

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DE CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN
DE MINERALES DE COBRE EN COLUMNA
MEDIANTE DISTINTAS TASAS DE
RIEGO DE ÁCIDO SULFÚRICO**

TESIS

Presentada por:

Bach. Jose Rene Usecca Candro

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

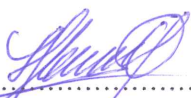
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

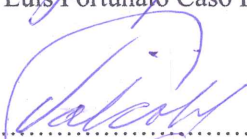
**EVALUACIÓN DE CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN
DE MINERALES DE COBRE EN COLUMNA
MEDIANTE DISTINTAS TASAS DE
RIEGO DE ÁCIDO SULFÚRICO**

Tesis sustentada y aprobada el día 02 de septiembre de 2024, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE


:
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

SECRETARIO


:
MSc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo

VOCAL


:
MSc. Daniel Jesús Zevallos Ramos

ASESOR


:
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Luis Fortunato Caso Palpa, en mi condición de asesor acreditada por Resolución de Facultad N° 8849-2024 -FAIN/UNJBG de la TESIS titulado: **EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE COBRE EN COLUMNA MEDIANTE DISTINTAS TASAS DE RIEGO DE ÁCIDO SULFÚRICO**, presentado por el bachiller **JOSE RENE USECCA CANDRO** para optar el Título de Ingeniero Metalurgista, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizada a través del software de similitud textual TURNITIN cuenta con el nivel de similitud que es permitido cuyo porcentaje es de **17 %** Por lo que, **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciado líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para la obtención de **TITULO PROFESIONAL**, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su publicación.

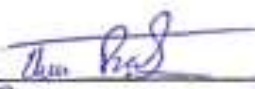
FIRMA ASESOR
Nombres y apellidos, DNI


Luis Fortunato Caso Palpa
DNI: 06452853



Huella digital

FIRMA TESISTA
Nombres y apellidos, DNI


Jose Rene Usecca Candro
DNI: 70359187



Huella digital

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en cada paso de este viaje académico, por ser mi fuente de fortaleza y obteniendo este logro académico.

Esta tesis lo dedico a mis padres, Filomena Candro Pongo, Dionicio Usecca Castillo y a mis hermanos por su apoyo en este proceso; por su paciencia y amor incondicional y cada logro en esta tesis es el reflejo todas las enseñanzas que me brindaron y la confianza que depositaron en mí.

Gracias por ser mi mayor inspiración y ejemplo en este proceso de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. Su apoyo, orientación y ánimo fueron fundamentales para llevar a cabo este proyecto. Agradezco sinceramente a Dios, familia, amigos y profesores por su valioso respaldo a lo largo de este viaje académico.

Agradezco de todo corazón a mis padres por tenerme mucha paciencia y depositar toda la confianza en mí.

Agradezco a una persona muy especial, mi madre Filomena y **Cevallos A.I.H** que ha sido fundamental en este proceso de culminar la tesis, que muchas veces me distes la fortaleza de seguir adelante hasta conseguir este gran logro, a no rendirme y poner la confianza en mí. Gracias por haberme acompañado en este camino y por creer en mí cuando yo mismo dudaba. Este logro también es tuyo porque tú me has inspirado y motivado a crecer como persona y profesional.

CONTENIDO

PÁGINAS DEL JURADO	ii
CERTIFICADO DE SIMILITUD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1.1 Antecedentes del problema	3
1.1.2 Problemática de la investigación	8
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	9
1.2.1 Problema general	9
1.2.2 Problemas específicos	9
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	9

1.4	ALCANCES Y LIMITACIONES	10
1.5	OBJETIVOS	11
1.5.1	Objetivo general	11
1.5.2	Objetivos específicos	11
1.6	HIPÓTESIS	11
1.6.1	Hipótesis general	11
1.6.2	Hipótesis específicas	12
	CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	13
2.1	ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	13
2.2	BASES TEÓRICAS	19
2.2.1	Concepto de lixiviación	19
2.2.2	Lixiviación de minerales	20
2.2.3	Cinética de lixiviación	20
2.2.4	Minerales de cobre	21
2.2.5	Lixiviación en columnas	22
2.2.6	Recuperación de cobre	23
2.2.7	Ácido sulfúrico	24
2.3	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	24
	CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	26

3.1	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	26
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO	27
3.3	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	28
3.4	TÉCNICAS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS	30
3.5	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	32
	CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1	RESULTADOS	34
4.2	DISCUSIÓN	42
	CONCLUSIONES	46
	RECOMENDACIONES	47
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
	ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz operacional de variables	29
Tabla 2 Características de riego a columnas de ácido sulfúrico	35
Tabla 3 Características de riego a columnas de ácido sulfúrico --8 mm	36
Tabla 4 Recuperación de Cu con distintas tasas de riego para 90%	37
Tabla 5 Recuperación de Cu con distintas tasas de riego	38
Tabla 6 Constante de velocidad (K)	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efecto tasa riego en la recuperación CuSAc	39
Figura 2 Cinética de Recuperación CuSs - 90% - 8mm	40
Figura 3 Cinética de Recuperación CuSs - 100% - 8mm	41

RESUMEN

El presente estudio tuvo por objetivo de determinar la tasa de riego óptima de ácido sulfúrico para la recuperación eficiente de cobre a través de la lixiviación de minerales en columna, utilizando granulometrías de 90% y 100% -8 mm. Se consideró un estudio de tipo aplicado, diseño experimental, evaluando la cinética de lixiviación de minerales de cobre mediante distintas tasas de riego de ácido sulfúrico. La población y muestra incluyó tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 [L/m²-h].

Se aplicó un diseño experimental con tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 l/h-m², y se observó que la mayor recuperación de cobre soluble en ácido (CuSAc) para el 90% -8 mm fue del 99,1% a 800 [L/m²-h], mientras que para el 100% -8 mm fue del 99,8% a 700 [L/m²-h]. Sin embargo, la recuperación total de cobre (CuT) fue más alta al 82,5% a 500 [L/m²-h] para el 100% -8 mm. La dosificación constante de ácido sulfúrico a 20 kg/t demostró ser efectiva en todas las pruebas. Las constantes de velocidad cinética indicaron que las tasas de riego más altas mejoran la velocidad de lixiviación. Con estos resultados, se concluye que ajustar la tasa de riego y considerar la granulometría del mineral son esenciales para optimizar la recuperación de

cobre, ofreciendo una guía práctica para mejorar la eficiencia en operaciones industriales.

Palabras clave: Recuperación, tasa de riego, lixiviación, cobre y velocidad.

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the optimal irrigation rate of sulfuric acid for the efficient recovery of copper through column leaching of minerals, using granulometries of 90% and 100% -8 mm. An applied study, experimental design, was considered, evaluating the leaching kinetics of copper minerals through different irrigation rates of sulfuric acid. The population and sample include irrigation rates of 500; 600; 700 and 800 [L/m²-h].

An experimental design was applied with irrigation rates of 500; 600; 700 and 800 [L/m²-h], and it was achieved that the highest recovery of acid-soluble copper (CuSAc) for 90% -8 mm was 99,1% at 800 [L/m²-h], while for 100% -8 mm it was 99,8% at 700 [L/m²-h]. However, the total copper recovery (CuT) was higher at 82,5% at 500 [L/m²-h] for 100% -8 mm. The constant dosage of sulfuric acid at 20 kg/t proved to be effective in all tests. Kinetic rate constants indicate that higher irrigation rates improve leaching rate. With these results, it is concluded that adjusting the irrigation rate and considering the granulometry of the mineral are essential to optimize copper recovery, offering a practical guide to improve efficiency in industrial operations.

Keywords: Recovery, irrigation rate, leaching, copper and speed.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la minería metalúrgica constituye una fuente principal de ingresos y desempeña un papel crucial en la economía de muchos países. Tanto la pequeña como la mediana minería dependen de la extracción de minerales, la cual se lleva a cabo mediante diversos tratamientos basados en las propiedades químicas y físicas de los materiales. Sin embargo, el sector minero enfrenta desafíos significativos, como la disminución de la ley de los minerales y los problemas ambientales asociados con los métodos de extracción (Koizhanova et al., 2023).

En países como Chile y México, la lixiviación en columna se ha identificado como un método viable para la recuperación de minerales como el cobre y el oro. Este proceso permite una mejor recuperación mediante la optimización de parámetros específicos, como la densidad de riego y el tiempo de lixiviación. No obstante, existen numerosos factores que pueden afectar la eficiencia del proceso, tales como la distribución de

las mallas de riego, las diferencias de caudales y presiones entre los emisores, y la permeabilidad de las pilas de lixiviación (Sagredo, 2021).

Además, el uso de agentes lixiviantes como el ácido sulfúrico y el cianuro ha generado preocupaciones ambientales y de salud. Mientras que el ácido sulfúrico es ampliamente utilizado debido a su bajo costo y disponibilidad, su uso intensivo puede incrementar el consumo de ácido debido a la reactividad de la ganga, afectando la rentabilidad del proceso. Por otro lado, el cianuro aunque efectivo, ha sido restringido en algunas regiones debido a su toxicidad y los impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana.

Este estudio se centra en evaluar la cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna mediante diferentes tasas de riego de ácido sulfúrico. A través de una serie de experimentos y análisis, se busca determinar la tasa de riego óptima que maximice la recuperación de cobre y minimice los efectos negativos asociados con el uso de ácido sulfúrico. Los resultados de esta investigación no solo contribuirán a mejorar los procesos de lixiviación en columna, sino que también proporcionarán una base para el desarrollo de prácticas mineras más sostenibles y eficientes.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1 Antecedentes del problema

La tendencia mundial hacia la industrialización ha incrementado la demanda de metales industriales, enfocando la atención en minerales complejos y de baja ley, así como en antiguos depósitos de desechos mineros. Los avances en técnicas de lixiviación y su aplicación en la extracción de múltiples metales, han hecho que muchas operaciones sean económicamente viables. La lixiviación, que consiste en la extracción selectiva de valores metálicos de un mineral mediante un solvente adecuado, es crucial en la metalurgia para la extracción de minerales como el oro, la plata y el cobre (Manuel et al., 2022).

