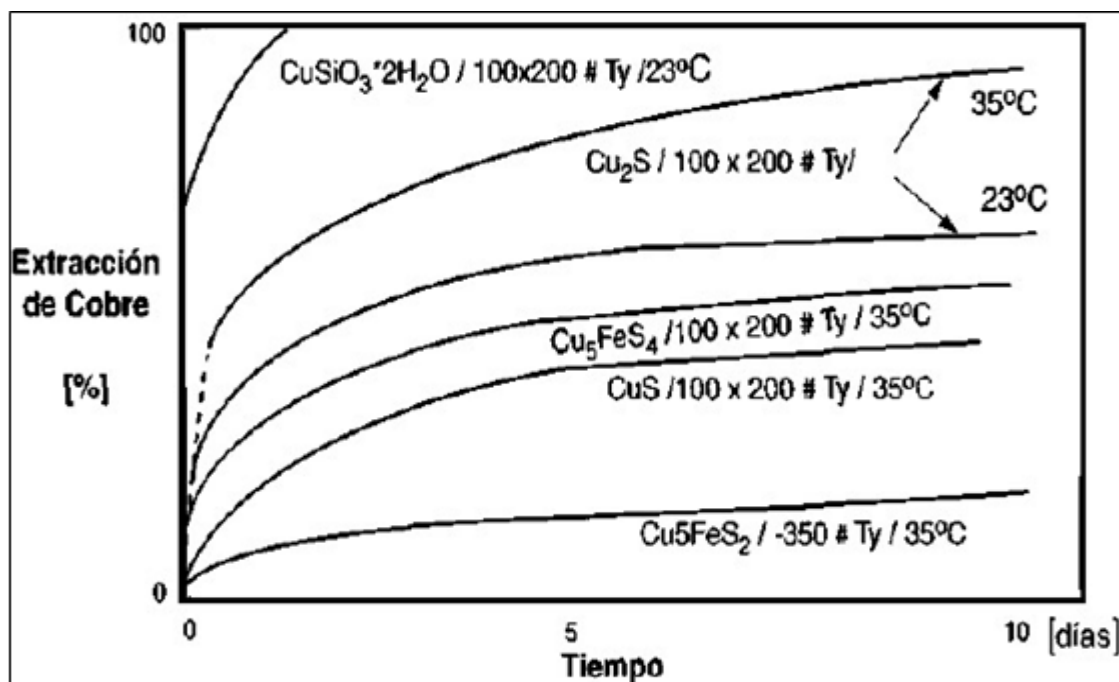


Figura 8: Extracciones de cobre experimentales en función del tiempo

Fuente: (Domic, 2001)

### 2.2.13. Concentración y purificación de soluciones

Después de la etapa de lixiviación, el lavado y la concentración de la solución obtenida son pasos críticos en el proceso de extracción de cobre. Estas operaciones se realizan para separar y recuperar eficientemente el cobre disuelto en la solución lixiviantes.

Estos métodos y técnicas se seleccionan según las características específicas del proceso, la composición de la solución lixivante y los objetivos de recuperación del cobre, con el objetivo de obtener la máxima eficiencia y pureza en la extracción del cobre disuelto.

#### **2.2.13.1. Extracción por solvente**

El método de separación que describe, donde la solución pasa por dos etapas de extracción y re-extracción, se refiere al proceso de extracción por solventes. Este método se utiliza comúnmente en la industria para purificar las soluciones provenientes de la lixiviación, especialmente en el caso de las soluciones de PLS.

**a) Etapa de extracción:** En el proceso de extracción por solventes, durante la etapa de extracción, la solución de lixiviación (PLS) o solución rica, que típicamente contiene valores de cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ) en el rango de 1-10 g/L y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en el rango de 0.5-5 g/L, se mezcla con la fase orgánica que contiene un extractante especial para el cobre. Este extractante forma un complejo con el ion de cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), transfiriendo así el metal iónico de la fase acuosa a la fase orgánica.

Durante este proceso de extracción, las impurezas presentes en la solución de lixiviación (PLS) quedan en la fase acuosa, mientras que el cobre se concentra en la fase orgánica. Después de la extracción, la fase orgánica que contiene el cobre se separa de la fase acuosa, generalmente mediante decantación o mediante otros métodos de

separación por gravedad. Esta fase orgánica que contiene el cobre concentrado se denomina fase refinada.

Una vez que se ha completado la extracción, la fase orgánica refinada puede ser sometida a la etapa de re-extracción, donde el cobre se recupera de la fase orgánica y se transfiere de vuelta a una solución acuosa para su posterior procesamiento y purificación. Este proceso de extracción por solventes permite una separación efectiva y selectiva del cobre de otras impurezas presentes en la solución de lixiviación, lo que resulta en una solución concentrada y purificada de cobre que luego puede ser sometida a procesos adicionales para obtener cobre metálico puro. El refinado es los ácidos producidos por la extracción son devueltos a la cadena de lixiviación donde pueden ser utilizados (Ivan B.,2015).

**b) Etapa de re-extracción:** En el proceso de re-extracción durante la extracción por solventes, el cobre cargado en la fase orgánica se pone en contacto con una solución cargada de ácido, un electrolito gastado o una solución esterilizada, típicamente con una concentración de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) en el rango de 175 a 190 g/L.

Esta solución ácida se utiliza para eliminar el cobre de la fase orgánica, recuperándolo del circuito de extracción y preparándolo para su posterior procesamiento en el proceso de electro obtención.

Durante esta etapa de re-extracción, el cobre cargado en la fase orgánica se intercambia con los iones de hidrógeno ( $H^+$ ) presentes en la solución ácida. Esto resulta en la transferencia del cobre de la fase orgánica a la fase acuosa, mientras que el agente extractante utilizado para la extracción del cobre permanece en la fase orgánica, lista para ser reciclada en el proceso de extracción.

Después de la re-extracción, la fase orgánica se regenera y se devuelve al proceso de extracción para su reutilización, mientras que la solución acuosa cargada con cobre se somete a procesos adicionales, como la electroobtención, donde el cobre es depositado en cátodos metálicos puros mediante la aplicación de corriente eléctrica.

La fase orgánica empobrecida, que contiene una menor concentración de cobre después del proceso de re-extracción, se recicla y se devuelve al circuito de extracción para su reutilización en el proceso de extracción por solventes. Esta fase orgánica gastada puede ser tratada y acondicionada nuevamente para su uso en futuras operaciones de extracción.

Por otro lado, la fase acuosa rica en cobre, el electrolito dinámico, se envía a la celda de electrólisis en el proceso de electroobtención.

En la celda de electrólisis, se aplica una corriente eléctrica a través del electrolito para inducir la deposición de cobre metálico puro en los cátodos, separándolo así de la solución acuosa y obteniendo cobre de alta pureza.

Este proceso de separación por gravedad y reciclaje de la fase orgánica empobrecida y el electrolito dinámico es esencial para mantener la eficiencia y la continuidad del proceso de extracción por solventes y para asegurar la recuperación máxima de cobre durante el proceso de electroobtención. (Ivan, 2015).

