

Empleo de soluciones de ácido sulfúrico-sulfato de hierro (III) y oxígeno para optimizar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida

Luis Alberto Peña Quijandría
Manuel Antonio Puemape Guía
Luis Andrés Franco Quispe
Teresa Oriele Barrios Mendoza
Isis Cristel Córdova Barrios
Rosa Elena Chávez Apcho
Dennis Iván Sánchez Bravo
Jhohans Mikhail Ochante Alejos

CIDE
EDITORIAL



**Empleo de soluciones de ácido sulfúrico-sulfato de hierro (III)
y oxígeno para optimizar la recuperación del cobre a partir de
minerales refractarios mediante lixiviación ácida**

Empleo de soluciones de ácido sulfúrico-sulfato de hierro (III) y oxígeno para optimizar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida

Autores

Luis Alberto Peña Quijandría

Manuel Antonio Puemape Guía

Luis Andrés Franco Quispe

Teresa Oriele Barrios Mendoza

Isis Cristel Córdova Barrios

Rosa Elena Chávez Apcho

Dennis Iván Sánchez Bravo

Jhohans Mikhail Ochante Alejos

Empleo de soluciones de ácido sulfúrico-sulfato de hierro (III) y oxígeno para optimizar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquiera otro, sin la autorización previa por escrito al Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE).

Copyright © 2025
Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador
Tel.: + (593) 04 2037524
<http://www.cidecuador.org>

ISBN: 978-9942-679-47-5

<https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.LP2679475>

Dirección editorial: Lic. Pedro Misacc Naranjo, Msc.
Coordinación técnica: Lic. María J. Delgado
Diseño gráfico: Lic. Danissa Colmenares
Diagramación: Lic. Alba Gil
Fecha de publicación: marzo, 2025



Guayaquil – Ecuador

La presente obra fue evaluada por pares académicos experimentados en el área.

Catalogación en la Fuente

Empleo de soluciones de ácido sulfúrico-sulfato de hierro (III) y oxígeno para optimizar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida / Luis Alberto Peña Quijandría, Manuel Antonio Puemape Guía, Luis Andrés Franco Quispe, Teresa Oriele Barrios Mendoza, Isis Cristel Córdova Barrios, Rosa Elena Chávez Apcho, Dennis Iván Sánchez Bravo, Jhohans Mikhail Ochante Alejos. - Ecuador: Editorial CIDE, 2025.

102 p.: incluye tablas, figuras; 17,6 x 25 cm.

ISBN: 978-9942-679-47-5

1. Cobre 2. Minerales refractarios 3. Lixiviación ácida

Dedicatoria

Este trabajo de investigación está dedicado a todas las personas que han sido fundamentales en este proceso académico y profesional. En primer lugar, a nuestras familias, por su apoyo incondicional, su paciencia y amor, que nos han impulsado a seguir adelante en cada momento de dificultad.

A nuestros asesores y colegas investigadores, por su valiosa orientación, colaboración y compromiso en cada etapa del estudio. Sus conocimientos y consejos han sido esenciales para la realización de este proyecto, y nos han inspirado a seguir avanzando en nuestra búsqueda de soluciones innovadoras.

A todos los estudiantes, profesionales y personas interesadas en la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible, en especial aquellos que se dedican al área de la minería, quienes con su trabajo diario contribuyen al bienestar de las generaciones futuras.

Este trabajo es también un tributo a la ciencia, a la investigación y a todos aquellos que, con esfuerzo y dedicación, buscan generar cambios significativos en nuestro entorno.

Agradecimiento

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta investigación. Agradecemos profundamente el apoyo y la orientación de nuestros asesores, cuya experiencia y conocimiento fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Igual reconocimiento también a la Editora CIDE, por su colaboración en la mejora de la presentación final de este estudio, lo que contribuyó a su claridad y calidad.

Finalmente, nuestra gratitud a nuestras familia y amigos, cuyo constante respaldo y comprensión fueron esenciales para superar los desafíos a lo largo de este proceso.

Semblanza del autor

Luis Alberto Peña Quijandría

<https://orcid.org/0000-0002-5334-1234>

luis.pena@unica.edu.pe



Docente nombrado en la categoría de principal a dedicación exclusiva en la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" con el grado académico de Magister en Gestión Ambiental, dedicado a la investigación y a la realización de asesorías en procesos metalúrgicos y ambientales mineros.

Manuel Antonio Puemape Guía

<https://orcid.org/0000-0003-2655-5293>

mpuemape@unica.edu.pe



Docente nombrado en la categoría de Asociado a tiempo completo Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" con el grado académico de Doctor en Gestión Ambiental, dedicado a la investigación en temas de Seguridad y Ambientales Mineros. Realiza asesoría en Simulación de Procesos, Optimización de procesos metalúrgicos; diseño, instalación, montaje y puesta en marcha de las operaciones de Plantas Metalúrgicas. Con experiencia en evaluación de estudios de procesos metalúrgicos adecuados para diversos minerales.

Luis Andrés Franco Quispe

<https://orcid.org/0000-0001-7195-511X>
luis.franco@unica.edu.pe



Docente nombrado en la categoría de asociado de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" con el grado académico de Magister en Gestión Ambiental, dedicado a la investigación en temas ambientales y mineros. Así mismo manejo de software y docente en Informática.

Teresa Oriele Barrios Mendoza

<https://orcid.org/0000-0002-6466-7766>
oriele.barrios@unica.edu.pe



Docente Principal de la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica con más de 30 años de experiencia en la docencia, docente Investigador, con maestría Investigación y Docencia Universitaria-UIGV. Doctor en Administración-UIGV. Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible-UIGV. Investigaciones publicadas en revistas Indexadas y no Indexadas. Investigación ganadora en IV Concurso Nacional del Libro Universitario-2009 en la ANR. Asesora de Investigaciones Ganadoras de Concurso de Tesis de Posgrado de Maestría 2008 y Doctorado 2012 de Pedro Córdova Mendoza en la ANR.