Por lo tanto, en Santiago de Chile actualmente el sector minero se está enfrentando a minerales, que cada vez las leyes son muy bajas, donde sus parámetros principales perjudican su recuperación, siendo esta la distribución granulométrica de mallas y de tasa de riego, las diferencias de caudales y presiones entre sus emisores, sumándose sus causas de evaporación de esta solución lixivante y los problemas con respecto a esta permeabilidad de pad de lixiviación, (Requena, 2021). Además, en México con respecto a su recuperación de cobre y oro, es esencial que empleen una lixiviación en columna, ya que este tipo de lixiviación se encuentra más factible, teniendo en cuenta pruebas de caracterizaciones físicas y parámetros utilizados para su lixiviación en columnas, pudiendo obtener una recuperación adecuada de estos minerales como el cobre y oro, teniendo un adecuado riego de ácido sulfúrico (Leon et al., 2020).

De tal manera, en Chile en cuanto a su procesamiento de lixiviación donde se encuentran sus minerales oxidados, no brindan un correcto comportamiento en su lecho de pila, debiéndose principalmente a que su nivel de estas arcillas sea mayor al 20%, obstaculizándose en su recuperación, empleando tasas de riego de 10 a 12 [L/m²-h] y de esta

manera tener resultados mejores, siendo óptimos para estos minerales oxidados con el porcentaje alto (Ahumada, 2019).

Asimismo, en Santiago de Chile emplean tratamientos mediante pirometalurgia, donde sus concentrados se procesan mediante metodologías de electro refinación, fusión y conversión, adquiriendo una recuperación alta de cobre. Sin embargo, durante sus procesamiento adquiere cantidades grandes con respecto al dióxido de azufre, generando su preocupación al momento de incluir procesamientos de tratamiento que puede evitar que sea liberado de forma directa a su atmósfera, de tal manera que todo esto genera una gran negatividad para la industria minera, ya que produce un impacto medioambiental negativo y un bajo porcentaje de esta recuperación de cobre (Vera, 2019).

En la actualidad el país en el sector minero metalúrgico, consta en una fuente principal de ingresos de mucha importancia para el sector socioeconómico de este país, ya sea para pequeña o mediana minería, de tal manera que se trabaja con gran porcentaje de extraer minerales, donde este depende de una materia prima, aplicando a diversos tratamientos con respecto a sus propiedades químicas y físicas.

En ese sentido, la Unidad Minera Utunsa, utiliza el NaCN mediante la lixiviación en columnas para extraer minerales metálicos. Sin embargo, este agente lixivante fue restringido, ya que es un lixivante tóxico y nocivo para la salud, afectando no solo al personal, sino a diversas vidas forestales y silvestres, ocasionando impactos ambientales negativos y sociales (Arminta y Vargas, 2022).

En alguna minera en el área sur del Perú, realizan trabajos en cuanto a una extracción promedio de acuerdo al ábaco de sus modificaciones que tienen estos tajos; por ello, plantean desarrollar pruebas metalúrgicas de lixiviación en columna, donde éstas se realizan con diversas densidades de riego como 11; 15 y 20 [L/m²-h], sirviendo como base para este desarrollo de modelos de predicción, donde permite que se pueda desarrollar sus estimaciones a un corto plazo; esto se debe a que su mineralización va ir cambiando según a como se va profundizar su tajo (Cruzado y Quispe, 2021).

Para este caserío El Tingo, evidenció que aplican metodologías para su extracción de minerales, sin embargo, estas metodologías no son confiables, ya que genera un impacto ambiental negativo donde ocasiona su riesgo mayor de contaminación principalmente en tiempos de lluvias,

por lo tanto, en este caserío buscan otros tipos de alternativas con respecto a su extracción, siendo muy esencial para que se pueda reducir su contaminación (Briones y Linares, 2020).

En la Compañía Minera “Las Cenizas” su planta de óxidos procesa minerales que son oxidados de cobre, procedentes de su yacimiento Barreal Seco, llegando a un máximo tonelaje de extracción, de tal manera, que al procesar un mineral de un yacimiento nuevo denominado Doña Elba, estudian su proceder de este mineral para su fase de lixiviación a través de ensayos en columnas, encontrando factible esta elección para su procesamiento (Bertoni, 2018).

Con respecto a esta rentabilidad de su operación se encuentra establecida por este uso de ácido sulfúrico y su nivel de extraer cobre, de tal manera que con su incremento en su condensación de este ácido en sus soluciones lixiviantes promuevan su recuperación considerable de cobre, sin embargo, origina un alto consumo de ácido debido a estos productos reactivos de su ganga, repercutiendo en una forma negativa en su economía del procesamiento, es decir, que todo ello se debe a que no cuentan con una concentración adecuada de este ácido sulfúrico (Mamani, 2018).

1.1.2 Problemática de la investigación

La industria minera enfrenta desafíos significativos en la recuperación eficiente de minerales, especialmente debido a la disminución de la ley de los minerales y la variabilidad en la composición mineralógica de los depósitos. Factores como la distribución desigual del riego, la evaporación de la solución lixivante, y el alto consumo de ácido sulfúrico debido a la reactividad de la ganga afectan negativamente la eficiencia del proceso de lixiviación en columna. Estos problemas técnicos, junto con los impactos ambientales asociados al uso de agentes lixiviantes tóxicos, complican la optimización del proceso y la sostenibilidad de las operaciones mineras.

Para abordar estos desafíos, es esencial optimizar la cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna mediante la evaluación de diferentes tasas de riego de ácido sulfúrico. Esto incluye la realización de pruebas experimentales para desarrollar modelos predictivos precisos, que permitan estimar las tasas de extracción y ajustar el proceso a las condiciones específicas de cada yacimiento. La investigación busca mejorar la recuperación de cobre y minimizar los impactos económicos y

ambientales, promoviendo prácticas mineras más eficientes y sostenibles.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

¿De qué manera se evaluará la cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna mediante distintas tasas de riego de ácido sulfúrico para mejorar su recuperación de cobre?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo se realizará los flujos de riego de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 [L/m²-h]?
- ¿Cómo se evaluará la influencia de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 [L/m²-h]?
- ¿Cómo se determinará su tasa de riego óptima de ácido sulfúrico?
- ¿Cómo se identificará el modelo cinético de lixiviación bajo la tasa de riego óptimo?

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La industria minera metalúrgica es crucial para el desarrollo socioeconómico del país, ya que constituye una de sus principales fuentes

de ingresos. Esta investigación se centra en mejorar los procesos de lixiviación en columna, especialmente en relación con la tasa de riego de ácido sulfúrico, un agente lixivante fundamental para la recuperación de cobre. Dado que el cobre es un mineral de alta ley, optimizar su lixiviación en columna es vital para incrementar la eficiencia y productividad de las operaciones mineras. El desarrollo de esta investigación es esencial para mejorar la recuperación de cobre, lo que tendrá un impacto positivo en la economía y la sostenibilidad del sector minero.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

Las principales limitaciones de esta investigación incluyen el tiempo y el acceso a la información. El tiempo disponible en el laboratorio de la universidad fue insuficiente para realizar todas las pruebas experimentales necesarias sobre lixiviación en columna. Además, no se pudo obtener información detallada de una planta minera en Tacna, lo que restringió la posibilidad de comparar los resultados experimentales con datos de operaciones a escala industrial. A pesar de estas limitaciones, el estudio busca proporcionar descubrimientos e ideas valiosos y una base sólida para futuras investigaciones y optimizaciones en el proceso de lixiviación de cobre.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna mediante distintas tasas de riego de ácido sulfúrico para mejorar su recuperación de cobre.

1.5.2 Objetivos específicos

- Realizar flujos de riego de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 [L/m²-h] para su recuperación de cobre.
- Evaluar la influencia de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 [L/m²-h] para su recuperación de cobre.
- Determinar su tasa de riego óptima de ácido sulfúrico para su recuperación de cobre.
- Identificar el modelo cinético de lixiviación bajo la tasa de riego óptimo en su recuperación de cobre.

1.6 HIPÓTESIS

1.6.1 Hipótesis general

Al evaluar la cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna mediante distintas tasas de riego de ácido sulfúrico, permitirá mejorar su recuperación de cobre.

1.6.2 Hipótesis específicas

- Al realizar estos flujos de riego de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 [L/m²-h], permitirá mejorar su recuperación de cobre.
- Al evaluar la influencia de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 [L/m²-h], permitirá mejorar su recuperación de cobre.
- Al determinar su tasa de riego óptima de ácido sulfúrico, permitirá mejorar su recuperación de cobre.
- Al identificar el modelo cinético de lixiviación bajo la tasa de riego óptimo, permitirá mejorar su recuperación de cobre.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

En cuanto a los antecedentes internacionales, Hao et al. (2022) tuvieron el objetivo de optimizar sus parámetros de lixiviación y estudiar el comportamiento de la cinética de recuperación de cobre con placas de circuito. Su metodología fue descriptiva y diseño experimental. Con respecto a sus resultados mostraron que esta cinética de lixiviación se conformó al modelo de Avrami, donde su máxima eficiencia de lixiviación de cobre fue 99,47% y adquirieron con base a sus condiciones siguientes de 303,98k (30,98 °C), 2,6 mol/L H₂SO₄, 1,87 mol/L H₂O₂, su relación entre sólido-líquido es de 0,05 g/mL. Concluyendo que se empleó el RSM (rugosidad la dureza de minerales) para su optimización de parámetros de procesamiento de minerales y aclarar su cinética de lixiviación en este sistema.

Muñoz (2022), con el objetivo de analizar los cambios químicos y físicos que experimenta la ganga no metálica mientras su lixiviación del mineral de cobre, y cómo estos cambios influyen en su cinética de disolución del cobre mediante su pretratamiento químico inorgánico. Su metodología fue de diseño experimental. Los hallazgos indicaron que al pretratar el mineral en sus concentraciones de HF fue 0,2 y 2M, se logró su recuperación de cobre del 47 y 60%.