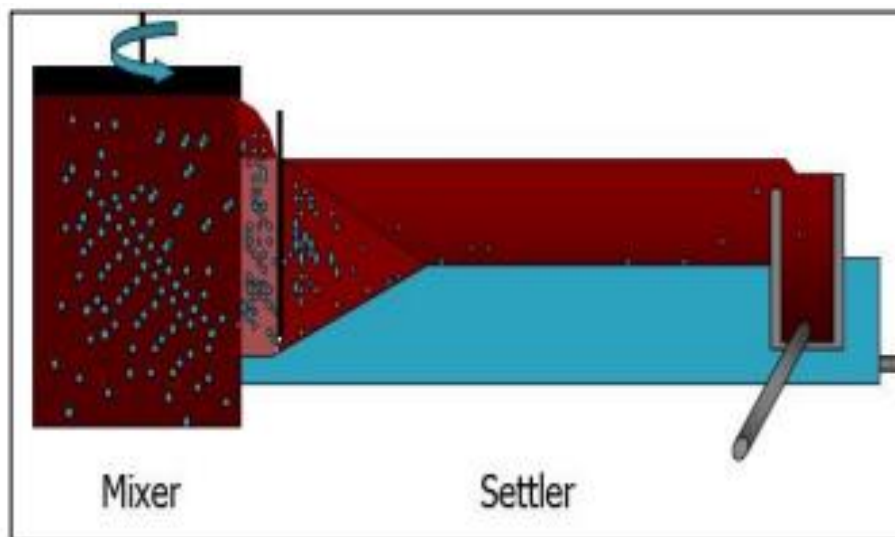


Figura 9: Equipo mezclador – sedimentador del circuito de extracción  
Fuente:( Ivan , 2 01 5)

El proceso de extracción con disolvente se realiza utilizando dos soluciones inmiscibles: una fase acuosa y una fase orgánica. La fase acuosa es una solución de lixiviación que está concentrada en cobre y tiene un alto contenido de impurezas y no puede tratarse como un precipitado de cobre sin eliminar primero las impurezas existentes o separar de alguna manera el cobre de esta solución. En otras soluciones acuosas sin aditivos; Esto es lo que sucede en la extracción con solventes.

#### **2.2.14. Recuperación de metales**

La recuperación de valores metálicos de la solución se puede lograr mediante precipitación química. Uniendo zinc, hierro u otros metales; Electroprecipitación, cristalización, adsorción con carbón activado, precipitación con sulfuro de hidrógeno; Precipitación por gases reductores como dióxido de azufre, monóxido de carbono e hidrógeno bajo presión; Degradación causada por microorganismos como bacterias, moho o hongos.

##### **2.2.14.1. Electro-obtención (ew)**

El proceso de galvanización por electrohumectación (EW) consta de un cátodo metálico y un ánodo inerte (pero conductor) sumergidos en una solución.

Celda electrolítica avanzada cargada con  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en el circuito SX. La aplicación de una corriente continua desde una fuente

externa (p. ej., un rectificador) genera una corriente de electrones entre el ánodo y el cátodo, reduciendo el  $\text{Cu}^{2+}$  a  $\text{Cu}^0$  y depositándolo en la superficie del cátodo.

El material del cátodo suele ser acero inoxidable. El ánodo suele estar hecho de una aleación de plomo. El proceso dura de 6 a 7 días y el cobre separado del cátodo se limpia y almacena para su venta. Cada año se almacenan alrededor de 5 millones de toneladas de cobre en todo el mundo (ICSG, 2013).

#### **2.2.15. Importancia de la Ganga**

La ganga que rodea (o acompaña) al mineral de cobre evita la lixiviación del mineral de cobre. Utilice más reactivo o reduzca la velocidad de lavado. Ganga tiene un alto grado de deformación y descomposición, por lo que regenera el cobre recién disuelto y, a veces, deja grandes cantidades de arcilla con propiedades de intercambio iónico. Este fenómeno se llama "prefuerza". Por otro lado factores que causan problemas en el proceso de producción de cobre (Domik, 2001).

Una alta cinética de lixiviación y/o la presencia de abundantes minerales de ganga son suficientes para evitar la lixiviación de minerales de cobre. Normalmente, los minerales de ganga en los depósitos de pórfido de cobre consisten en más del 95% de especies de silicato.

El silicio, de una forma u otra, también es una parte importante de la corteza terrestre y representa más del 98% de su contenido sólido. Por tanto, su acción en soluciones ácidas es decisiva para el resultado del proceso de alcalinización. Los principales minerales de silicato del Ganges (estos depósitos) se dan en la Tabla 3 (Domich, 2001).

**Tabla 3**

*Principales minerales de silicatos, presentes en la ganga*

Especie mineralógica	Composición más común para esta especie de silicato
Cuarzo	$\text{SiO}_2$
Ortoclasa	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$
Plagioclasa sódico	$\text{NaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_8$ Albita
Plagioclasa potásica	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ Anortita
Biotita	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Fuentes: (Domic, 2001)

Otros tipos de minerales que se encuentran comúnmente en la ganga de estos depósitos incluyen:

- a) Carbonatos como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).
- b) Sulfatos, normalmente con yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ).
- c) Óxidos e hidróxidos de hierro. Estos incluyen ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la especularita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la limonita ( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) y la goetita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ):

### **2.2.15.1. Influencia en el Consumo de Ácido**

El consumo de agente lixivante en el proceso de lixiviación depende de varios factores, incluido el número de especies que reaccionan con el agente lixivante y la velocidad de reacción de estas especies. Si el mineral de ganga, que es aquel que no contiene el metal valioso de interés (en este caso, el cobre), reacciona más rápido que el mineral de cobre y está presente en grandes cantidades, puede limitar la lixiviación del cobre.

Cuando el mineral de ganga reacciona más rápido, consume parte del agente lixivante y reduce la cantidad disponible para reaccionar con el mineral de cobre.

Esto puede resultar en una menor extracción de cobre durante el proceso de lixiviación y, por lo tanto, en una menor eficiencia del proceso en general.

Por lo tanto, es importante considerar la composición y las características del mineral de ganga, así como su velocidad de reacción con el agente lixivante, al diseñar y operar un proceso de lixiviación para la extracción de cobre u otros metales.

Esto puede implicar estrategias para mitigar el impacto del mineral de ganga, como ajustar las condiciones de operación o utilizar pretratamientos para mejorar la selectividad de la lixiviación hacia el mineral de cobre.

Como se mencionó anteriormente, los tipos de silicato son los más comunes. Por tanto, el conocimiento en general es práctico (Domik, 2001):

- a) El consumo de ácido del mineral de cobre procedente del basalto y la cuarcita es bastante elevado.
- b) El mineral compuesto de monzonita, andesita y granito consume cantidades moderadas de ácido.
- c) El mineral ubicado en una matriz metamórfica de cuarzo-sericita consume una pequeña cantidad de ácido.
- d) Los minerales de arenisca de cuarzo prácticamente no consumen ácidos.