Isis Cristel Córdova Barrios

<https://orcid.org/0000-0002-3569-2671>
isis.cordova@unica.edu.pe



Ing. Ambiental y Sanitaria egresada de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga–Ica. Magister Scientiae en Ingeniería Química con mención en Seguridad Industrial y Ambiental, otorgado por la Universidad Nacional del Altiplano-Puno. Además, es egresada del Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Universidad Inca Garcilaso de la Vega. Docente Auxiliar de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria - UNICA. Docente Investigador – UNICA. Es especialista en Sistemas Integrado de Gestión y Auditora Ambiental. Expositor Nacional e Internacional. Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas

Rosa Elena Chávez Apcho

<https://orcid.org/0009-0006-1760-489X>
rosa.chavez@unica.edu.pe



Contadora Pública Colegiada, Servidora Administrativa, nombrada de la Universidad Nacional “San Luis Gonzaga”. Con estudios de Maestría Contabilidad y Tributación y cursando estudios de Doctorado.

Dennis Iván Sánchez Bravo

<https://orcid.org/0009-0001-7883-1459>
sanchez84bravo@gmail.com



Ingeniero titulado de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" con el grado dedicado a la docencia universitaria y docencia en el nivel secundaria, realiza investigación científica en el área de procesos metalúrgicos y mineros con evaluación de estudios de procesos metalúrgicos adecuados para diversos minerales.

Jhohans Mikhail Ochante Alejos

<https://orcid.org/0000-0003-3034-3672>
mikhailochantealejos@hotmail.com



Ingeniero Civil de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" con CIP N°178765, candidato al grado académico de Maestro en Gestión de la Construcción en la Universidad Tecnológica del Perú. Cursando Master en Cálculo de Estructuras de Obras Civiles en Universidad a Distancia de Madrid UDIMA y EADIC, Diplomatura en Diseño Estructural por la PUCP, Certificado en Gestión BIM para proyectos en el Sector Público por la UPC; dedicado a la investigación en temas construcción, ambientales y mineros. Experiencia como Gerente de obra, Residente de obra, jefe de supervisión de obra y Monitor de obras en saneamiento, carreteras, edificaciones en obras públicas y privadas. Actualmente ocupa el cargo de Monitor y seguimiento de Obras en la Sub Gerencia de Liquidación y Supervisión del Gobierno Regional de Ica. Consultor de diseño y cálculo de planos estructurales y planos sanitarios en edificaciones y viviendas. Dominio de metodología Lean Construcción y BIM. Modelador y Coordinador BIM en proyectos de construcción usando Software BIM como Revit, Navisworks, Synchro Pro, Costos con Presto, Cypecad, Tekla Structure y Etabs.

Índice

Dedicatoria	5
Agradecimiento	6
Semblanza de los autores	7
Prólogo	14
Introducción	16

Capítulo 1 **Minerales refractarios como** **fuentes opcionales de cobre**

1.1 Minerales que contienen cobre	22
1.1.1 Minerales oxidados (Óxidos)	22
1.1.2 Minerales sulfurados (Sulfuros)	22
1.2 Minerales refractarios como fuentes de cobre	22
1.2.1 Ley de un mineral. Definiciones básicas	25
1.3 Explotación del cobre en Perú	26
1.4 La explotación del cobre y su efecto en el ambiente	28
1.5 Legislación ambiental general a considerar en la actividad minera en Perú	29

Capítulo 2

La lixiviación ácida como proceso para la extracción del cobre

2.1 El proceso de lixiviación ácida	39
2.1.1 Sulfato de hierro (III) como agente oxidante	40
2.1.2 Papel del oxígeno en la lixiviación	40
2.1.3 Ácido sulfúrico como medio lixivante	41
2.1.4 Cinética de lixiviación	41
2.2 Etapas del proceso de lixiviación	42
2.2.1 Pretratamiento o acondicionamiento	42
2.2.2 Lixiviación o extracción sólido-líquido	43
2.2.3 Separación extracto	43
2.2.4 Purificación del extracto	44
2.2.5 Recuperación final del metal	44
2.3 Lixiviación de minerales de cobre	46
2.4 Selección de agentes lixivantes	47

Capítulo 3

Lixiviación ácida con ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno para optimizar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios

3.1 Descripción general de la localidad seleccionada para realizar el estudio	52
---	----

3.1.1 Ubicación geográfica de área	52
3.1.2 Geología del área	54
3.1.3 Clima	54
3.2 Entramado metodológico	57
3.2.1 Definición de las variables	57
3.2.2 Disposición de monitoreo	60
3.2.3 Análisis de efluentes	61
3.2.4 Equipos y tecnología de monitoreo	61
3.2.5 Consideraciones ambientales y sociales	62
3.3 Tipo, nivel y diseño de investigación	62
3.4 Población y muestra	64
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	66
3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos	69
3.7 Estimaciones de las concentraciones de las soluciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno para la optimización de la recuperación de cobre	71
3.7.1 Condiciones para la lixiviación dinámica	72
3.7.2 Procedimiento	73
3.8 Resultados	76
3.8.1 Discusión de resultados, aspectos adicionales del proceso	82
3.9 Conclusiones	85
3.10 Recomendaciones	88
Referencias bibliográficas	92
Anexo	99

Prólogo

El siglo XXI ha sido testigo de una transformación sin precedentes en la ciencia y la tecnología, impulsada por la necesidad de optimizar los recursos naturales y mitigar los impactos ambientales de la actividad industrial. En este contexto, la hidrometalurgia se ha consolidado como una disciplina clave para la extracción sostenible de metales, permitiendo recuperar elementos valiosos de fuentes cada vez más complejas.

La presente investigación sobre el *Empleo de soluciones de Ácido Sulfúrico-Sulfato de Hierro (III) y Oxígeno para optimizar la recuperación del Cobre a partir de minerales refractarios mediante Lixiviación Ácida* se inscribe en esta tendencia de innovación y sostenibilidad. La creciente demanda de cobre, esencial para la electrificación global y las tecnologías renovables, ha puesto en evidencia la necesidad de desarrollar procesos más eficientes y ambientalmente responsables para su obtención.