Sin embargo, sin este pretratamiento la disolución de cobre sólo alcanzó el 44%. Además, se concluyó que la emulsión de estos elementos de ganga no metálica en su pretratamiento fue del 18% para el Si y del 45% para el Al, mientras que, sin pretratamiento estos valores fueron cercanos al 0,1%.

Tao et al. (2021) con el propósito de estudiar la cinética y mecanismo de lixiviación de hierro a partir de relaves de cobre a través de ácido sulfúrico. Su metodología fue nivel descriptivo. En sus resultados, luego de 120 minutos, se lixiviaron 66,45% de hierro, junto al 65,32% de cobre y 59,95% de zinc en sus relaves bajo sus condiciones óptimas de 313k (40°C), teniendo su concentración de ácido sulfúrico de 0,50 mol L⁻¹, su velocidad de agitación fue 400 rpm y su relación sólido/líquido de

1:10, encontrándose que su lixiviación de hierro estaba controlada por su modelo de difusión de este producto con la energía de activación aparente de $10,83 \text{ kJ mol}^{-1}$. Teniendo como conclusión que durante su lixiviación, la cantidad de Fe_2SiO_4 en sus relaves de cobre se disminuyó, mientras que la de Fe_3O_4 se mantuvo estable. Además, su acumulación de CaSO_4 y SiO_2 inhibió la posterior lixiviación del hierro.

Leon et al. (2020), con el propósito de lixiviar en columnas sus materiales de diversas minas para que se evalúe estas recuperaciones de oro y plata. Su metodología fue diseño experimental. Sus resultados con respecto a las pruebas llevaron un periodo de tiempo estimado de 30 a 35 días, con respecto a la plata su recuperación dio diferencia; ya que la percolación ocasiona que la roca se agriete, para obtener una porosidad mejor, causarán sus cambios, mientras que para el oro se dieron resultados adecuados, ya que su respuesta es proporcional a su adición de cianuro. Concluyendo que la lixiviación en columnas es más factible y permitió evaluar sus efectos de granulometría, contando con su aproximación real de sus valores de recuperación metalúrgica y consumos de reactivos como agua, ácido y aditivos.

Simbrón (2020), con su propósito de delimitar sus factores que influyen en su procesamiento de biolixiviación en columnas de alguna unidad minera metalúrgica, a través del análisis químico y físico de su preparación de mineral de óxidos y sulfuros de cobre. Su metodología fue diseño experimental. Sus resultados según a estos datos adquiridos en su prueba de lixiviación teniendo en cuenta a bacterias en sus columnas, donde no observan su recuperación que sea significativa de cobre, siendo menor a 1%. Además, en su análisis granulométrico permitió realizar ciertas indicaciones en cuanto a su descarga de columnas, confirmándose una irregular repartición granulométrica. Llegando a concluir que para excluir sus formaciones, se requiere clasificar sus partículas gruesas de estas finas, lográndose mediante un procesamiento de cribado, teniendo su función de que se formen pequeños terrones con sus partículas finas, haciendo más eficaz su procesamiento de lixiviación.

Entre los antecedentes nacionales, Cruzado y Quispe (2021), con su propósito de evaluar sus actuales parámetros de esta operación, haciendo ensayos de lixiviación aumentando su densidad de riego teniendo su finalidad de que optimice y acelere su cinética de extracción de oro. Su metodología fue de diseño experimental. Sus resultados de

acuerdo a estos 3 ensayos de lixiviación en columnas, donde su 1° columna lixivió de acuerdo a sus parámetros de ejecución de esta unidad minera con su densidad de 11 [L/m²-h], esta 2° columna aumentó en 15 [L/m²-h] y esta 3° fue 20 [L/m²-h], adquiriendo extracciones de oro con el 65,21; 68,72 y 73,55%, de tal manera que sus rangos tomaron según su cinética de lixiviación; por ello, cuando su densidad de riego es menor, esta cinética fue lenta y cuando es demasiado alta, muestra canalizaciones y/o encharcamientos. Concluyendo que su densidad que optimice y acelere esta cinética de extracción de oro fue 20 [L/m²-h], reduciendo sus reactivos y ratios de lixiviación.

Aquino (2019), con su propósito de mejorar su recuperación de plata y oro a través de inyecciones en microburbujas de oxígeno en su procesamiento de cianuración en lixiviación en columnas. Su metodología fue diseño experimental. De acuerdo a sus resultados, estos ensayos de oxigenación y lixiviación en columnas, observó que estas microburbujas de oxígeno son constantes en su periodo, no afectando su fuerza y pH de cianuro en su solución, teniendo una concentración mayor en su solución de cianuro, incrementando su recuperación de plata y otro con 8,35% en este tercer ensayo de lixiviación en columnas y su incremento

considerable de recuperación en 6,28%. Obteniendo como conclusión que este oxígeno en su incremento de recuperación de plata y oro para este mineral ripio, donde su incremento mayor de recuperación de oro fue 3,7% para su cuarta prueba e incremento mayor en su recuperación de plata, siendo 1,3% para su quinta prueba.

Huaraya (2019), con su propósito de evaluar sus parámetros en ejecución en un pad de lixiviación de esta mina Cuajone, donde permita su rentabilidad integral en sus ejecuciones para la recuperación de cobre. Su metodología fue un diseño experimental. Teniendo como resultado que la cinética de lixiviación de cobre, obtuvieron tanto para el pad como en la lixiviación por columna experimental, se llegó a obtener extracciones de un 80% de cobre soluble en ácido con promedio de 55 días; de tal manera que sus parámetros de flujo de solución son de 145 m³/h y un curado 40 kg/t, mostrando esta importancia con respecto a su lixiviación de cobre, mostrándose en un diseño experimental considerando el flujo de solución. Llegando a la conclusión que al obtener el mejoramiento de su procesamiento en la lixiviación en pad con su incremento de condensación lixivante H₂SO₄ del 6-15 g/litro, obteniendo su recuperación al 80,30% de cobre.

Zuñiga (2019), con su propósito de estudiar pruebas de lixiviación en columna comprendiendo sus variables y parámetros operativos con su finalidad de lograr la mejor recuperación en su procesamiento de extracción de cobre. Su metodología fue diseño experimental. Sus resultados en cuanto a su tasa de riego se mantienen de acuerdo al porcentaje de recuperación que obtuvieron en cada tiempo dado, donde su prueba fue 14,17 l/m²-h con un tiempo adecuado de 48 días para mejorar su recuperación de cobre. Teniendo como conclusión que se logró lixiviar su mineral con el requerimiento mínimo de equipos, un costo mínimo, manteniendo una tasa de riego y pH adecuado.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Concepto de lixiviación

Esta lixiviación tiene su origen en el latín "Lixivia, -ae", un sustantivo femenino que significa legía. En el contexto metalúrgico, este proceso de lixiviación implica la disolución total o parcial de un sólido para recuperar un mineral metálico contenido en él (Montecinos, 2018). Es decir, que consta en un procesamiento de disolución de minerales que son solubles para esta mezcla que se da a través de la acción de un disolvente líquido (Ávila y Juan de Dios, 2018).

Consta en un procesamiento químico, empleándose para su extracción de minerales más preciados como materia prima; esto se emplea de manera amplia en la minería, permitiendo adquirir aleaciones con plata y oro de estos minerales en forma rocas (Flores, 2022).

2.2.2 Lixiviación de minerales

Consta en procesamientos hidrometalúrgicos basándose en procesos de lixiviación, permitiendo disolver este metal de interés para la extracción, de tal manera que dentro de sus procesamientos de lixiviación se encuentra a lixiviación in situ que se aplica cuando este mineral de cobre es de ley baja, lixiviación a montones cuando este material es apilado, lixiviación mediante percolación en vertederos cuando este material es de tamaño fino, lixiviación en bioreactores cuando utilizan bacterias, entre otros (Cháidez, 2019).

2.2.3 Cinética de lixiviación

Esta cinética de lixiviación de minerales consta en describir de manera usual, basándose en el modelo del núcleo sin que reaccione, de tal manera, que esta reacción primero sucede en la superficie de las partículas, donde esta área reacciona y se va moviendo hacia dentro del sólido, soltando su elemento sobrante que forma un área reaccionada (Muñoz, 2022).

Esto se emplea para su comprender el comportamiento de estos sistemas de reactivos, donde se dan cuenta sobre sus mecanismos, controlando su velocidad con la que suceden estas reacciones químicas implicadas, para que se determine sus especies, a que se encontrarán presentes y su viabilidad de procesamientos de lixiviación bajo algunas condiciones (Repetto, 2018).

2.2.4 Minerales de cobre

Estos se encuentran en grandes variedades, pudiéndose clasificar en sulfuros y óxidos, de tal manera que esta extracción de cobre se da a través de una vía hidrometalurgia, siendo muy eficaz para sus minerales de cobre, debiéndose a que el oxígeno del mineral pueda reaccionar con hidrógeno del ácido, permitiendo que la reacción sea más efectiva en los óxidos; por otro lado estos sulfuros de cobre se pueden lixiviar empleando el lixiviante ácido sulfúrico, pero no siendo muy aconsejable debiéndose a que el procesamiento es muy retardado, comparándose en los óxidos y mediante su formación de estas pasivas capas que van limitando su disolución de cobre (Simbrón, 2020).

Dependiendo de las características del mineral y del depósito mineral, la lixiviación por percolación se puede clasificar como:

- Lixiviación en pilas: Mineral triturado/aglomeración en plataformas de lixiviación preparadas.
- Lixiviación por botadero: corrida de mineral sin reducción de tamaño.
- Lixiviación in situ (ISL) – minería de soluciones subterráneas. Un proceso de lixiviación para solubilizar minerales de las rocas hospedantes sin eliminar el mineral deseado del yacimiento.
- Lixiviación en tinajas – Mineral triturado/concentrado en solución de lixiviación sumergida – Los materiales triturados se recogen en tinajas de concreto. La solución se filtra a través de la masa de mineral, se desborda de un vertedero diseñado y se bombea a la siguiente tina.