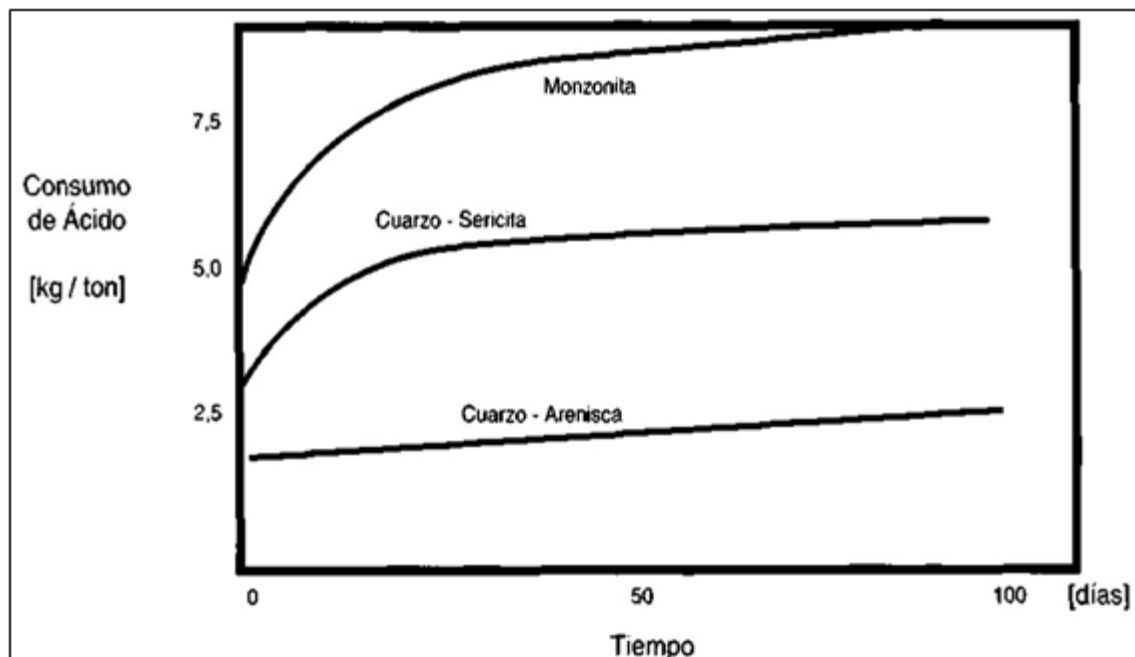


Figura 10: Consumo de ácido propio de la ganga en yacimiento de cobre.

Fuente: (Domik, 2001).

### 2.2.15.2. Consumo de reactivos en la ganga

Las especies minerales del Ganges reaccionan con los ácidos, lo que depende básicamente de su composición. El Ganges se puede clasificar según su reactividad (Dreier, 1999):

**Ganga altamente reactiva:** Esta categoría incluye los tipos de minerales carbonatados que reaccionan rápidamente con los ácidos (calcita, dolomita, siderita, etc.).

**Ganga medianamente reactiva:** La categoría mencionada implica que el mineral puede contener cantidades considerables de anfíbol, piroxeno y plagioclasa cálcica. Estas especies se disuelven relativamente rápido en comparación con otros silicatos, lo que significa que reaccionan más rápidamente con el agente lixivante. Como resultado de esta reacción rápida, la solución pierde su contenido de ácido y agente oxidante.

Cuando estas especies se disuelven, liberan iones y compuestos que pueden neutralizar el ácido y consumir el agente oxidante presente en la solución lixivante. Esto provoca un aumento del pH de la solución y una disminución del potencial de oxidación (Eh).

En otras palabras, la solución lixivante se vuelve menos ácida y menos oxidante debido a la disolución rápida de estos minerales.

Este cambio en las propiedades químicas de la solución puede afectar negativamente la eficacia de la lixiviación del metal valioso, como el cobre, ya que la solución resultante puede ser menos capaz de

disolver eficientemente el mineral de interés. Por lo tanto, es importante comprender y gestionar adecuadamente la presencia y la reactividad de estos minerales al diseñar y operar procesos de lixiviación para la extracción de metales.

**Ganga moderadamente reactiva:** en esta categoría se encuentran la ortolita, la biotita, la albita y el cuarzo.

**Ganga no reactiva:** La arenisca de cuarzo es prácticamente inerte a las soluciones de lixiviación.

### 2.3. Definición de términos

**Lixiviación.** - La lixiviación es un proceso químico utilizado en la minería para extraer minerales valiosos de minerales de baja ley o difíciles de procesar. Este proceso implica el uso de solventes líquidos o soluciones lixiviantes que disuelven selectivamente los minerales de interés del mineral.

Además de su aplicación en la minería, la lixiviación también ocurre de forma natural en la naturaleza, donde el agua que fluye a través de las rocas puede disolver minerales y transportarlos a otras áreas. Este proceso natural puede resultar en la formación de depósitos minerales en lugares donde el agua subterránea lleva minerales disueltos y los deposita cuando se produce una precipitación química.

En la minería, la lixiviación se lleva a cabo de varias maneras, siendo dos de las más comunes la lixiviación en pilas y la lixiviación in situ (insitu lixiviación). En la lixiviación en pilas, el mineral triturado se apila en grandes montones y se rocía con una solución lixiviantes. A medida que la solución atraviesa el mineral, disuelve los minerales de interés, y la solución cargada con los metales disueltos se recoge en la base de la pila y se procesa para recuperar los metales.

Por otro lado, en la lixiviación in situ, la solución lixiviante se inyecta directamente en el yacimiento mineral subterráneo, donde disuelve los minerales de interés. La solución rica en metales disueltos se bombea entonces a la superficie y se procesa para recuperar los metales.

Estos métodos de lixiviación son eficaces para la extracción de minerales valiosos de minerales de baja ley y minerales que son difíciles de procesar mediante métodos convencionales.

Sin embargo, también plantean desafíos ambientales y de gestión de residuos que deben ser abordados adecuadamente para garantizar la sostenibilidad de la minería.

**Minerales.** - Un mineral es una sustancia inorgánica natural que se encuentra en la corteza terrestre y que tiene una composición química y una estructura cristalina definidas. Los minerales están formados por elementos químicos y se presentan en una variedad de formas y colores. Pueden formarse a través de procesos geológicos naturales, como la cristalización de magma o la precipitación de soluciones acuosas.

Los minerales pueden encontrarse en asociación con otros tipos de roca, como rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas. Por ejemplo, algunos minerales pueden formar parte de la matriz de una roca ígnea, mientras que otros pueden depositarse en las capas de sedimentos para formar rocas sedimentarias. Además, los minerales pueden ocurrir como inclusiones en minerales más grandes o en forma de vetas dentro de una masa rocosa.

Los minerales son importantes recursos naturales que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde la construcción hasta la fabricación de productos electrónicos.

Su extracción y procesamiento son fundamentales para muchas industrias, incluida la minería, la metalurgia y la fabricación.