El nuevo milenio ha traído consigo desafíos ineludibles, como el agotamiento de minerales de alta ley, el endurecimiento de las normativas ambientales y la necesidad de reducir la huella de carbono en la minería. Frente a estos retos, el desarrollo de métodos de lixiviación ácida optimizados con agentes oxidantes, como el sulfato de hierro (III) y el oxígeno, ofrece una solución prometedora para

mejorar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios, minimizando el consumo energético y los residuos generados.

Este estudio, enmarcado en los avances contemporáneos de la ciencia de materiales y la metalurgia extractiva, no solo contribuye a la optimización de procesos industriales, sino que también se alinea con los principios de la economía circular y la transición hacia una minería más limpia. En una era caracterizada por la digitalización y la inteligencia artificial aplicada a la optimización de procesos, la integración de nuevas estrategias químicas y tecnológicas en la lixiviación de cobre representa un paso crucial hacia la minería del futuro.

La presente obra es una invitación a la comunidad científica y a la industria a repensar los métodos tradicionales de extracción, incorporando enfoques innovadores y sostenibles que respondan a las exigencias del siglo XXI. En este sentido, el conocimiento aquí desarrollado se convierte en una valiosa contribución para la ciencia y la ingeniería, orientada hacia un aprovechamiento más racional y eficiente de los recursos minerales en beneficio del desarrollo global.

Introducción

La creciente demanda mundial de cobre, impulsada por su amplio uso en tecnologías avanzadas y energías renovables, ha puesto de relieve la importancia de desarrollar métodos eficientes para su extracción. Sin embargo, una parte considerable de las reservas de cobre se encuentra en minerales refractarios, que presentan desafíos técnicos debido a su baja reactividad y a la encapsulación del metal en matrices complejas. Esto ha incentivado la investigación de tecnologías innovadoras que permitan una recuperación eficiente y sostenible del cobre, maximizando la utilización de estos recursos limitados. En este contexto, la lixiviación ácida combinada con agentes oxidantes se presenta como una alternativa prometedora para superar estas barreras.

El uso de soluciones de ácido sulfúrico y sulfato de hierro (III) como agentes lixiviantes, complementadas con oxígeno, representa una técnica innovadora que aprovecha las propiedades oxidativas del sulfato férrico para disolver el cobre de los minerales refractarios. Este enfoque es particularmente efectivo en minerales como la calcopirita, donde los métodos convencionales han demostrado ser ineficientes. La inclusión de oxígeno como catalizador del proceso mejora significativamente la cinética de lixiviación, permitiendo una mayor

recuperación del metal en menor tiempo y reduciendo el impacto ambiental al minimizar el consumo de reactivos químicos.

La optimización de este proceso no solo responde a las necesidades de la industria minera, sino que también aborda los desafíos ambientales asociados a la minería tradicional. En particular, la lixiviación ácida con agentes oxidantes ofrece una reducción en la generación de residuos sólidos y emisiones contaminantes, alineándose con los principios de minería sostenible. Además, su implementación podría disminuir la dependencia de procesos pirometalúrgicos, que son intensivos en energía y emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero. Este cambio hacia tecnologías más limpias es crucial en el marco de los objetivos globales de desarrollo sostenible.

En este escenario los antecedentes epistémicos e investigativos que decantaron en la compilación de este libro, no solo busca contribuir al desarrollo técnico y económico de la minería del cobre, sino también establecer un precedente en la integración de innovación y sostenibilidad en el sector extractivo. A través de la investigación y optimización del empleo de soluciones de ácido sulfúrico-sulfato de hierro (III) y oxígeno, se pretende no solo aumentar la recuperación de cobre, sino también promover una industria minera más eficiente, respetuosa con el medio ambiente y capaz de adaptarse a las demandas de un mundo en transición hacia un futuro más sostenible.

En el transcurso de su desarrollo, el texto abarca aspectos fundamentales del proceso de recuperación de este importante mineral distribuyendo su contenido en tres capítulos:

1. Minerales refractarios como fuente opcional de cobre.
2. La lixiviación ácida como método de extracción de cobre.
3. Lixiviación ácida con Ácido sulfúrico, Sulfato de Hierro (III) y oxígeno para optimizar la recuperación del Cobre a partir de minerales refractarios.

El desarrollo de cada uno de esos capítulos se fundamentó en conocimientos generales y experiencias investigativas previas, con la finalidad de abordar y profundizar en esta importante metodología para la extracción del cobre, contribuyendo con su calibración, evaluando la eficacia del proceso en condiciones reales en una explotación minera de la provincia del Nasca del departamento de Ica, Perú.

CAPÍTULO 1

Minerales refractarios como fuente opcional de cobre



Minerales refractarios como fuente opcional de cobre

Antes de adentrarnos en el mundo de la extracción del cobre y de la importancia de los minerales refractarios como su fuente natural, conoceremos algunos aspectos básicos sobre este elemento, así como su valor, especialmente para la economía del Perú. De igual manera se consideró necesario en este apartado, revisar algunos conceptos básicos que serán utilizados en los capítulos posteriores, sin obviar los efectos ambientales de la explotación de cobre y la Legislación Ambiental del Perú que regula esta actividad minera.

El cobre es un elemento químico metálico, no ferroso, de color rojizo, blando, maleable y dúctil que junto a la plata y el oro forman la denominada "**familia del cobre**", destacados por poseer las características de ser los mejores conductores naturales de electricidad, históricamente han sido los más utilizados en el proceso de acuñación de monedas. En la actualidad, este metal es el más utilizado con estos

finés en función de los costos asociados tanto para fabricar cables, como para producir monedas.