2.2.5 Lixiviación en columnas

Este tipo de lixiviación se realiza con ácido sulfúrico para los minerales de cobre o con cianuro de sodio para los minerales de plata y oro; es decir, que sus pruebas simulan su comportamiento al procesamiento de lixiviación en PAD, de tal manera que consta en un método que se puede acondicionar a diversas escalas de producción, siendo consecuente a su recuperación de metales que sean disueltos en su solución lixivante (SGS, 2024).

Esta lixiviación en columnas utilizan NaCN para este mineral de oro y plata, mientras que para el mineral de cobre emplean el ácido sulfúrico, constituyendo una representativa simulación para su procesamiento del PAD de lixiviación. Asimismo, este tipo de lixiviación es adaptable a escalas diferentes de su producción, estableciéndose como el método crucial para que se pueda anticipar y comprender su comportamiento de esta extracción de metales, de tal manera que este tipo de pruebas no solo pueden reproducir de manera fiel sus condiciones industriales, sino que también puede permitir ajustes para que se optimicen su rentabilidad y eficiencia en su extracción de estos minerales (SGS, 2023).

Además, es una herramienta excelente para que se evalúe su movimiento de estos contaminantes procedentes en los suelos y botaderos que son afectados mediante esta actividad minera, es decir, que esta lixiviación en columna permite su trabajo teniendo perfiles de material geológico que son semejantes a los que se encuentran en sus botaderos, siendo sometidos a esta meteorización forzada (AGQ, 2021).

2.2.6 Recuperación de cobre

Se realiza un procesamiento que se basa en lixiviar el mineral de desmonte para luego ser procesado, obteniendo soluciones que son ricas

en cobre, obteniendo como producto cobre metálico y sales de cobre; donde tiene un grado de pureza permitiendo su comercialización. Es decir, que permite una comercialización de productos que es de un agregado mayor, a partir de acopios de mineral no son rentables, esto se debe a su ley baja en cobre y sus costos alto de transporte (Reporte Minero, 2019).

2.2.7 Ácido sulfúrico

Esto se aplica mayormente en óxidos metálicos que existen en la naturaleza, pero el tiempo de residencia son altos, son capaces de disolver sulfuros de estos tipos. Es decir, que es un agente lixivante más empleado en su disolución de cobre debiéndose a costos bajos, calidad, manipulación fácil y disponibilidad. Además, la tarea principal de este ácido sulfúrico es distribuir sus condiciones requeridas para su disolución del cobre que es contenido en su mena mineral (Repetto, 2018).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Lixiviación

Definiéndose como el procesamiento de extracción de minerales solubles mediante su acción química de soluciones lixiviantes (Carreño, 2022).

Cobre

Este se clasifica dentro de minerales como el componente nativo, debiéndose a que se puede presentar en un estado puro, de forma química consta en metal de transición de este mismo color de su nombre. Asimismo, se encuentran en áreas oxidadas, vetas hidrotermales, poros y relleno de estas cavidades (Seura, 2021).

Mineral

Se basa en sustancia inorgánica natural, donde adquiere su estructura atómica y su composición definida, en circunstancias puede que se encuentre vinculados teniendo otros tipos de roca (UNAP, 2020).

Agente lixiviante

Consta en una sustancia química, donde se disuelve de una manera selectiva uno o más elementos que se puedan encontrar presentes, ya sea de manera sólido o líquido. Su elección depende de sus diversas circunstancias como estabilidad, disponibilidad química, entre otros (Lombana et al., 2018).

Porcentaje de recuperación de cobre

Esto consta en la cantidad de cobre que se pueda recuperar, expresándose en porcentaje luego de que este se haya pasado por todo su procesamiento de lixiviación (Nina, 2021).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación considerada fue aplicada. Estas se distinguen por buscar, aplicar o utilizar los conocimientos adquiridos al mismo tiempo que se adquieren nuevos conocimientos, luego de implementar y sistematizar la práctica basada en la investigación (Hernandez & Mendoza, 2018). En este estudio, se determinó la tasa de riego de ácido sulfúrico adecuado para su recuperación de cobre, de tal manera que este tipo de investigación se basa en encontrar soluciones a cuestiones o problemas específicos, donde pueden ser individuales, grupales o sociales (Ortega, 2024).

Por otro lado, el nivel fue explicativo se basa en la formulación precisa de problemas y tiene como objetivo principal explicar las causas subyacentes de los hechos, fenómenos o sucesos (Ñaupas et al., 2018). En este estudio se evaluó la cinética de lixiviación de minerales de cobre con distintas tasas de riego de ácido sulfúrico para mejorar su recuperación de cobre.

Esta investigación fue de diseño experimental, el cual se centra en recolectar datos a través de diferentes tasas de riego para ensayos de lixiviación en columnas; por lo tanto, su investigación se emplea para establecer un vínculo entre causa y efecto de alguna situación o hecho. Es decir, que se observa su efecto originado por su variable sobre la variable dependiente (Muguira, 2024).

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO

Esta población constituida para este estudio fue su base de datos históricos en planta en los flujos de riego de ácido sulfúrico con tasas de riego. Según Cabezas et al. (2018), manifiesta que la población consta en términos equivalentes refiriéndose al grupo total de componentes que conforman su dominación de disposición analítica y del cual aspiramos vaciar estas inferencias analíticas, estadísticas y conclusiones de naturaleza sustantiva o teórica.

En cuanto a la muestra, es un subconjunto de elementos extraído de una población, utilizado para realizar estudios y obtener información sobre el grupo completo (Ñaupas et al., 2018). En este estudio, la muestra utilizada fueron ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800

[L/m²-h], para su recuperación de cobre.

3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Identificación de las variables

Variable independiente: Lixiviación de minerales de cobre en columna.

Variable dependiente: Tasas de riego de ácido sulfúrico.

Caracterización de las variables

- Esta variable independiente se medirá a través del análisis físico y parámetros para el proceso de lixiviación en columna.
- Esta variable dependiente se medirá a través de la densidad de riego.

Tabla 1
Matriz operacional de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA
V.I. Lixiviación de minerales de cobre en columna	Este tipo de lixiviación se realiza con ácido sulfúrico para los minerales de cobre, es decir, que sus pruebas simulan su comportamiento al procesamiento de lixiviación en PAD (SGS, 2024).	Consta en realizar trabajos con perfiles de materiales que son geológicos, siendo semejantes a los que se encuentran en sus botaderos.	Análisis físico	Granulometría	Nominal
				Peso específico	
				Densidad	
				pH	
			Parámetros para el proceso de lixiviación en columna	Tiempo (días)	
				Granulometría	
				Peso húmedo	
% Humedad					
V.D. Tasas de riego de ácido sulfúrico	Esto se aplica principalmente a óxidos metálicos naturales, aunque en tiempos de residencia altos puede disolver sulfuros. Es un agente lixivante común para la disolución de cobre debido a su bajo costo, alta calidad, fácil manipulación y disponibilidad. (Repetto, 2018).	Es el principal parámetro para determinar su tiempo de lixiviación, siendo sometidas a pruebas de lixiviación en columnas.	Densidad de riego	500 l/hr-m ²	Ordinal
				600 l/hr-m ²	
				700 l/hr-m ²	
				800 l/hr-m ²	

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

Técnica de observación

Implica la observación de situaciones y eventos. Utilizando con su propósito de adquirir información pertinente y necesaria para una investigación, mediante la recopilación de datos en forma directa en su zona de hechos (Alvarez et al., 2017).

Guía de observación

Este dispositivo facilitará la observación directa de los eventos, permitiendo su procesamiento de esta información adquirida mediante experimentos relacionados con el proceso de lixiviación en columna, utilizando tasas de irrigación de ácido sulfúrico.

Validez de instrumentos

Esta validación de instrumentos con respecto a su recojo de datos se elaborará mediante su juicio de expertos, de tal manera que se va a consultar al grupo de expertos en su área de Ingeniería Metalúrgica, donde se les facilitará sus fichas de recolección de datos y se le explicará cada detalle el objetivo de esta investigación con el propósito de que puedan evaluar sus fichas de recolección de datos.

Por lo tanto, esto se basa en un nivel en que el instrumento

adquiere resultados que sean consistentes y razonables, es decir, que estos resultados se vinculan con alguna organización secuencial que son de cumplimiento estricto para que se pueda asegurar este instrumento validado y adquiriendo resultados que estén garantizados desde la ciencia (López et al., 2019).

Confiabilidad de instrumentos

Para que se pueda hallar este punto, se pondrán a prueba teniendo una muestra piloto, donde a través de su procesamiento se comprobará mediante unos estudios que serán estadísticas en su grado de consistencia en su aplicación de diversas tasas de riego de ácido sulfúrico, de tal forma, se va a establecer su fiabilidad en cuanto a sus fichas de recojo de datos.

Por ello, esta confiabilidad se refiere a su precisión, reproductibilidad y consistencia, siendo correspondiente a este grado de estabilidades y consistencias de valoraciones obtenidas a este largo de sus procesamientos que son continuos de valoraciones con su instrumento mismo (Manterola et al., 2018).

3.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Se aplicaron los instrumentos determinados en esta investigación, utilizando guías de observación para identificar los parámetros necesarios para el procesamiento de lixiviación en columnas. Se tuvo en cuenta el tiempo de lixiviación en columna, permitiendo una adecuada lixiviación. Además, en las pruebas experimentales se consideró la densidad de riego de ácido sulfúrico para la recuperación de cobre, adquiriendo datos sobre los porcentajes de recuperación de cobre.

Los datos obtenidos fueron procesados utilizando la información recopilada a través de las guías de observación, adquiriendo diversos datos en las pruebas experimentales en relación con el procesamiento de lixiviación en columna. Toda la información fue analizada y procesada mediante el software Excel, permitiendo obtener resultados más precisos a través de gráficos y tablas.