**Mena.** - El mineral consta de dos partes. Minerales en forma sólida de composición química conocida y ganga en sus partes sin beneficio económico. La abundancia de un mineral generalmente se define como la proporción de metales que contiene en una mezcla.

**Recuperación.** - La proporción de metales preciosos en un mineral obtenido por procesamiento metalúrgico.

**Dilución.** - Durante el proceso de extracción la calidad del mineral se deteriora debido al proceso de extracción de las rocas junto con el mineral.

**Ganga.** - Contiene minerales que acompañan a la mena (cuarzo, calcita, etc.), pero no tiene interés de extracción durante su uso. En algún momento, los minerales que solían venderse a precio de ganga se convierten en minerales a medida que se descubren nuevos sitios mineros.

**Cobre.** - Es un metal rojo dúctil, maleable y que conduce bien la electricidad.

**Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).** - La descripción que proporcionas corresponde al ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Es una sustancia pura líquida, aceitosa, transparente e incolora a temperatura ambiente.

Sin embargo, cuando se calienta por encima de 303,15 K (30°C), se evapora y libera vapores corrosivos.

El ácido sulfúrico es altamente reactivo y puede reaccionar con una amplia gama de metales, disolviéndolos y formando sales de sulfato. Esta propiedad lo hace valioso en procesos como la lixiviación, donde se utiliza para disolver minerales metálicos y extraer metales valiosos.

Es importante destacar que el ácido sulfúrico es extremadamente corrosivo y puede causar quemaduras graves en la piel, los ojos y las vías respiratorias si entra en contacto con ellos. Por lo tanto, debe manejarse con extrema precaución y utilizando el equipo de protección adecuado.

**Celdas de electroobtenición.** - Se trata de elementos electrolíticos sobre los que se realiza el proceso de generación de electricidad.

**Celdas electrolíticas.** - Es adecuado para recipientes de electrólisis tanto en procesos de electrólisis como de electrorefinado. Estos recipientes o palanganas están fabricados de polímero (plástico) por fuera y por dentro y por su interior circula una solución que contiene especies metálicas disueltas (preferiblemente purificadas y concentradas).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Caracterización del diseño de investigación**

La cantidad de cobre presente en el mineral (por ejemplo, crisocola o malaquita) es del 100%, ya que estos minerales contienen exclusivamente cobre en su composición química. Sin embargo, durante el proceso de lixiviación, la cantidad de cobre obtenida puede ser menor debido a la llamada tasa de recuperación.

La tasa de recuperación es el porcentaje de cobre que se extrae con éxito del mineral durante el proceso de lixiviación. Factores como la eficiencia del proceso, la calidad del mineral y las condiciones de operación pueden influir en esta tasa, y es común que sea inferior al 100%.

Además, es importante destacar que la cantidad de reactivo utilizado para la lixiviación, como el ácido sulfúrico, está influenciada principalmente por el contenido de cobre en el mineral. Sin embargo, también puede haber otros minerales presentes en cantidades pequeñas que reaccionan con el ácido sulfúrico durante el proceso.

Por ejemplo, los carbonatos y filosilicatos pueden reaccionar con el ácido sulfúrico y consumir parte de él, lo que afecta la cantidad total de ácido sulfúrico utilizado y, por lo tanto, la eficiencia del proceso de lixiviación.

**Características.** - El ambiente ácido creado es suficiente para disolver la crisocola, la malaquita y otros óxidos inorgánicos de cobre y, en cierta medida, de hierro. El mejor ejemplo de mezcla o lixiviación es la fusión en una superficie expuesta con una tasa de recuperación controlada numéricamente.

**Tabla 4**

*Parámetros de pruebas*

Mineral	óxido de cobre
Peso mineral (g)	75
Ley Mineral (%)	7.9
Humedad (%)	2.6
Ley mineral seco (g)	73
Volumen (ml)	200
pH	1.6, 1.8, 2, 2.2, 2.6 y 3
Cobre Metálico (g)	5.8

Fuente: Propia del autor.

### 3.2. Acciones y actividades para la ejecución del proyecto

Durante el desarrollo de la prueba, se toman muestras de las soluciones durante las pruebas de lixiviación y la cantidad de solución de lixiviación en cada vaso o botella se reemplaza después de cada prueba para mantener la cantidad de solución de lixiviación y la acidez original de cada una. Experimento. Por lo tanto, el análisis químico de las muestras obtenidas se ajusta según el volumen adquirido y la concentración inicial de iones en la solución lixivante.

### **3.3. Materiales e instrumentos**

Los materiales e instrumentos utilizados en las pruebas metalúrgicas fueron obtenidos en calidad de préstamo de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales. A continuación, se presenta el listado detallado de los equipos y materiales utilizados:

- Mineral oxidado de cobre.
- Ácido sulfúrico.
- Balanza analítica
- Cuarteador
- Chancadora
- Molino de bolas
- Agitador
- Vaso precipitado de 500 ml
- Vaso precipitado de 200 ml
- Vaso precipitado de 100 ml
- Bureta de 100 ml
- Embudo
- Soporte universal
- Papel filtro

### **3.4. Población y muestra de estudio**

Las muestras provienen de la Concesión Minera Eduvino-2, ubicada en el distrito de Uchumayo, en el kilómetro 19 (Cerro Gloria) de la Variante de Uchumayo, Arequipa.

El mineral fue transportado al laboratorio de metalurgia de la ESME, donde se sometió a los procesos de trituración, homogenización y molienda, de acuerdo con el tipo de prueba programada en el plan de ensayos.



Figura 11: Mineral oxidado de cobre (Minera Eduvino-2)

Fuente: Propia del autor



Figura 12: Pesado de la muestra de mineral.

Fuente: Propia del autor.

### 3.4.1. Caracterización del mineral

El mineral contiene predominantemente  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ , con presencia significativa de crisocola y una menor proporción de malaquita. Por esta razón, se llevó a cabo la caracterización física de la muestra proveniente de la Concesión Minera Edivino-2, ubicada en el distrito de Uchumayo, en el kilómetro 19 (Cerro Gloria) de la Variante de Uchumayo, Arequipa. Para este proceso, se realizó un análisis granulométrico con el objetivo de determinar el porcentaje de retención y el material que pasa a través de los tamices, obteniendo información clave sobre la distribución de tamaño de las partículas del mineral.

### **3.5. Tratamiento de datos**

El trabajo actual tiene como objetivo determinar la influencia de variables independientes en la lixiviación agitada, incluida la lixiviación por pH, en la determinación del grado de molienda apropiado para el proceso con el fin de maximizar la recuperación de cobre del proceso de lixiviación agitada.

Además, se estableció el rango óptimo de consumo de reactivos, lo que permite determinar las condiciones óptimas para la extracción del cobre contenido en minerales de óxido de cobre. Se utilizó Microsoft Excel para analizar y procesar datos estadísticos con base en los datos obtenidos de las pruebas metalúrgicas.

#### **3.5.1. Procesamiento para obtención de datos**

Para obtener datos para el análisis del problema se siguió el siguiente procedimiento.