El Cobre fue uno de los primeros metales usado por las antiguas civilizaciones para fabricar diferentes utensilios. Hoy en día su importancia se pierde de vista, por sus múltiples usos en las telecomunicaciones (generadores, telefonía, ordenadores fibras ópticas, entre otras); en las industrias de la construcción, automovilística; fabricación de maquinarias industriales; agricultura, por citar algunas. Su gran utilidad se deriva de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y eléctricas entre las que se encuentran:

- **Excelente conductor de la electricidad y el calor**, de allí su uso en la fabricación de cables y otros componentes eléctricos. De igual manera gracias a su capacidad de conductor térmico es utilizado en sistemas de calefacción, radiadores, ordenadores y en la telefonía móvil.
- **Gran ductilidad y maleabilidad**, lo que facilita trabajar con él en los procesos de soldaduras, de allí su masivo uso en diferentes industriales y en la forja.
- **Resistente a la corrosión ambiental**, es uno de los metales más resistente a la corrosión, es decir, no es fácil de oxidar o deteriorarse.

- **Antibacteriano**, por esta propiedad la Agencia de Protección Ambiental, considera este metal como muy prometedor para combatir diferentes patógenos.

1.1 Minerales que contienen cobre

Son diversos los minerales que contienen cobre. Puede encontrarse acompañado de otros metales, entre ellos el oro y la plata. Principalmente se distinguen los siguientes minerales con diferentes grados de pureza de cobre:

1.1.1 Minerales oxidados (Óxidos): se originan en la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados, fueron los primeros tipos de cobres en ser explotados por los seres humanos. El cobre oxidado se encuentra en varios minerales entre ellos los siguientes: Malaquit, Azurita, Crisocola, Cuprita y Brochantita

1.1.2 Minerales sulfurados (Sulfuros): suelen ser mezclas de sulfuros de cobre y hierro, combinados con compuestos de diferentes elementos, algunos de los más importantes: Calcopirita, Covelita Bornita, Enargita y Tetraedrita. La mayor parte de cobre del mundo se obtiene de los Sulfuros.

1.2 Minerales refractarios como fuente de cobre

Para el siglo XX dado sus múltiples usos, su alta demanda que condujo a una explotación intensiva, se ocasionó que muchos de los

yacimientos con minerales de gran pureza, de alta Ley se agotaran y sean cada vez más difíciles de conseguir, dando paso a la explotación de las reservas mundiales de cobre de baja ley, esto significa que este recurso ya no es tan fácil de obtener por lo que ha sido necesario explorar áreas de menor riquezas dado que aquellos yacimientos superficiales hoy ya se encuentran prácticamente agotados en el planeta, siendo necesario buscarlos, en la mayoría de los casos, dispersos en grandes áreas y mezclados con rocas estériles y otros minerales.

De acuerdo a lo antes señalado, la mayoría de las reservas mundiales de cobre se encuentra en fases sulfuradas: la estructura de dichos minerales los torna especialmente refractarios a la lixiviación oxidativa debido a la formación de capas pasivas de fases estables. Por esa razón, a la fecha el método más económico para extraer sus valores metálicos es mediante la fundición, un proceso de elevada temperatura que produce polvos y dióxido de azufre tóxico; se debe estabilizar este último compuesto, como ácido sulfúrico, para que el proceso cumpla con las normas ambientales.

A nivel internacional, diversos estudios han explorado y desarrollado alternativas para optimizar la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios, particularmente aquellos que contienen calcopirita, lo que plantea la necesidad de mejorar los métodos para la obtención del Cobre ya que estos minerales se caracterizan por su resistencia a los métodos convencionales de extracción por la presencia

de capas de pasivación durante los procesos de disolución. Estas capas limitan la transferencia de masa y reducen la recuperación del cobre. Ghahremaninezhad et al. (2010) reportaron que, la disolución de calcopirita en soluciones ácidas es controlada por reacciones electroquímicas y es sensible al potencial redox del sistema, lo que resalta la importancia de combinar ácidos y oxidantes adecuados.

El problema radica en la necesidad de enfrentar los retos técnicos y económicos que presenta la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios. Estos minerales, por su composición y características físicas, suelen tener bajas leyes metálicas y estructuras complejas, lo que dificulta la extracción eficiente del metal.

A nivel económico y ambiental, la problemática es aún más compleja. El procesamiento de minerales refractarios suele requerir mayores insumos de reactivos y energía, lo que incrementa significativamente los costos operativos. Además, el uso intensivo de químicos puede derivar en la generación de residuos sólidos y líquidos con potencial impacto ambiental. En este sentido, la implementación de un sistema que integre ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno no solo debe ser técnicamente eficaz, sino también sostenible desde una perspectiva ambiental y económica (Ahtiainen et al., 2021). Esto es crucial en un contexto global que exige una minería más responsable y alineada con los objetivos de desarrollo sostenible.

Por lo tanto, la investigación que sirvió de base para la elaboración de este texto, busca abordar estos desafíos identificando y

optimizando los parámetros críticos de un sistema de lixiviación ácida basado en ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno. Este enfoque tiene el potencial de mejorar significativamente la recuperación de cobre de minerales refractarios como la calcopirita, mientras se minimizan los impactos ambientales y económicos asociados. Al hacerlo, se contribuirá al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles para la industria minera (Nicol et al., 2024).

1.2.1 Ley de un mineral. Definiciones básicas

El término “mineral” se refiere al material con valor económico que es extraído de la explotación minera y enviado a la planta de procesamiento. La calidad del mineral es expresada según su concentración de la sustancia o metal de interés, en % contenido o ‘ley’.

- **Ley de un mineral.** La ley en minería (en inglés, ore grade), es una medida que describe el grado de concentración de recursos naturales valiosos (como los metales o minerales) presentes en una mena (Herrera, 2017). La calidad del mineral es expresada según la concentración del metal de interés contenido, lo que se expresa en porcentaje de ese elemento o metal (Por ejemplo % Fe en el caso de un mineral de hierro).
- **Ley de cobre (Copper grade):** es el porcentaje de cobre que encierra una determinada muestra. Cuando se habla de una ley

del 1% significa que en cada 100 kilogramos de roca mineralizada hay 1 kilogramo de cobre puro.