Este análisis e interpretación de la información empleó estadística descriptiva e inferencial. En primer lugar, la estadística descriptiva permitió presentar los resultados numéricamente y mediante gráficos que mostraron de manera visual la variación de la variable dependiente a lo largo del estudio. La estadística inferencial se utilizó para comprobar la

hipótesis, realizando primero una prueba de normalidad para determinar la distribución de la información. Con ello, se determinó el uso de una prueba paramétrica o no paramétrica, que según la naturaleza de la investigación podría ser Wilcoxon o T-Student.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Flujos de riego de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500;600; 700 y 800 L/m²-h para la recuperación de cobre.

A. Para 90% -8 mm

En la Tabla 2, se muestra las características de la tasa de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h en las cuatro columnas, con tasa de riego efectiva de 511,77; 694,90; 704,04 y 831,27 L/m²-h. El peso del mineral aglomerado cargado fue de 61,27; 62,55; 61,20 y 59,89 en las columnas 1; 2; 3 y 4 respectivamente. Cabe señalar, que la dosis de H₂SO₄ fue de 20 kg/t para todas las columnas, esta dosis de ácido sulfúrico se elige porque garantiza la aglomeración efectiva, mantiene condiciones óptimas para la disolución de cobre y maximiza la eficiencia del proceso sin incurrir en un uso excesivo del reactivo.

Tabla 2

Características de riego a las columnas de ácido sulfúrico para 90% -8 mm

Columna	COL 1	COL 2	COL 3	COL 4
Muestra	Batea 8 A (500 l/m ² -h)	Batea 8 B (600 l/m ² -h)	Batea 8 C (700 l/m ² -h)	Batea 8 D (800 l/m ² -h)
Dosis de ácido	20 kg/t	20 kg/t	20 kg/t	20 kg/t
Tasa de riego programada	500 L/m ² -h	600 L/m ² -h	700 L/m ² -h	800 L/m ² -h
Peso mineral húmedo (natural), kg	56,98	58,08	56,82	55,62
Humedad natural, % (b.s.)	1,05	1,06	1,06	1,09
Peso seco mineral cargado, kg	56,39	57,47	56,22	55,02
<u>Columna</u>	-	-	-	-
Diámetro efectivo columna, m	0,087	0,088	0,088	0,088
Área columna, m ²	0,006	0,006	0,006	0,006
Volumen inicial del lecho, m ³	0,03	0,04	0,04	0,04
Densidad aparente de carga, kg/m ³	1635	1609	1572	1542
<u>Aglomeración / Carga Columna</u>	-	-	-	-
Peso mineral aglomerado cargado, kg	61,27	62,55	61,20	59,89
Dosis H ₂ SO ₄ conc. en aglomerado, kg/t	20	20	20	20
Densidad inicial aglomerado, kg/m ³	1776	1751	1711	1678
Humedad Aglomeración, %	8	8	8	8
Tiempo reposo mineral curado, horas	3	3	3	3
<u>Operacionales</u>	-	-	-	-
Tipo de riego	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Ciclo de riego (h/día)	24	24	24	24
Tasa de Riego efectiva (l/h/m ²)	511,77	594,90	704,04	831,27
Razón de Lixiviación (m ³ /t)	7,61	8,80	10,65	12,85
Tiempo total transcurrido de LX (días)	6	6	6	6
Temperatura (°C)	00 - 00	00 - 00	00 - 00	00 - 00
Acido agregado, kg/t	71,01	77,53	90,51	105,09
Tiempo de drenaje (día)	0,50	0,50	0,50	0,50
<u>Descarga Columna</u>	-	-	-	-
Peso seco del ripio (kg)	57,73	60,33	58,07	57,13
Peso húmedo del ripio (kg)	63,22	65,59	63,66	62,30
Humedad de descarga (%)	8,69	8,01	8,77	8,30
Densidad de descarga ripios (kg/m ³)	1912	1955	1873	1778
Compactación (%)	4,16	6,11	4,99	1,82

B. Para 100% 8 mm

En la Tabla 3, se muestra las características de la tasa de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h en las cuatro columnas para 100 % -8mm, con tasa de riego efectiva de 500,85; 614,14; 700,67 y 807,30 L/m²-h.

Tabla 3

Características de riego a las columnas de ácido sulfúrico para 100% -8 mm

Columna	COL 1	COL 2	COL 3	COL 4
Muestra	Batea 8 E (500 L/m ² -h)	Batea 8 F (600 L/m ² -h)	Batea 8 G (700 L/m ² -h)	Batea 8 H (800 L/m ² -h)
Dosis de ácido	20 kg/t	20 kg/t	20 kg/t	20 kg/t
Tasa de riego programada	500 L/m ² -h	600 L/m ² -h	700 L/m ² -h	800 L/m ² -h
Peso mineral húmedo (natural), kg	57,22	56,30	56,15	54,88
Humedad natural, % (b.s.)	1,02	1,02	1,02	1,02
Peso seco mineral cargado, kg	56,65	55,73	55,59	54,33
<u>Columna</u>	-	-	-	-
Diámetro efectivo columna, m	0,087	0,088	0,088	0,088
Área columna, m ²	0,006	0,006	0,006	0,006
Volumen inicial del lecho, m ³	0,03	0,04	0,04	0,04
Densidad aparente de carga, kg/m ³	1630	1583	1571	1535
<u>Aglomeración / Carga Columna</u>	-	-	-	-
Peso mineral aglomerado cargado, kg	61,48	60,40	60,63	59,05
Dosis H ₂ SO ₄ conc. en aglomerado, kg/t	20	20	20	20
Densidad inicial aglomerado, kg/m ³	1769	1715	1713	1668
Humedad Aglomeración, %	8	8	8	8
Tiempo reposo mineral curado, horas	3	3	3	3
<u>Operacionales</u>	-	-	-	-
Tipo de riego	Continuo	Continuo	Continuo	Continuo
Ciclo de riego (h/día)	24	24	24	24
Tasa de riego efectiva (l/h/m ²)	500,85	614,14	700,67	807,30
Razón de Lixiviación (m ³ /t)	7,41	9,37	10,72	12,64
Tiempo total transcurrido de LX (días)	6	6	6	6
Temperatura (°C)	00 - 00	00 - 00	00 - 00	00 - 00
Acido agregado, kg/t	68,33	81,82	90,13	102,89
Tiempo de drenaje (día)	0,50	0,50	0,50	0,50
<u>Descarga Columna</u>	-	-	-	-
Peso seco del ripio (kg)	56,79	56,10	57,02	54,74
Peso húmedo del ripio (kg)	63,78	63,21	64,19	61,49
Humedad de descarga (%)	10,96	11,25	11,16	10,97
Densidad de descarga ripios (kg/m ³)	1851	1850	1821	1747
Compactación (%)	0,84	2,95	0,39	0,58

4.1.2 Tasa de riego óptima de ácido sulfúrico para su recuperación de cobre

A. Para 90% -8 mm

En la Tabla 4, se muestra una recuperación de CuT de 75,9%; 73,4%; 74,9% y 80,0% para tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h y la recuperación de CuSAc fue de 94,0%; 90,9%; 92,8% y 99,1%, respectivamente. Se ve favorecida la recuperación a 800 L/m²-h.

Tabla 4

Recuperación de Cu con distintas tasas de riego para 90% -8 mm

Columnas muestra 90% -8mm	Tasa de Riego	Recuperación (%)				Consumo neto	
							H ₂ SO ₄
		L/hm ²	CuT	CuSAc	CuSCN	Cu(Res)	kg/t
Batea 8 A (500 L/m ² -h)	512	75,9	94,0	71,0	43,9	27,3	
Batea 8 B (600 L/m ² -h)	595	73,4	90,9	71,3	44,6	27,7	
Batea 8 C (700 L/m ² -h)	704	74,9	92,8	66,1	44,3	28,3	
Batea 8 D (800 L/m ² -h)	831	80,0	99,1	74,4	44,5	27,3	

Nota: Para 144 horas de lixiviación.

A. Para 100% -8 mm

En la Tabla 5, se muestra una recuperación de CuT de 82,5%; 80,2%; 82,1% y 81,7% para tasas de riego de 500, 600, 700 y 800 L/m²-h y la recuperación de CuSAc fue de 92,51%; 93,49%; 99,8% y 97,67%, respectivamente. Se ve

favorecida la recuperación de Cu a 500 L/m²-h.

Tabla 5

Recuperación de Cu con distintas tasas de riego para 100% -8 mm

Columnas muestra 100% -8mm	Tasa de Riego	Recuperación (%)				Consumo neto H ₂ SO ₄
		L/h-m ²	CuT	CuSAc	CuSCN	
Batea 8 E (500 L/m ² -h)	501	82,5	92,5	58,1	0,1	29,1
Batea 8 F (600 L/m ² -h)	614	80,2	93,5	57,5	24,5	30,5
Batea 8 G (700 L/m ² -h)	701	82,1	99,8	64,7	7,7	31,5
Batea 8 H (800 L/m ² -h)	807	81,7	97,7	67,9	16,7	28,7

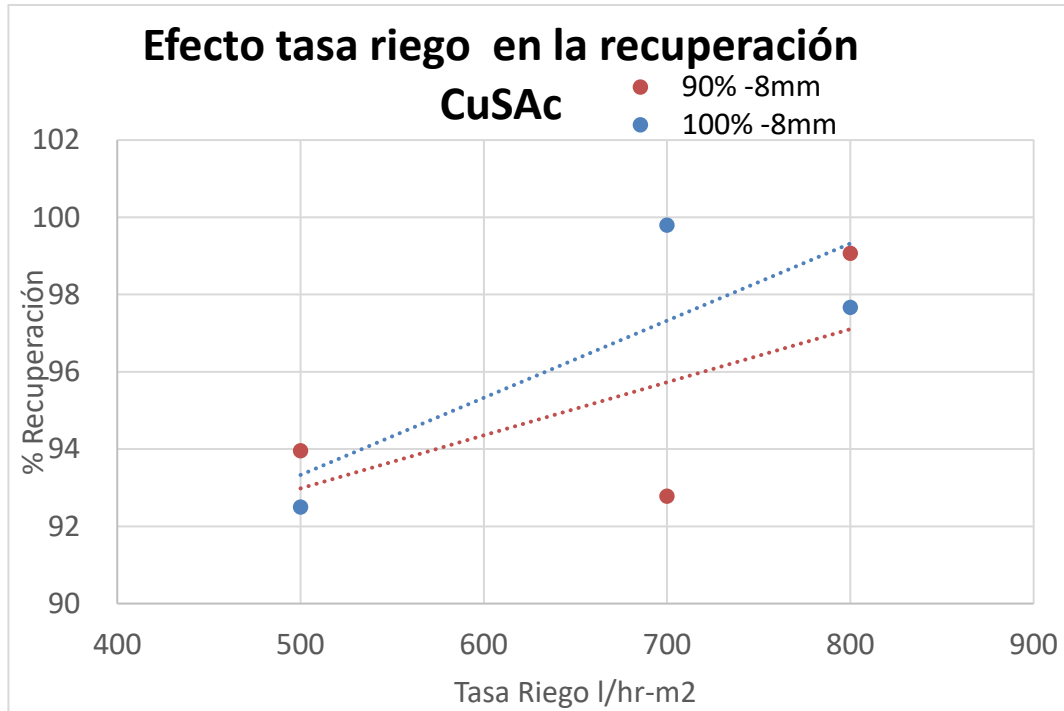
Nota. para 144 horas de lixiviación.