- a) Retirar 60 kg de la zona y homogeneizar rotando y dividiendo en 4 partes iguales de la siguiente manera.
  - 2 kg para análisis químico básico de cobre total, cobre soluble y hierro total.
  - 2 kg para análisis granulométrico de las fracciones +14 y +35, +65, +100, 140, 200, 270 y 400; Análisis CuT para 65, cada fracción, cobre soluble y hierro total.
  - 2 kg para el análisis de propiedades físicas, incluida la determinación del contenido de humedad natural de la muestra, densidad mineral y gravedad específica.

- 5 kg para probar el consumo de ácido a diferentes pH. kilos para las pruebas de consumo de ácido a pH variables.
  - El resto concuerda con lo dicho por el testigo.
- b) 0,6 kilos cada uno, para pruebas de lixiviación por agitación.

**Lixiviación de agitación.** - Los procedimientos experimentales se basan principalmente en el estudio de cambios en parámetros como la cinética de lixiviación del cobre a partir de minerales portadores de Crisocola. Se prepararon muestras de minerales de 600 g moliendo en un molino de bolas de laboratorio durante tiempos seleccionados (15, 30 y 45 min). El producto pulverizado se homogeneizó pasándolo por un tamiz de malla 200. Para la prueba se tomó una muestra de 75 g, se mezcló con 200 ml de agua del grifo, se agitó y se escurrió. Todas las pruebas de lixiviación se realizaron a temperatura ambiente, y la velocidad de agitación fue adecuada para mantener las partículas del mineral en suspensión constante. Se añadió ácido sulfúrico gradualmente utilizando una bureta, con el fin de variar el pH de la suspensión en diferentes niveles (pH: 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.6 y 3). Estas pruebas nos permitirán evaluar el grado de extracción del cobre, a través del análisis de los licores de lixiviación obtenidos en cada caso.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados

En la Tabla 5 se presentan los resultados de las pruebas de lixiviación para los diferentes tamaños de tamiz. De particular importancia para nosotros son los resultados correspondientes al tamaño de tamiz pasante de 75  $\mu\text{m}$ , ya que este tamaño proporciona datos clave sobre la eficiencia del proceso de lixiviación en partículas más finas, lo que impacta directamente en la recuperación del cobre.

**Tabla 5**

*Distribución del porcentaje de cobre por malla*

Tamaño N°	Tamiz $\mu\text{m}$	%Retenido	% Pasante	%Cu
400	33	4	56	9.8
270	53	4	61	2.7
200	74	3	64	2.5
140	104	2	70	3.9
100	147	2	72	3.4
65	208	1	82	4.6
35	417	1	90	9.2
14	116	4	96	1.2

Fuente: Propia del autor

La Tabla del 6 al 8 presenta el enfoque en la extracción del cobre de minerales que contienen crisocola y malaquita mayormente con ley de cobre del 7,9%

**Tabla 6**

*Tiempo de molienda con relación al porcentaje m 200 (Tyler)*

Tiempo Molienda (min)	% Pasante	PLS g/l	% Eficiencia
0	0	0	0
15	65	8,5	75
30	70	10,	85
45	75	12	92

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 7**

*Variación del pH y la extracción de cobre*

pH	Acido ml	PLS g/l	% Extracción
1.6	30	11,35	96,5
1.8	26	10,30	94,6
2	22	10,20	93,1
2.2	20	10,10	92,9
2.6	16	9,70	85,9
3	12	9,20	69,3

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 8***Cinética de lixiviación en la extracción del cobre, variando el pH*

Tiempo Lixiviación (Horas)	% Extracción				
	1,6	1,8	2,2	2,6	3
0	0	0	0	0	0
2	39,33	35,70	35,00	33,62	31,88
3	68,79	64,11	62,73	60,30	54,76
4	80,92	75,20	73,47	70,01	60,30
5	87,85	83,52	81,10	76,24	64,11
6	93,40	89,41	86,64	80,75	66,54
8	95,48	92,53	90,45	83,87	68,27
12	96,52	94,61	92,88	85,95	69,31

Fuente: Propia del autor

La Tabla 9-13 muestra los parámetros de las pruebas realizadas cuando el pH se varió de 1,6 a 3 y los resultados de las pruebas realizadas durante la lixiviación agitada.

**Tabla 9***Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 3*

---

Mineral oxido de cobre	
Peso mineral (g)	75
Ley Mineral (%)	7,9
Humedad (%)	2,6
Ley mineral seco (g)	73
Volumen (ml)	200
pH	3
Cobre Metálico (g)	5,8

---

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 10***Resultados de las pruebas a un Ph = 3*

---

Tiempo	Volumen (l)	Ley Cu (g/l)	Cu Extraído (g)	% Cu Extraído	% Recuperación
0	200				
2		9,20	1,84	31,9	31,9
3		6,60	1,32	22,9	54,8
4		1,60	0,32	5,5	60,3
5		1,10	0,22	3,8	64,1
6		0,70	0,14	2,4	66,5
8		0,50	0,1	1,7	68,3
12		0,30	0,06	1,0	69,3

---

Fuente: Propia del autor

**Tabla 11***Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 2,6*

Mineral oxido de cobre	
Peso mineral (g)	75
Ley Mineral (%)	7,9
Humedad (%)	2,6
Ley mineral seco (g)	73
Volumen (ml)	200
pH	2,6
Cobre Metálico (g)	5,8

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 12***Resultados de las pruebas a un Ph = 2,6*

Tiempo	Volumen l	Ley Cu	Cu Extraído (g)	% Cu Extraído	% Recuperación
0	200				
2		9,70	1,94	33,6	33,6
3		7,70	1,54	26,7	60,3
4		2,80	0,56	9,7	70,0
5		1,80	0,36	6,2	76,2
6		1,30	0,26	4,5	80,7
8		0,90	0,18	3,1	83,9
12		0,60	0,12	2,1	85,9

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 13**

*Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 2,2*

Mineral oxido de cobre

Peso mineral (g)	75
Ley Mineral (%)	7,9
Humedad (%)	2,6
Ley mineral seco (g)	73
Volumen (ml)	200
pH	2,2
Cobre Metálico (g)	5,8

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 14**

*Resultados de las pruebas a un pH = 2,2*

Tiempo	Volumen l	Cu (g/l)	Cu Extraído (g)	% Cu Extraído	Recuperación
0	200				
2		10.1	2.02	35.0	35.0
3		8.00	1.6	27.7	62.7
4		3.10	0.62	10.7	73.5
5		2.20	0.44	7.6	81.1
6		1.60	0.32	5.5	86.6
8		1.10	0.22	3.8	90.5
12		0.70	0.14	2.4	92.9

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 15***Parámetros y balance metalúrgico a un pH =1,8*

Mineral oxido de cobre	
Peso mineral (g)	75
Ley Mineral (%)	7,9
Humedad (%)	2,6
Ley mineral seco (g)	73
Volumen (mL)	200
pH	1,8
Cobre Metálico (g)	5,8

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 16***Resultados de las pruebas a un Ph = 1,8*

Tiempo	Volumen l	Cu (g/l)	Cu Extraído (g)	% Cu Extraído	Recuperación
0	200				
2		10,30	2,06	35,7	35,7
3		8,20	1,64	28,4	64,1
4		3,20	0,64	11,1	75,2
5		2,40	0,48	8,3	83,5
6		1,70	0,34	5,9	89,4
8		0,90	0,18	3,1	92,5
12		0,60	0,12	2,1	94,6

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 17***Parámetros y balance metalúrgico a un pH = 1.6*

Mineral oxido de cobre	
Peso mineral (g)	75
Ley Mineral (%)	7,9
Humedad (%)	2,6
Ley mineral seco (g)	73
Volumen (ml)	200
pH	1,6
Cobre Metálico (g)	5,8

Fuente: Propia del autor.