- **Ley de corte (Cut-off grade):** corresponde a la ley más baja que puede tener un cuerpo mineralizado para ser extraído con beneficio económico, puede definirse como la calidad mínima o contenido mínimo aceptable de una sustancia en un elemento o compuesto dado, a partir del cual pasará a ser considerada como mineral, con la consideración antes indicada.

Todo el material que tiene un contenido de cobre sobre la ley de corte se clasifica como mineral y es enviado a la planta para ser procesado, en tanto que el resto, que tiene un contenido de cobre más bajo, se considera estéril o lastre y es descartado.

1.3 Explotación del cobre en Perú

Desde el año 2019, Perú es el segundo productor más grande de cobre, representando el 12% de la producción mundial con aproximadamente 2,46 millones de toneladas métricas (García y Pantigoso, 2020); siendo superado únicamente por Chile con el 28% de la producción mundial (Servicio Geológico de los Estados Unidos [USGS], 2020). Además, hay que tener en cuenta que Perú, junto con Australia, poseen las mayores reservas mundiales de cobre; alcanzando entre ambos los 87 millones de toneladas métricas (USGS, 2020) (Andújar et al., 2021).

La actividad minera desempeña, por tanto, un papel crucial en la economía peruana al generar el 65 % de divisas del país a través de sus exportaciones a China, India, Estados Unidos, Canadá, entre otros.

De acuerdo con el Boletín Estadístico Minero (BEM) del Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2024) las exportaciones mineras de cobre y oro registran notable incremento en mayo de 2024, las cifras consolidan a la minería como principal motor de la balanza comercial del Perú. En cuanto a las exportaciones de cobre, en mayo de 2024 alcanzaron US\$ 2,079 millones, un ascenso de 9.0% frente a mayo de 2023 (US\$ 1,906 millones), a raíz de la variación favorable interanual en el precio (+16.2%) y a pesar de una disminución en el volumen embarcado debido a los retrasos en los envíos por la sequía del canal de Panamá.

En el caso de la región de Ica Perú, la actividad minera viene impulsando su desarrollo productivo, en la zona se localizan importantes explotaciones mineras de hierro, plomo, zinc, estaño, oro, plata y cobre resaltando la explotación de este último una de las actividades que más ha influido en los últimos años en este crecimiento. De allí la importancia de la selección de esta localidad como zona de interés para realizar la investigación considerada como premisa de esta obra. El cobre es uno de los metales más importante para Ica, junto con la explotación del hierro le ha permitido consolidarse como una de las regiones de mayor producción minera del Perú.

1.4 La explotación del cobre y su efecto en el ambiente

Si bien el sector minero cumple un rol en la transición energética del Perú, este camino puede estar acompañado de un alto riesgo de degradación ambiental y posibles impactos en las comunidades y territorios aledaños, sino se toman las medidas adecuadas para prevenirlos o minimizarlos. Son muchos los casos documentados donde la actividad minera causa serios daños ecológicos. Las corrientes de desechos generados durante el proceso de extracción minera requieren de un manejo adecuado, para evitar se contaminen las fuentes de aguas superficiales y subterráneas. De igual manera es indispensable se realice un control de las emisiones generadas especialmente las partículas PM10 que pueden ser respirables.

Por otra parte el cobre es un micronutriente esencial, los seres vivos lo necesitan en dosis muy bajas para sus procesos vitales, en el caso del hombre para la formación de glóbulos rojos, mantenimiento de las células nerviosas y del sistema inmunológico, entre otras, pero en muy bajos requerimientos, en consecuencia la disponibilidad del cobre para la mayoría de los seres vivos debe ser limitada a unos muy bajos niveles para evitar diferentes grados de toxicidad en función de los requerimientos de cada organismo. Las personas ocupacionalmente expuestas pueden desarrollar síntomas asociados a toxicidad de cobre que incluyen náuseas, vómitos, daños renales y

hepáticos. Sin embargo, es importante resaltar que la intoxicación por cobre es poco frecuente en personas sanas.

De allí la importancia de prácticas adecuadas para prevenir impactos no deseados, por ejemplo, los vertidos con altos contenidos de cobre en el suelo, puede ocasionar disminución en la biomasa y actividad metabólica bacteriana, afectando la fertilidad del suelos, adicionalmente, este metal puede acumularse y solo las plantas resistentes a su presencia podrán sobrevivir, esto es una seria amenaza para la diversidad biológica, el equilibrio ecológico e incluso para la actividad agrícola, dado a que son pocos los cultivos que pueden desarrollarse en suelos con alta presencia de este elemento. En el caso de los animales pueden absorber concentraciones de cobre nocivas para su salud, afectando a los rebaños.

1.5 Legislación ambiental general a considerar en la actividad minera en Perú.

Los riesgos potenciales que conlleva la actividad minera pueden ser minimizados con medidas de protección ambiental, para lo cual la Normativa ambiental del Estado juega un papel insoslayable para el seguimiento y control de esta importante actividad económica. Al respecto se describen las principales normas relacionadas con el sector y que fueron consideradas en la investigación que inspiró la realización de este texto:

- **Ley general del ambiente (Ley N° 28611):** esta ley peruana establece los principios, derechos y obligaciones relacionados con la protección ambiental. Es relevante para la investigación, ya que exige que las actividades mineras y metalúrgicas, como la lixiviación ácida, minimicen los impactos ambientales y garanticen el manejo adecuado de sustancias químicas como el ácido sulfúrico y el sulfato de hierro (III).

- **Reglamento de gestión y manejo de residuos sólidos (Decreto Supremo N°014-2017-MINAM):** regula el manejo adecuado de residuos sólidos peligrosos generados en actividades industriales, como los provenientes de lixiviación, asegurando que sean tratados y dispuestos de manera segura para evitar la contaminación del suelo y del agua.