4.1.3 Influencia de ácido sulfúrico para su recuperación de cobre.

En la figura, se muestra la influencia que presentó el ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h para su recuperación de cobre. Para 90% -8mm la mayor recuperación de CuSAc fue a una tasa de 800 L/m²-h; mientras que, para 100% -8mm la mayor recuperación de CuSAc fue a 700 L/m²-h.

Figura 1

Efecto tasa riego en la recuperación CuSAc



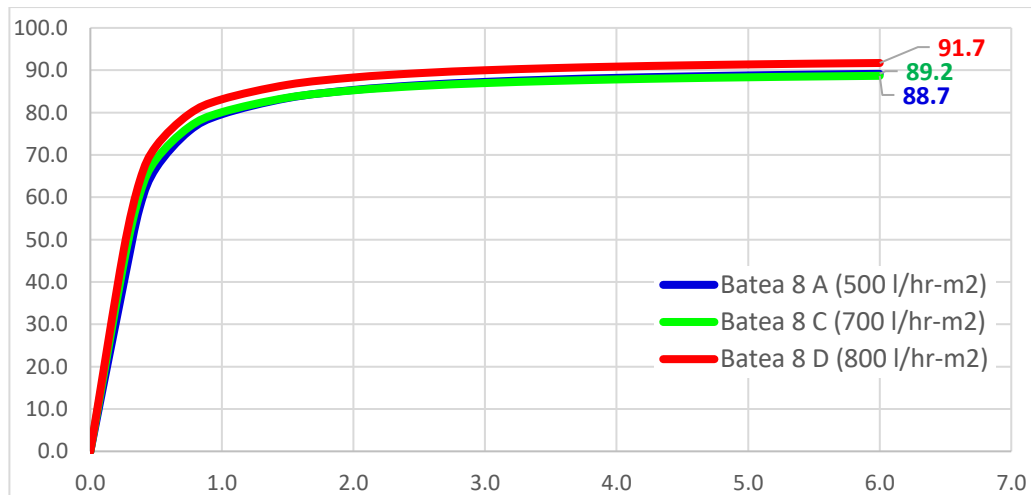
4.1.4 Modelo cinético de lixiviación bajo la tasa de riego óptimo en su recuperación de cobre.

Para la evaluación del modelo cinético se ha considerado solo para las tasas de riego de 500; 700 y 800 L/m²-h que mayor recuperación de Cu han generado. En la figura 2, se muestra la cinética de lixiviación de cobre con las constantes de velocidad detalladas en la tabla 6 para 90% - 8mm, con constante de velocidad (k) de 7,97; 8,79 y 9,08 para 500; 700 y 800

L/m²-h, respectivamente. Una buena cinética favorece una rápida disolución del cobre, lo que puede reducir el tiempo de lixiviación necesario para alcanzar la máxima recuperación. Sin embargo, una mayor tasa de riego (como 800 L/m²-h) podría implicar un mayor consumo de ácido, aunque mejora la eficiencia del proceso, permitiendo una mayor extracción en menos tiempo. Esto puede optimizar el costo operativo al acelerar el proceso, aunque debe evaluarse el balance entre la velocidad de lixiviación y el consumo de reactivos.

Figura 2

Cinética de Recuperación CuSs - 90% - 8mm



En la Figura 3, se muestra la cinética de lixiviación de cobre con las constantes de velocidad detalladas en la tabla 6 para 100% - 8mm,

con constante de velocidad (k) de 8,56; 9,02 y 9,79 para 500; 700 y 800 L/m²-h, respectivamente. En este caso, la cinética mejorada con el aumento de la tasa de riego permite una mayor eficiencia en la disolución del cobre. Favorece la reducción del tiempo de lixiviación, lo que puede ser ventajoso desde el punto de vista del costo de operación al acelerar la recuperación. No obstante, el consumo de ácido también podría aumentar a mayores tasas de riego, lo que implica un análisis costo-beneficio para determinar la tasa óptima que maximice la recuperación sin incrementar significativamente los costos.

Figura 3

Cinética de recuperación CuSs - 100% - 8mm

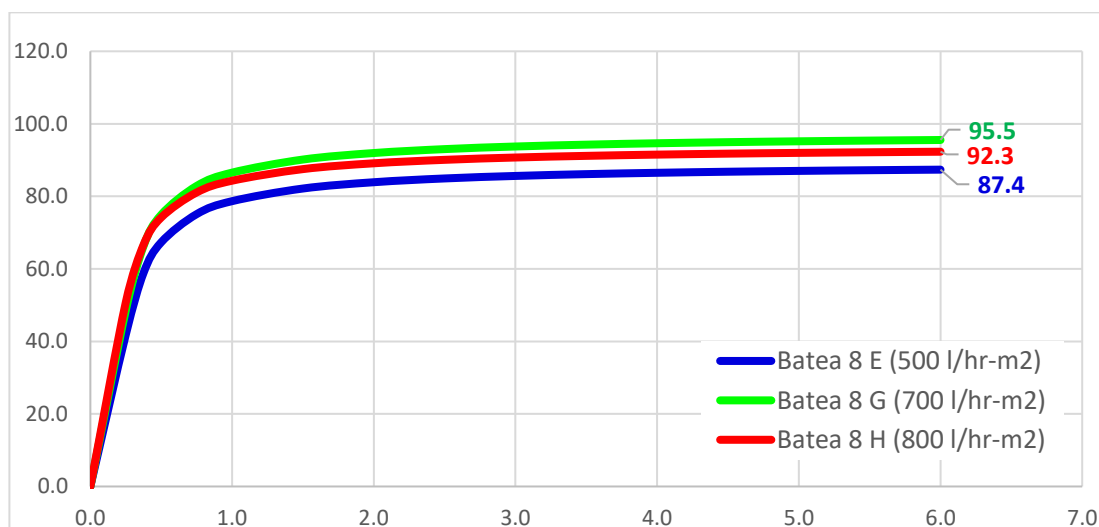


Tabla 6*Constante de velocidad (K)*

	K cinética	
	90%-8mm	100%-8mm
Batea 8 (500 L/m ² -h)	7,97	8,56
Batea 8 (600 L/m ² -h)	5,20	9,36
Batea 8 (700 L/m ² -h)	8,79	9,02
Batea 8 (800 L/m ² -h)	9,08	9,79

4.2 DISCUSIÓN

La mayor recuperación de CuT (cobre total) del 80,0% y la recuperación de CuSAc (cobre soluble en ácido) del 99,07% para 90% -8 mm y 99,8% para 100% -8 mm en una tasa de riego de 800 L/m²-h, se debe a las condiciones óptimas de lixiviación proporcionadas por esta tasa de riego. Además los resultados muestran que para ambas granulometrías, las tasas de riego programadas se mantuvieron relativamente cercanas a las tasas de riego efectivas, lo que indica una implementación efectiva del diseño experimental. En particular, la alta tasa de riego favorece la recuperación del cobre al mejorar la penetración y distribución del ácido sulfúrico en el material lixiviado, lo que facilita una mayor disolución del cobre, en relación con los antecedentes de Tao et al. (2021), quienes trabajaron con lixiviación de relaves de cobre a una

concentración de ácido sulfúrico de 0,50 mol/L, los resultados en términos de recuperación de cobre fueron inferiores comparados con los obtenidos en este estudio, especialmente en las condiciones óptimas encontradas aquí (800 L/m²-h) que lograron una recuperación significativa de CuT y CuSAc. Esto sugiere que una mayor tasa de riego puede mejorar la recuperación de cobre, tal como lo muestra nuestra investigación donde una tasa de riego de 800 L/m²-h proporcionó la mayor recuperación de Cu en ambas granulometrías. Asimismo, los resultados son consistentes con el estudio de Leon et al. (2020), donde se mencionó que las pruebas de lixiviación en columnas fueron eficaces para evaluar la recuperación de metales preciosos y mostraron que las condiciones de riego pueden impactar significativamente los resultados. En el presente estudio, el aumento de la tasa de riego mejoró la recuperación de cobre, lo cual es coherente con la idea de que un mayor flujo de lixiviación puede facilitar una mejor recuperación de metales.