**Tabla 18***Resultados de las pruebas a un Ph = 1,6*

Tiempo	Volumen l	Cu (g/l)	Cu Extraído (g)	% Cu Extraído	Recuperación
0	200				
2		11,35	2,27	39,3	39,3
3		8,50	1,7	29,5	68,8
4		3,50	0,7	12,1	80,90
5		2,00	0,4	6,9	87,9
6		1,60	0,32	5,5	93,4
8		0,60	0,12	2,1	95,5
12		0,30	0,06	1,0	96,5

Fuente: Propia del autor.

La medición del tamaño de las partículas minerales está estrechamente relacionada con la eficiencia de la disolución del cobre. En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis granulométrico, que clasifica los minerales según las propiedades físicas del óxido de cobre. La calidad del cobre presente en la red está determinada por indicadores volumétricos.

En la Figura 13, se observa que las muestras que pasaron a través de tamices de 75 micras o inferiores muestran un alto porcentaje de cobre, mientras que los tamices con partículas más grandes arrojaron valores significativamente más bajos de contenido de cobre. Este resultado destaca la importancia del tamaño de partícula en la optimización del proceso de lixiviación y recuperación de cobre.

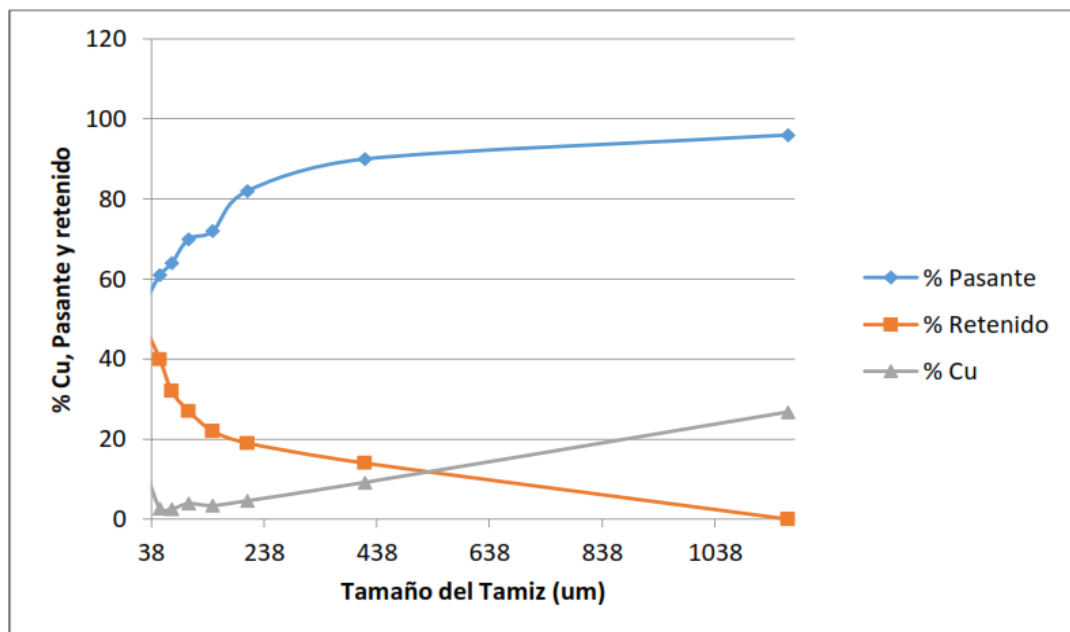


Figura 13: Mineral oxidada de cobre (Minera Eduvino-2)  
Fuente: Propia del autor

En la Figura 14 se muestra que a medida que se incrementa el tiempo de molienda, aumenta el porcentaje de extracción de cobre en las muestras que pasaron por tamices de 75 micras, alcanzando una recuperación del 75 %. En contraste, los tiempos de molienda más cortos produjeron porcentajes más bajos de extracción de cobre, lo que resalta la importancia de un tiempo de molienda adecuado para optimizar la liberación del mineral y mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación.

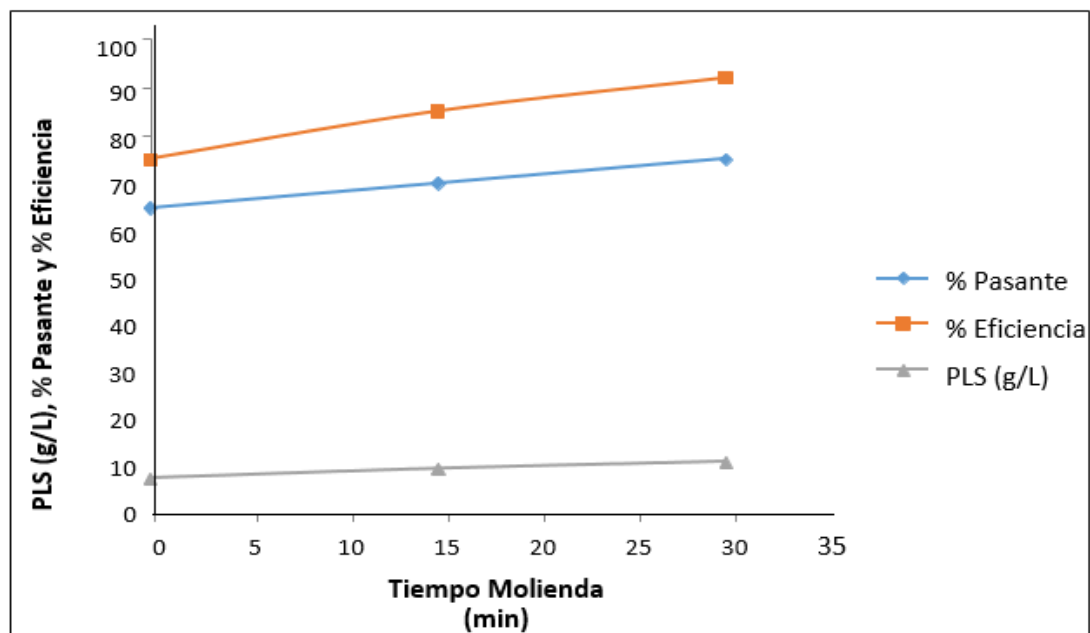


Figura 14: Variación de la molienda en lixiviación de mineral oxidado de cobre  
Fuente: Propia del autor

En la Figura 15 se ha demostrado a menores valores de pH, el porcentaje de extracción de cobre se incrementa, mientras que a mayor pH los valores de cobre son más bajos.