- **Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería (Decreto Supremo N°024-2016-EM):** establece lineamientos para la manipulación segura de productos químicos, como el ácido sulfúrico, en actividades mineras. Es crucial para proteger a los trabajadores y el medio ambiente.

Normas específicas de control de emisiones y efluentes

Estándares de calidad ambiental para agua (ECA Agua, Decreto Supremo N°004-2017-MINAM): es relevante para asegurar que las

descargas líquidas resultantes del proceso de lixiviación cumplan con los límites máximos permitidos, especialmente en parámetros como pH, sulfatos, y contenido de metales pesados.

Ley de recursos hídricos (Ley N°29338): regula el uso y protección de los recursos hídricos, exigiendo permisos específicos para utilizar agua en procesos industriales y controlar las descargas en cuerpos de agua.

Normativa internacional relacionada

ISO 14001:2015: la implementación de un Sistema de Gestión Ambiental según esta norma internacional puede ser útil para la gestión sostenible del proceso de lixiviación y el cumplimiento de los requisitos legales aplicables.

CAPÍTULO 2

Lixiviación ácida como proceso para la extracción del cobre



La lixiviación ácida como proceso para la extracción del cobre

La Lixiviación (Leaching) es un proceso hidrometalúrgico mediante el cual se provoca la disolución de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en etapas posteriores mediante electrólisis. Este proceso se aplica a las rocas que contienen minerales oxidados, ya que estos son fácilmente atacables por los ácidos.

Durante el proceso de lixiviación los compuestos metálicos que conforman el mineral son transferidos en forma selectiva del estado sólido al líquido gracias a un reactivo que está la solución lixivante y que reacciona muy bien con el componente metálico que se quiere extraer.

En la actualidad, las técnicas de lixiviación han avanzado significativamente gracias al desarrollo de equipos sofisticados diseñados para satisfacer las demandas específicas de la industria minera. Estos avances permiten abordar las particularidades de la formación de los yacimientos, el tipo de explotación y la calidad del mineral, centrándose en la extracción de metales valiosos a partir de minerales más complejos y con baja concentración de ley. Como resultado, se procesan volúmenes cada vez mayores de material mineral considerando la premisa de reducir el tiempo de lixiviación mientras se alcanza una recuperación aceptable y una concentración adecuada de la solución rica. Esto requiere el uso de equipos e instrumentación cada vez más autónomos, que, además contribuyan a la disminución de costos.

Los reactivos usados en la lixiviación se seleccionan por su selectividad y costo, aunque últimamente se considera también su efecto en el medio ambiente. Estos reactivos son diversos; funcionan como tales los ácidos inorgánicos, los ácidos orgánicos, algunas bases sobre todo las alcalinas, pero en los procesos industriales de lixiviación de minerales se emplea con mayor frecuencia el ácido sulfúrico bajo condiciones previamente establecidas de presión, tamaño de partícula, composición y concentración del solvente, tiempo de contacto, temperatura, velocidad de agitación, etc.

En el caso de los minerales de cobre, el medio de lixiviación utilizado consiste en una solución acuosa de ácido sulfúrico, siendo la

lixiviación ácida el método más empleado para recuperar este elemento a partir de minerales oxidados. Estudios previos han demostrado que la rentabilidad de este proceso depende en gran medida de una correcta selección del nivel de concentración de ácido en la solución lixivante.

Mediante pruebas experimentales es posible determinar el consumo óptimo de ácido para maximizar la eficiencia del proceso. Por ello, el objetivo principal de la investigación a ser presentada en el Capítulo 3 giró en torno a la identificación y análisis de los mecanismos que intervienen en la cinética del consumo de ácido y la disolución del cobre en un mineral, considerando diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en la solución lixivante.

El uso de ácido sulfúrico como medio lixivante ha sido ampliamente adoptado en la industria minera debido a su efectividad en minerales oxidados. Sin embargo, su aplicación en minerales refractarios requiere la incorporación de agentes oxidantes, como el sulfato de hierro (III) y el oxígeno, que potencian la reactividad del sistema. Estudios realizados por Hiroyoshi et al. (2001), demostraron que el sulfato férrico actúa como un oxidante eficiente, permitiendo una mayor disolución del cobre en condiciones controladas. No obstante, el reto radica en optimizar las condiciones operativas para minimizar el consumo de reactivos, mejorar la cinética de lixiviación y garantizar la sostenibilidad del proceso.

En una variante, la lixiviación ácida con ácido sulfúrico, combinada con agentes oxidantes como el sulfato de hierro (III) más la adición del oxígeno, ha mostrado resultados prometedores. Por ejemplo, Chen et al.(2018), sentaron las bases del uso de soluciones férricas para mejorar la disolución de cobre, señalando que el sulfato de hierro (III) actúa como un agente oxidante efectivo para romper las capas pasivadoras formadas en minerales como la calcopirita. Este enfoque ha sido refinado en las últimas décadas, permitiendo mayores eficiencias en procesos de lixiviación a nivel industrial.

En investigaciones lideradas por Sinclair y Thompson (2015), fue demostrado que la adición de oxígeno en sistemas de lixiviación ácida mejora considerablemente la cinética de disolución del cobre. En su estudio, los autores evaluaron las condiciones óptimas de presión y temperatura para maximizar la oxidación de los minerales refractarios, logrando aumentos significativos en las tasas de recuperación. Este avance es especialmente relevante para depósitos de baja ley que tradicionalmente han sido considerados poco rentables.

Un enfoque destacado ha sido el desarrollo de tecnologías que integran lixiviación ácida con oxidantes químicos y biológicos. Los investigadores Tanne y Schippers (2019) evaluaron la interacción entre el ácido sulfúrico, el sulfato férrico y microorganismos oxidantes para mejorar la extracción de cobre. Este estudio subrayó la importancia de combinar técnicas químicas y biológicas para abordar la complejidad

de los minerales refractarios, logrando una recuperación del cobre superior al 90% bajo condiciones controladas.