Al evaluar la tasa de riego óptima de ácido sulfúrico, los resultados indicaron que para la muestra de 90% -8 mm, la mayor recuperación de CuT y CuSAc se logró con una tasa de riego de 800 L/m²-h. En contraste, para la muestra de 100% -8 mm, la recuperación óptima de CuSAc se

alcanzó a una tasa de riego de 700 L/m²-h, aunque la recuperación de CuT fue ligeramente superior a 500 L/m²-h. Comparando estos resultados con los de Cruzado y Quispe (2021), quienes encontraron que una densidad de riego mayor mejoró la cinética de extracción de oro, se puede inferir que el incremento en la tasa de riego tiene un efecto positivo similar en la lixiviación de cobre, mejorando la recuperación hasta cierto punto antes de que otros factores limitantes entren en juego. La diferencia en la tasa óptima entre las granulometrías puede deberse a la diferente compactación y distribución del ácido en el mineral, lo que afecta la eficiencia de lixiviación. Como señala Aquino (2019), quien destacó la importancia de mantener condiciones óptimas de lixiviación para maximizar la recuperación de metales. En el presente estudio, ajustar las tasas de riego permitió identificar las condiciones óptimas para la recuperación de cobre, enfatizando la importancia de la tasa de riego en los procesos de lixiviación.

El análisis de la influencia del ácido sulfúrico, mostró que para el 90% -8 mm la mayor recuperación de CuSAc se logró con una tasa de 800 L/m²-h, mientras que para el 100% -8 mm, la mayor recuperación de CuSAc se observó a 700 L/m²-h. Esto indica que la concentración y

distribución del ácido tiene un impacto significativo en la eficiencia de la lixiviación. Este comportamiento es coherente con los resultados de Muñoz (2022), donde se observó que el pretratamiento del mineral con concentraciones de HF mejoró la recuperación de cobre. De forma similar, en este estudio estudio, la adecuada distribución del ácido sulfúrico a través de una tasa de riego óptima permitió maximizar la recuperación del cobre.

La evaluación del modelo cinético para las tasas de riego óptimas (500; 700 y 800 L/m²-h) mostró que la constante de velocidad (k) aumentó con la tasa de riego, tanto para el 90% -8 mm como para el 100% -8 mm. Este incremento en la constante de velocidad sugiere una mayor eficiencia en la lixiviación a tasas de riego más altas. Comparando con los antecedentes de Hao et al. (2022), quienes encontraron que la cinética de lixiviación de cobre se ajustaba al modelo de Avrami, los resultados muestran una tendencia similar donde la constante de velocidad aumenta con mejores condiciones de lixiviación. Esto refuerza la conclusión de que optimizar las condiciones de lixiviación, como la tasa de riego, puede mejorar significativamente la cinética y por ende, la recuperación de cobre.

CONCLUSIONES

La cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna, se ve afectada por las diferentes tasas de riego de ácido sulfúrico y que es posible mejorar la recuperación de cobre mediante la optimización de estas tasas.

Los flujos de riego implementados mostraron que una mayor tasa de riego tiende a mejorar la recuperación de cobre, con una tasa de 800 l/m² -h proporcionando los mejores resultados para el 90% -8 mm y una tasa de 700 l/m²-h siendo óptima para el 100% -8 mm.

Se determinó que la concentración y distribución del ácido sulfúrico, facilitada por una tasa de riego adecuada, tiene un impacto significativo en la recuperación de cobre, corroborando que la tasa de riego óptima varía con la granulometría del mineral.

La tasa de riego óptima fue identificada como 800 l/h-m² para la muestra de 90% -8 mm y 700 l/h-m² para la muestra de 100% -8 mm, con diferencias atribuibles a la distribución y compactación del ácido en el lecho de mineral.

Se encontró que la constante de velocidad cinética aumentaba con la tasa de riego, indicando una mayor eficiencia de lixiviación con tasas de riego más altas. Esto es consistente con los modelos cinéticos previos reportados en la literatura, que muestran una mejora en la cinética de lixiviación bajo condiciones óptimas.

RECOMENDACIONES

Es crucial realizar un monitoreo constante de los parámetros operacionales, como la tasa de riego y la dosificación de ácido. Ajustes periódicos basados en las condiciones del mineral y las tasas de recuperación observadas pueden mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación.

Considerar los costos asociados con el aumento de la tasa de riego, incluyendo el consumo adicional de ácido sulfúrico y los posibles impactos en la infraestructura. Realizar un análisis de costo-beneficio puede ayudar a decidir la viabilidad económica de las recomendaciones técnicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGQ (2021). Columnas de lixiviación para evaluar la contaminación en minería. Recuperado de <https://agqlabs.cl/2021/01/14/columnas-de-lixivacion-contaminacion-mineria/>
- Aguilar, J. (2020). Tipología familiar y cuidado parental (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/31768/1/BJCS-TS-324.pdf>
- Ahumada, D. (2019). Procedimiento de lixiviación en minerales oxidados con alto porcentaje de arcillas (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. Recuperado de <https://repositorio.usm.cl/server/api/core/bitstreams/04ab7d8f-069b-4b61-8708-36cafb443dea/content>
- Alvarez, J., Camacho, S., Martínez, J., Solano, G., Rodríguez, E. y López, J. (2017). Métodos básicos en la investigación cualitativa, la observación. XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan, 5(10). Recuperado de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/xikua/article/view/2528>

- Aquino, P. (2019). Influencia de microburbujas de oxígeno en el proceso de cianuración en columnas para mejorar la recuperación de oro y plata en minera La Zanja-Compañía de Minas Buenaventura (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. Recuperado de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10543/Aquino_ap.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Arminta, L. y Vargas, D. (2022). Extracción de oro del mineral aurífero por lixiviación en columna con reactivos bromuro de potasio y ácido bromhídrico en la unidad minera Utunsa-Anabi-Haquira Apurímac (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco. Recuperado de https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6755/253T20220267_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ávila, M. y Juan de Dios, X. (2020). Lixiviación de Minerales Oxidados Mediante Diseño Factorial, para la Extracción de Cobre a Nivel Laboratorio (Tesis de pregrado). Universidad Nacional “José Faustino Sánchez Carrión”, Huacho. Recuperado de <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/2134/A>

VILA%20BERNAL%20MARCELO%20ALEX.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Bertoni, J. (2018). Pruebas de lixiviación en columnas de mineral oxidado Doña Elba, Compañía Minera las Cenizas, Taltal (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, México. Recuperado de http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3163/4/Tesis_Pruebas_de_lixivacion_en_columnas_de_mineral.Image.Marked.pdf

Briones, J. y Linares, N. (2020). Recuperación de cobre a partir de la malaquita mediante la electrodeposición en el caserío El Tingo, distrito de Hualgayoc, Cajamarca-2020 (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca. Recuperado de https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/27756/JHERALD%20JAMES%20BRIONES%20CASTA%20EDA%20Y%20NANCY%20NOEM%20LINARES%20CHIL%20N_PDF_TOTAL.pdf?sequence=2

Cabezas Mejía, E., Andrade Naranjo, D., & Torres Santamaria, J. (2018). Introducción a la metodología de la investigación científica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15424/1/Introduccion%20>

a%20la%20Metodologia%20de%20la%20investigacion%20cientifica.pdf

Carreño, M. (2022). Estudio de lixiviación de minerales oxidados y sulfurado de cobre como alternativa a procesos de concentración en contexto de escasez hídrica (Tesis de pregrado). Universidad de Talca, Chile. Recuperado de <http://dspace.otalca.cl/bitstream/1950/13287/3/2022A001153.pdf>

Cháidez, J. (2019). Estudio cinético y termodinámico de la recuperación de oro, plata y cobre de minerales sulfurosos (Tesis de doctorado). Instituto Tecnológico de Saltillo, México. Recuperado de <https://saltillo.tecnm.mx/tecnologico/posgrado/doctoradomateriales/tesis/TESIS-DCI-2019-08.pdf>

Cruzado, E. y Quispe, M. (2021). Optimización de la producción de oro, mediante el incremento de la densidad de riego para la lixiviación en una unidad minera en la zona sur del Perú (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. Recuperado de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/17888/Quispe_pm.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Flores, O. (2022). Lixiviación. Recuperado de <https://mineriaenlinea.com/glosario/lixiviacion/>

- Hao, J., Wang, X., Wang, Y., Wu, Y. y Guo, F. (2022). Optimizing the leaching parameters and studying the kinetics of copper recovery from waste printed circuit boards. *ACS OMEGA*, 7(4), 3689-3699. Recuperado de <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c06173>
- Hernandez, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación las rutas cuantitativas, cualitativas y mixta. McGrawHill.
- Huaraya, N. (2019). Evaluación de los parámetros de operación de un pad de lixiviación de cobre (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa. Recuperado de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/8edd0b32-8da9-418e-a7fb-85057f5f6aa6/content>
- Koizhanova, A., Kenzhaliyev, B., Magomedov, D., Kamalov, E., Bakrayeva, M., & Bakrayeva, A. (2023). Study of Factors Affecting the Copper Ore Leaching Process. *ChemEngineering*, 7(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/chemengineering7030054>
- Leon, F., Orpineda, L., Alatríste, E., Loera, O., Sánchez, M., Macías, M. y Cruz, S. (2020). Lixiviación en columnas para evaluar la recuperación de Au y Ag en el mineral “Los Ricos” (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Parral, México. Recuperado de

<http://www.utparral.edu.mx/documentos/minas/4%20REPORTE%20TECNICO%20LIXIVIACION%20EN%20COLUMNAS%20PARA%20EVALAR%20LA%20RECUPERACION%20DE%20Au%20Y%20Ag%20EN%20EL%20MINERAL%20LOS%20RICOS.pdf>

Lombana, L., Saavedra, A. y Correa, F. (2018). Variables influyentes en el proceso de lixiviación para la recuperación de metales contenidos en lodos galvánicos. *Revista Semilleros: Formación Investigativa*, 4(1), 1-12. Recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7739/1/6122928-2018-1-IQ.pdf>

López, R., Avello, R., Palmero, D., Sánchez, S. y Quintana, M. (2019). Validación de instrumentos como garantía de la credibilidad en las investigaciones científicas. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 48(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0138-65572019000500011

Mamani, R. (2018). Estudio de la cinética de consumo de ácido sulfúrico y la lixiviación de minerales oxidados de cobre (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna. Recuperado de <https://repositorio.unjbg.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f39f6602-5b43->

4816-91b4-7fc79cc3e84e/content

Manterola, C., Grande, L., Otzen, T., García, N., Salazar, P. y Quiroz, G. (2018).