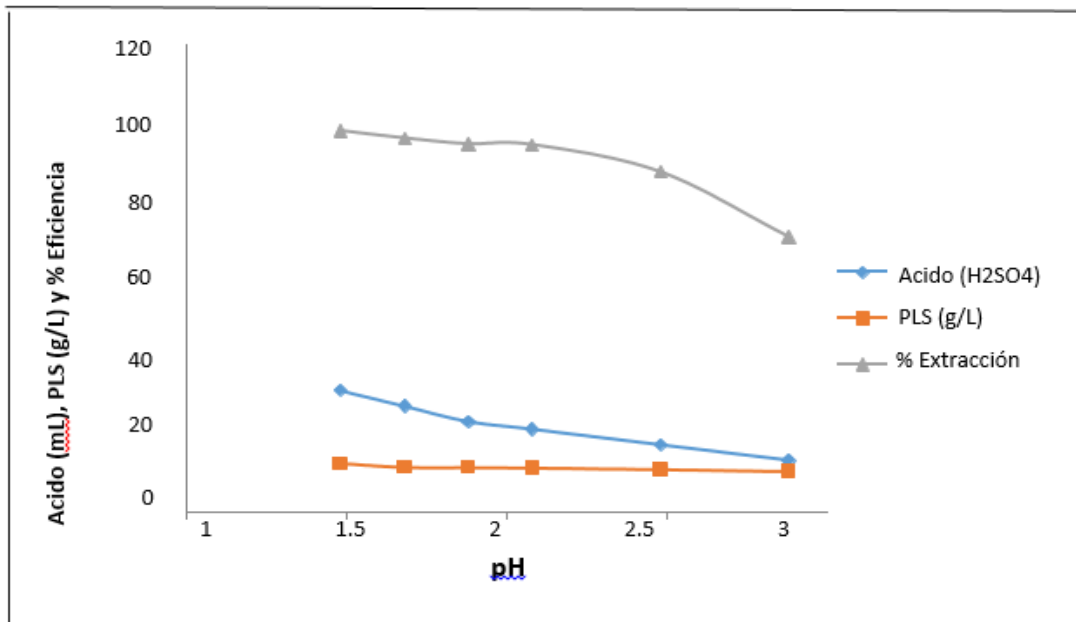


Figura 15: Variación del pH y extracción de cobre en la lixiviación de mineral oxidado de cobre.

Fuente: Propia del autor

En la Figura 16 se observa la variación del tiempo de lixiviación a diferentes pH, la extracción de cobre se incrementa a pH menores 2.

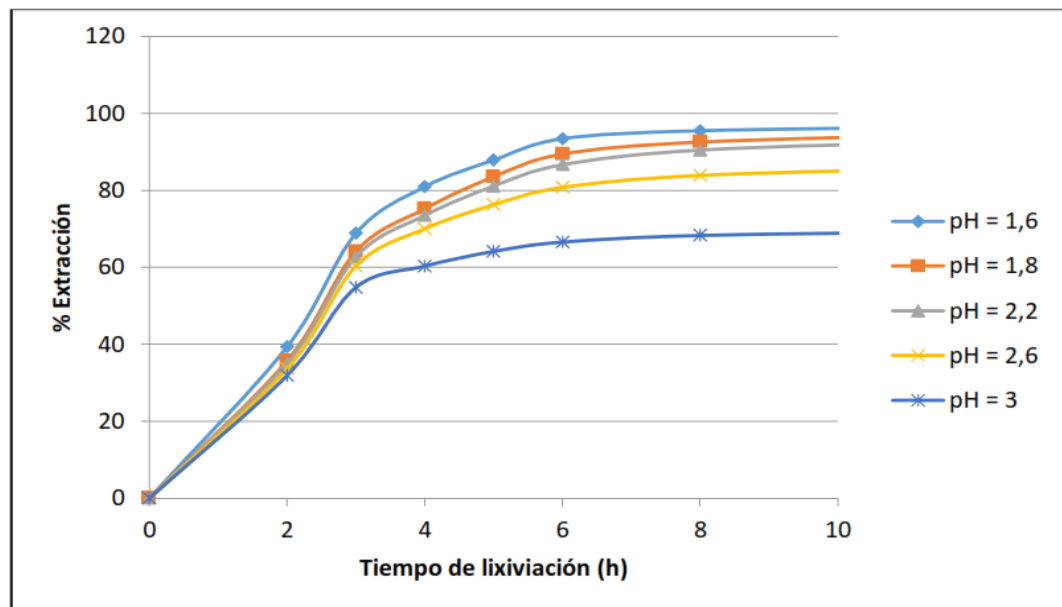


Figura 16: Variación del tiempo de lixiviación y extracción de cobre en la lixiviación de mineral oxidado de cobre

Fuente: Propia del autor

La Figura 17 muestra la variación del tiempo de lixiviación a diferentes valores de Propia del autor pH. La extracción de cobre aumenta cuando el pH es inferior a 2. Los resultados de la Figura 17 muestran que la lixiviación de cobre disminuye a medida que aumenta el pH.

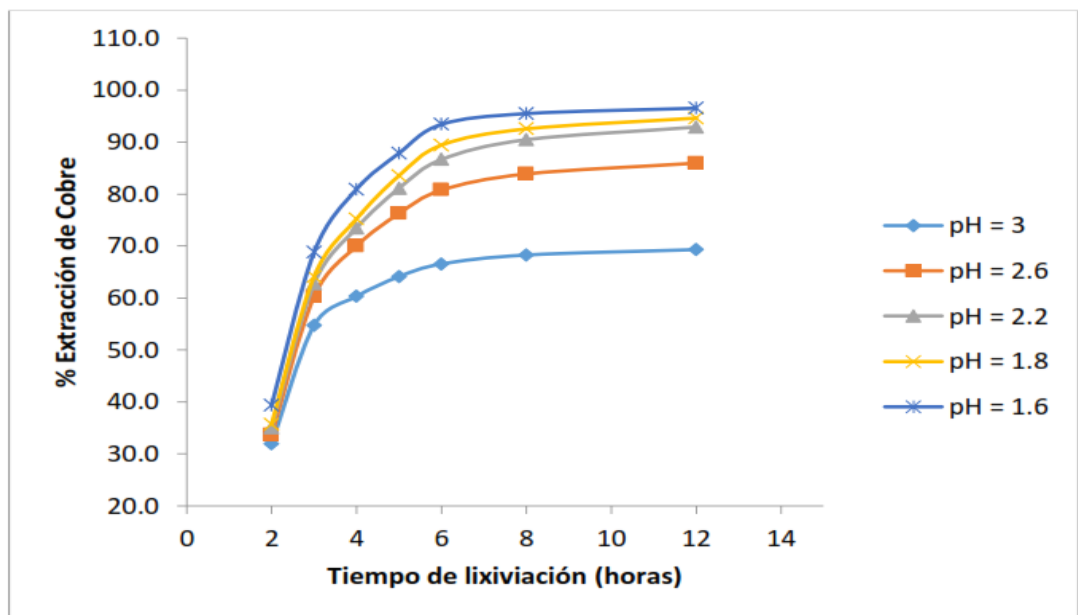


Figura 17: Cinética de lixiviación y extracción de cobre  
Fuente: Propia del autor

## 4.2. Discusión

La molienda del mineral permite la liberación de compuestos como  $\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{MgSO}_4$  en el mineral oxidado. Si bien el contenido de cobre es uniforme en el mineral molido, su distribución varía según el tamaño de las partículas que pasan por cada tamiz. Cuanto más pequeño sea el tamaño de las partículas, mayor será la superficie disponible para la reacción, lo que incrementa la velocidad de lixiviación y, por ende, mejora el rendimiento del proceso.