Asimismo, en Chile, líder mundial en la producción de cobre, se han llevado a cabo importantes avances en lixiviación de minerales refractarios. A tal efecto Watling (2013) realizó evaluaciones sobre el efecto combinado del sulfato de hierro (III) y oxígeno en condiciones de lixiviación ácida, destacando que el control de la acidez y la concentración de hierro en la solución lixivante son factores críticos para evitar la formación de residuos insolubles. Sus resultados reforzaron la viabilidad técnica de estos procesos en yacimientos de baja ley, como los presentes en el norte del país.

Szymanowski (2015) realizó una revisión exhaustiva de los avances en hidrometalurgia del cobre, resaltando cómo los procesos de lixiviación basados en sistemas ácidos y oxidantes han evolucionado para adaptarse a las necesidades industriales. Este trabajo destacó el potencial de estas tecnologías para hacer frente a la creciente complejidad mineralógica y las demandas de sostenibilidad económica y ambiental.

Diversos estudios en el ámbito internacional han abordado la problemática de la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios, empleando técnicas avanzadas de lixiviación ácida, es así como los investigadores Zhao et al. (2019), desarrollaron un modelo cinético para la disolución de calcopirita en soluciones ácidas, donde

destacaron que la presencia de oxidantes como el sulfato férrico es clave para superar las limitaciones generadas por la formación de capas pasivadoras. La investigación subrayó la importancia de controlar los potenciales redox en el sistema lixivante para evitar la pasivación y favorecer la liberación de cobre.

En otra investigación liderada por Ghahreman et al. (2020) estudiaron la lixiviación de calcopirita en sistemas ácido-sulfato férrico, observándose que la adición de oxígeno mejoraba la cinética de disolución y minimizaba el consumo de reactivos. Sus hallazgos sugieren que la optimización del proceso puede lograrse ajustando la relación molar entre sulfato férrico y ácido sulfúrico, logrando una recuperación de cobre superior al 80%.

De manera análoga, Maltrana y Morales (2023) investigaron la lixiviación de minerales de baja ley mediante la integración de sulfato de hierro (III) y presión parcial de oxígeno en condiciones ácidas. Los resultados indicaron que la lixiviación a altas presiones y temperaturas controladas es efectiva para minerales refractarios como la calcopirita y la enargita, logrando tasas de extracción competitivas frente a técnicas convencionales.

En Japón, Harada et al. (2016) realizaron estudios sobre el uso de microburbujas de oxígeno en la lixiviación de minerales de cobre, logrando una distribución uniforme del oxidante en la solución lixivante. Este enfoque permitió una mayor eficiencia en la disolución

de cobre y redujo significativamente el tiempo requerido para completar el proceso, consolidándose como una técnica prometedora para el procesamiento de minerales complejos.

Por otro lado, en España, Torres et al. (2017) evaluaron la incorporación de tecnologías híbridas, combinando lixiviación química y electroquímica. Su trabajo demostró que la aplicación de campos eléctricos mejora la disolución del cobre al eliminar las capas pasivadoras en la superficie del mineral. Este método resultó especialmente eficaz para tratar minerales refractarios y reducir el consumo de reactivos químicos.

Todas estas investigaciones apuntan sobre la eficiencia de la lixiviación ácida como proceso para la recuperación del cobre destacándose las investigaciones que la refuerzan o mejoran con la adición del hierro y el oxígeno obteniendo buenos resultados en minerales refractarios o de baja Ley. En función de la importancia de este proceso para el desarrollo de la investigación presentada en el capítulo 3, analizaremos a continuación aspectos relevantes del mismo.

2.1 El proceso de lixiviación ácida

Como ya se indicó la lixiviación ácida es un proceso hidrometalúrgico ampliamente utilizado para extraer metales de minerales, particularmente cobre de minerales oxidados o refractarios. Este proceso utiliza soluciones acuosas de ácidos fuertes, como el

ácido sulfúrico, para disolver los minerales y liberar los metales deseados. Su uso está bien documentado por los estudios precitados, de donde se desprende que la lixiviación es un método eficaz para minerales de baja ley, ya que reduce el uso de energía en comparación con técnicas pirometalúrgicas. Además, Tran et al. (2024) destacan que la lixiviación ácida combinada con agentes oxidantes mejora la recuperación en minerales complejos. A continuación, analizaremos como actúan cada componente de este proceso:

2.1.1 Sulfato de hierro (III) como agente oxidante

El sulfato de hierro (III) es un oxidante clave en procesos de lixiviación, ya que favorece la disolución de minerales refractarios como la calcopirita (CuFeS_2). Este compuesto actúa oxidando el cobre presente en el mineral, lo que permite su solubilización en la solución lixivante. Tian et al. (2021) describen que el hierro (III) es particularmente efectivo en sistemas ácidos debido a su alta capacidad de oxidación y su compatibilidad con medios sulfúricos. Su acción es fundamental para superar la pasivación causada por la formación de capas de azufre elemental en la superficie del mineral.

2.1.2 Papel del oxígeno en la lixiviación

El oxígeno es otro componente esencial en la lixiviación ácida, especialmente cuando se combina con sulfato de hierro (III). Su introducción aumenta el potencial redox del medio, promoviendo la

oxidación de las especies metálicas y mejorando la eficiencia de disolución del cobre. Además, Nikouei et al. (2024) demostraron que el uso de oxígeno en microburbujas puede incrementar significativamente la reactividad química, reduciendo los tiempos de proceso y el consumo de reactivos.

2.1.3 Ácido sulfúrico como medio lixivante

El ácido sulfúrico (H_2SO_4) es el reactivo más utilizado en la lixiviación ácida debido a su bajo costo y alta disponibilidad. Actúa no solo como un solvente para el cobre, sino también como un medio para estabilizar el sulfato de hierro (III) y facilitar las reacciones redox necesarias. Según Ritcey (2006), el control de la concentración de ácido es crucial para maximizar la eficiencia de la extracción y minimizar la precipitación de subproductos no deseados.