Confiabilidad, precisión o reproducibilidad de las mediciones. Métodos de valoración, utilidad y aplicaciones en la práctica clínica. *Revista Chilena de Infectología*, 35(6).

https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-10182018000600680&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Manuel , S., Edelmira , G., Robles, P., Castillo, J., & Toro, N. (2022). Copper

Mineral Leaching Mathematical Models—A Review. *Materials*, 15(5).

Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8911429/>

Montecinos, J. (2018). Lixiviación por agitación de concentrado de cobre

proveniente de la Compañía Minera San Gerónimo en Ambientes Ácidos (Tesis de pregrado). Universidad Andrés Bello, Santiago de Chile.

Recuperado de

<https://repositorio.unab.cl/server/api/core/bitstreams/16817e9e-97f2-4e67-9576-5c97e08dec3c/content>

Muguira, A. (2024). Diseño de investigación. Elementos y características.

Recuperado de <https://www.questionpro.com/blog/es/disenio-de-investigacion/>

Muñoz, C. (2022). Estudio de la disolución de la ganga no metálica en la lixiviación de minerales de cobre y su influencia sobre la cinética de recuperación de cobre (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/186875/Estudio-de-la-disolucion-de-la-ganga-no-metalica-en-la-lixiviacion-de-minerales-de-cobre-y-su.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Muñoz, C. (2022). Estudio de la disolución de la ganga no metálica en la lixiviación de minerales de cobre y su influencia sobre la cinética de recuperación de cobre. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/186875/Estudio-de-la-disolucion-de-la-ganga-no-metalica-en-la-lixiviacion-de-minerales-de-cobre-y-su.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nina, H. (2021). Evaluación del proceso de lixiviación por agitación de minerales oxidados auríferos de la comunidad Chalhuanca-Apurímac (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna. Recuperado de <https://repositorio.unjbg.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3492d3ca->

2b7a-4bcf-b55b-05e9af73e7b8/content

- Ñaupas, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2018). Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis. Bogota: Ediciones de la U.
- Ortega, C. (2024). Investigación aplicada: Definición, tipos y ejemplos. Recuperado de <https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-aplicada/>
- Repetto, C. (2018). Evaluación de tecnologías para lixiviación futura de sulfuros división Radomiro Tomic-Codelco (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Chile. Recuperado de http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3381/4/Tesis_Evaluacion_de_tecnologias_para_lixivacionImage.Marked.pdf
- Reporte Minero (2019). Conoce el proceso de recuperación de cobre que podría beneficiar a pequeños mineros. Recuperado de <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2019/12/conoce-el-proceso-de-recuperacion-de-cobre-que-podria-beneficiar-a-pequenos-mineros>
- Requena, D. (2021). Optimización de malla de riego en pila de lixiviación (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago de Chile. Recuperado de

<https://repositorio.usm.cl/server/api/core/bitstreams/cb52b9b5-0057-48fa-8c91-4eeb9bb99b69/content>

Sagredo, A. (2021). Alternativa tecnológica para el ahorro de agua y aumento en la recuperación de cobre en procesos hidrometalúrgicos. Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/182258/Alternativa-tecnologica-para-el-ahorro-de-agua-y-aumento-en-la-recuperacion-de-cobre-en-procesos-hidrometalurgicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Seura, C. (2021). Cobre nativo. Recuperado de <https://museomineralogico.userena.cl/cobre-nativo/>

SGS (2024). Pruebas de lixiviación: el rol que cumplen para identificar la rentabilidad del mineral. Recuperado de <https://www.sgs.com/es-pe/noticias/2024/01/pruebas-de-lixivacion>

SGS. (29 de diciembre de 2023). El rol de las pruebas de lixiviación para maximizar la rentabilidad de los minerales. Recuperado de <https://www.sgs.com/es-pe/noticias/2023/12/que-son-pruebas-lixivacion>

Simbrón, I. (2020). Factores que limitan la extracción de cobre en el proceso experimental de biolixiviación en columnas (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Recuperado de

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/17312/Informe.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Tao, L., Wang, L., Yang, K., Wang, X. (2021). Leaching of iron from copper tailings by sulfuric acid: behavior, kinetics and mechanism. RSC Advances, 11(10), 5741-5752.
https://www.researchgate.net/publication/348988298_Leaching_of_iron_from_copper_tailings_by_sulfuric_acid_behavior_kinetics_and_mechanism

UNAP (2020). ¿Qué es un mineral? Recuperado de <https://www.unap.com>

Vera, I. (2019). Determinación de la cinética de lixiviación por agitación de un relave de cobre (Tesis de pregrado). Universidad Andrés Bello, Santiago de Chile. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/288917262.pdf>

Zuñiga, L. (2019). Estudio de las pruebas de lixiviación en columna en una minera en la región de Moquegua (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa. Recuperado de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/65501246-fc43-44d0-b3be-b5fb05158c79/content>

ANEXOS

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>Problema general: ¿De qué manera se evaluará la cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna mediante distintas tasas de riego de ácido sulfúrico para mejorar su recuperación de cobre?</p> <p>Problemas específicos: - ¿Cómo se realizará los flujos de riego de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h? - ¿Cómo se evaluará la influencia de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h? - Cómo se determinará su tasa de riego óptima de ácido sulfúrico? - Cómo se identificará el modelo cinético de lixiviación bajo la tasa de riego óptimo?</p>	<p>Objetivo general: Evaluar la cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna mediante distintas tasas de riego de ácido sulfúrico para mejorar su recuperación de cobre.</p> <p>Objetivos específicos: - Realizar flujos de riego de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h para su recuperación de cobre. - Evaluar la influencia de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h /hr-m² para su recuperación de cobre. - Determinar su tasa de riego óptimo de ácido sulfúrico para su recuperación de cobre. - Identificar el modelo cinético de lixiviación bajo la tasa de riego óptimo en su recuperación de cobre.</p>	<p>Hipótesis general: Al evaluar la cinética de lixiviación de minerales de cobre en columna mediante distintas tasas de riego de ácido sulfúrico permitirá mejorar su recuperación de cobre.</p> <p>Hipótesis específicas: - Al realizar estos flujos de riego de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h, permitirá mejorar su recuperación de cobre. - Al evaluar la influencia de ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h, permitirá mejorar su recuperación de cobre. - Al determinar su tasa de riego óptima de ácido sulfúrico, permitirá mejorar su recuperación de cobre. - Al identificar el modelo cinético de lixiviación bajo la tasa de riego óptimo, permitirá mejorar su recuperación de cobre.</p>	<p>Variable Independiente: Lixiviación de minerales de cobre en columna.</p> <p>Variable Dependiente: Tasas de riego de ácido sulfúrico.</p>	<p>Tipo de investigación: Aplicada</p> <p>Diseño: Experimental</p> <p>Enfoque: Cuantitativa</p> <p>Población: Es la base de datos históricos de planta en los flujos de riego de ácido sulfúrico en tasas de riego.</p> <p>Muestra: La muestra utilizada en este proyecto fueron ácido sulfúrico en tasas de riego de 500; 600; 700 y 800 L/m²-h para su recuperación de cobre.</p> <p>Técnica: Observación</p> <p>Instrumento: Guía de observación</p>

ANEXO 2. MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA
V.I. Lixiviación de minerales de cobre en columna	Este tipo de lixiviación se realiza con ácido sulfúrico para los minerales de cobre, es decir que sus pruebas simulan su comportamiento al procesamiento de lixiviación en PAD (SGS, 2024).	Consta en realizar trabajos con perfiles de materiales que son geológicos, siendo semejantes a los que se encuentran en sus botaderos.	Análisis físico	Granulometría	Nominal
				Peso específico	
				Densidad	
			Parámetros para el proceso de lixiviación en columna	pH	
				Tiempo (días)	
				Granulometría	
V.D. Tasas de riego de ácido sulfúrico	Esto se aplica mayormente en óxidos metálicos que existen en la naturaleza, pero en tiempos de residencia que son altos, son capaces de disolver sulfuros de estos tipos, es decir que es un agente lixivante más empleado en su disolución de cobre, debiéndose a costos bajos, calidad, manipulación fácil y disponibilidad (Repetto, 2018).	Es el principal parámetro para determinar su tiempo de lixiviación, siendo sometidas a pruebas de lixiviación en columnas.	Densidad de riego	Peso húmedo	Ordinal
				% Humedad	
				500 l/h-m ²	
				600 l/h-m ²	
				700 l/h-m ²	
800 l/h-m ²					

ANEXO 3. INSTRUMENTOS

Guía de observación del análisis físico del mineral de cobre

Parámetros	Valores
Granulometría	90%-8mm; 100%-8mm
Peso específico (g/ml)	1,635; 16,301
Densidad	1,776; 1,760
pH	-

Guía de observación de parámetros para el proceso de lixiviación en columna

Tiempo (días)	Granulometría	Peso Húmedo	% Humedad
5,5	90%-8mm	56,875	1,065
5,5	100%-8mm	56.387	1,02

Guía de observación del porcentaje de recuperación de cobre

Tempo (días)	Tasas de riego de ácido sulfúrico				% de recuperación de cobre
	500 l/hr-m ²	600 l/hr-m ²	700 l/hr-m ²	800 l/hr-m ²	
5,5	90%-8mm				94,2
	512	595	704	831	
5.5	100%-8mm				95,87
	501	614	701	807	

ANEXO 3.1

Homogenizado y curado de mineral



Anexo 3.2

Curado de mineral para lixiviar



Anexo 3.3

Pesado de mineral para determinar cuándo de mineral va a entrar en la columna



Anexo 3.4

Carguío de mineral para lixiviar



Anexo 3.5

Primera horas de rebose de solución PLS por el método de lixiviación por columna



Anexo 3.6

Muestra de soluciones de las primeros 8 h. de muestreo



Anexo 3.7

Área de trabajo de lixiviación por columna