El aumento del contenido de cobre en las muestras que pasaron por tamices de 212 y 1180 micras podría estar relacionado con una molienda ineficaz. Sin embargo, lo más relevante es que se confirmó que la extracción (%) de cobre incrementa a medida que disminuye el tamaño de las partículas.

La eficiencia de extracción (%) para las partículas que pasaron por la malla 200, con un tamaño de 75 micras, fue mayor (92 % a 96.5 %) con un tiempo de molienda de 45 minutos. En comparación, con tiempos de molienda más cortos (15 a 30 minutos), las extracciones disminuyeron (75 % a 85 %). Esto demuestra que la molienda del mineral mejora la recuperación de cobre en soluciones de ácido sulfúrico.

Se determinó que al aumentar el pH de 1,8 a 3, la extracción de cobre varió del 69,3 % al 96,5 % (con un pH óptimo de 1,6). Por lo tanto, la lixiviación del mineral oxidado de cobre se beneficia significativamente a valores de pH más bajos.

El tiempo también tuvo un impacto positivo en la lixiviación del cobre. Los porcentajes de extracción alcanzaron el 69,3 %, 85,9 %, 92,8 %, 93,1 %, 94,6 % y 95,5 % para valores de pH de 3, 2,6, 2,2, 1,8 y 1,6, respectivamente, tras un periodo de 12 horas de lixiviación. Estos resultados evidencian que tanto el ajuste del pH como el tiempo de lixiviación son factores clave para maximizar la recuperación de cobre.

## **CONCLUSIONES**

La lixiviación del mineral oxidado de cobre se favoreció a valores bajos de pH, específicamente a 1,6. Además, el aumento en el tiempo de molienda incrementó la extracción de cobre mediante el uso de ácido sulfúrico. Así, la extracción (%) aumentó con la reducción del tamaño de partícula.

Se concluye que tanto el pH como la concentración de ácido sulfúrico influyen significativamente en la extracción de cobre, logrando altas tasas de recuperación a un pH de 1,6. Con una granulometría de 75 % bajo malla 200, un contenido de 33 % de sólidos, agitación mecánica durante 12 horas, y una concentración adecuada de ácido, se obtuvo una extracción de cobre del 96,5 %.

## RECOMENDACIONES

Con base en los resultados del presente trabajo, se recomienda realizar pruebas de lixiviación directa del mineral oxidado de cobre, en el que predomina la crisocola, utilizando ácido sulfúrico.

Además, se sugiere llevar a cabo pruebas variando el tiempo de lixiviación a más de 6 días. Esto tiene como objetivo reducir el consumo de energía durante la molienda, ya que existen partículas con granulometrías considerables.

Es importante señalar que la reacción entre ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y agua ( $H_2O$ ) es altamente exotérmica, lo que implica que libera una cantidad significativa de calor. Esta reacción debe manejarse con precaución tanto en entornos de laboratorio como en procesos industriales.

Al añadir ácido sulfúrico al agua, es crucial hacerlo lentamente y bajo agitación constante para evitar una acumulación rápida de calor y la generación de salpicaduras. Inversamente, si se añade agua al ácido sulfúrico, el riesgo de generación de calor y salpicaduras aumenta considerablemente debido a la rápida evaporación del agua en contacto con el ácido concentrado.

El control de la temperatura es esencial para prevenir la liberación excesiva de calor y para evitar daños a los recipientes y equipos de laboratorio o industriales. Además, es importante usar equipo de protección personal, como gafas de seguridad, guantes y bata, al manipular ácido sulfúrico o cualquier otro químico corrosivo.

En general, la seguridad es fundamental al trabajar con ácido sulfúrico, y se deben seguir estrictamente los procedimientos recomendados para minimizar los riesgos de accidentes y lesiones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bartlett, R. W. (1998). *Solution Mining Leaching and Fluid Recovery of Materials* (Segunda ed.). New York: Taylor & Francis.
- Brown, T.J., Bide, T., Walters, W. A., Idoine, N. E., et al., 2010. "World Mineral Production, 2005-2009," British Geological Survey.
- Cabos, Roger. (2009). *cia de minan buenaventura – potencial minero de la región de Arequipa*.
- Cortez Canaza, Fredy Efraín (2012). *diseño y construcción de una planta de ux •sx •tf -ew de mineral de cobre para la producción de 30 ton/mes de cátodos de cobre*.
- Davenport, W. G., Schlesinger, M. E., King, M. J., & Sole, K.C. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper* (5ta ed.). Oxford, UK: Elsevier Ltd.
- Domic Mihovilovic, E. M. (2004). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago de Chile.
- Davenport, W. G., Schlesinger, M. E., King, M. J., & Sole, K.C. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper* (5ta ed.). Oxford, UK: Elsevier Ltd

Davenport, W.G., King, M., Schlesinger, M., Biswas, A.K., 2002. "Extractive Metallurgy of Copper," Pergamon.

Dreier, J. E. (1999). *John E. Dreier Geologist*. Recuperado el 26 de octubre de 2014, de Copper Leaching.

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.

ICSG. (2013). *Copper Alliance*. Recuperado el 11 de noviembre de 2014, de Internation Copper Study Group: The world Copper factbook

Llorente, D. E., et al., 1991, Minería Química, Instituto tecnológico Geominero de España, Ministerio de Industria, comercio y turismo, Secretaría general de la energía y recursos naturales.

Martin L, (2007) aglomeración y curado en el proceso de lixiviación de minerales. Metsolver (simulación de procesos metalúrgicos).

Ortiz Martínez, Arturo (2012) Lixiviación Ácida de Minerales Oxidados de Cobre Crisocola con poca disolución de Fe al utilizar  $\text{KHSO}_4$

Zabala Villanueva, María Beatriz (2013) comportamiento de la recuperación de cobre en una pila de lixiviación a condiciones ambientales extremas.

Broggi, Ivan. (2015). Hidrometalurgia del cobre:

<https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/2015/04/21/hidrometalurgia-del-cobre/>

Departamento de Ingeniería Metalúrgica – Universidad de Santiago de Chile

Capítulo

14

Hidrometalurgia:

<http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/capitulo14.pdf>

## ANEXOS

### Panel fotográfico de las pruebas realizadas