2.1.4 Cinética de lixiviación

La cinética de lixiviación describe las tasas de reacción y los factores que afectan la disolución de los minerales. Liu et al.(2024), explican que la misma depende de variables como la concentración de ácido, la temperatura, la presión parcial de oxígeno y la relación molar entre los reactivos. El estudio de estas variables permite identificar las condiciones óptimas para la recuperación del cobre.

Actualmente la utilización de Lixiviación acida combinada con un agente oxidante y el oxígeno para incrementar el potencial redox del medio, son la base para la obtención del cobre a partir elementos minerales refractarios como la calcopirita, caracterizada por su alta resistencia a los métodos convencionales de extracción debido a la formación de capas de pasivación de fases estables durante los procesos de disolución. Estas capas limitan la transferencia de masa y disminuyen la recuperación del cobre, al impedir que el agente lixivante reaccione con el mineral.

2.2 Etapas del proceso de lixiviación

Para llevar a cabo la lixiviación en hidrometalurgia se desarrollan, si no necesariamente, algunos de las siguientes etapas:

1. Pretratamiento o acondicionamiento
2. Lixiviación o extracción sólido-líquido
3. Separación del extracto
4. Purificación del extracto
5. Recuperación final del metal

2.2.1 Pretratamiento o acondicionamiento

Después de la preparación física del mineral (reducción de tamaño de las partículas) para lixiviar es necesario conocer la granulometría adecuada del mineral, la densidad de la pulpa, la

composición química de la pulpa y el procedimiento adecuado en caso sea necesario cambiar esa composición química, como es el caso de los sulfuros que previamente tienen que ser sometidos a una tostación oxidante a fin de transformarlos en óxidos de cobre.

2.2.2 Lixiviación o extracción sólido-líquido

Como se dijo, en el proceso de extracción los compuestos de cobre (especies mineralógicas) que se encuentran conformando el mineral reaccionan con el ácido sulfúrico en solución para formar sulfato de cobre, una sustancia soluble a partir del cual después por cementación se recupera el cobre metálico. En el caso de la investigación desarrollada para esta obra, el ácido sulfúrico no participa del proceso solo, sino ingresa con una solución de sulfato de hierro (III) para interactuar ambos con el mineral en presencia de oxígeno gaseosos que burbujea en dicha solución ejerciendo una acción catalítica en el proceso.

2.2.3 Separación extracto

El sulfato de cobre formado durante la lixiviación es en realidad el extracto en la extracción sólido-líquido, dicho extracto hay que separarlo de la ganga o relave (residuo sólido agotado) lo cual se hace por decantación y filtración obteniéndose un líquido de color azul o azul verdoso, de acuerdo con la concentración del metal en dicho extracto.

2.2.4 Purificación del extracto

A menudo el extracto o solución madre libre de partículas sólidas contiene algunos compuestos químicos que pueden ser considerados indeseables y que perjudican la calidad del cobre a recuperar por lo que es preciso tratarlos para eliminarlos y esto se puede hacer mediante varios procedimientos que involucran los que a continuación se citan:

- ✓ Cambio de pH
- ✓ Agregado de reactivos
- ✓ Uso del intercambio iónico
- ✓ Extracción por solventes
- ✓ Membranas permeables

2.2.5 Recuperación final del metal

Existen diferentes métodos para recuperar el metal de la solución purificada, los cuales incluyen:

- a) Por precipitación o reducción química utilizando diferentes agentes reductores, ya sea a condiciones normales o bajo presión.
- b) Por reducción electrolítica.

Por precipitación y reducción química

La precipitación o cementación es un proceso ampliamente utilizado y conocido para la precipitación del cobre. Una de las reacciones más comunes implica la cementación del cobre utilizando hierro metálico (Fe), el cual, debido a su mayor actividad, reemplaza al cobre, que es un metal menos reactivo. Además de la reacción de cementación con hierro, existen otros precipitantes que pueden utilizarse para precipitar el cobre, tales como:

- a) Precipitación como cloruro cuproso: se lleva a cabo mediante la adición de un reactivo de cloruro para formar cloruro cuproso insoluble, que precipita como sólido.
- b) Precipitación en soluciones amoniacales: se realiza mediante la descomposición y volatilización del solvente amoniacal, lo que lleva a la formación de precipitados de cobre.
- c) Precipitación con anhídrido sulfuroso de soluciones en forma de sulfatos: consiste en la adición de anhídrido sulfuroso a soluciones que contienen sulfatos de cobre, lo que resulta en la precipitación del cobre como sulfuro insoluble.
- d) Precipitación con hidrógeno sulfurado: implica la introducción de hidrógeno sulfurado en la solución de cobre, lo que provoca la formación de sulfuro cuproso insoluble como precipitado.

Por reducción electrolítica

La reducción electrolítica es otro método utilizado para la recuperación del metal. Mediante el uso de corriente eléctrica, es posible obtener el metal con una pureza extremadamente alta, alcanzando hasta un 99.999%. Este proceso se conoce como electrorefinación y se lleva a cabo mediante la disolución de ánodos solubles del metal en una solución acuosa. El metal se deposita en forma de iones en el cátodo durante la electrólisis. Para que la electrorefinación sea rentable, es necesario obtener un depósito de metal de alta calidad en el cátodo mediante una operación con una eficiencia de corriente lo más alta posible.

2.3 Lixiviación de minerales de cobre

Al tratar con minerales de cobre, es importante tener en cuenta que se encuentran en diferentes menas, es decir, en forma de compuestos asociados con otros minerales y presentes en diversas proporciones. Estos minerales de cobre suelen estar dispersos dentro de una roca matriz junto con otros minerales no deseados, conocidos como ganga. Para llevar a cabo la lixiviación de un mineral específico de manera eficiente, es necesario contar con información relevante sobre el yacimiento y la mena, así como los factores que afectan la lixiviación. A continuación, se detallan algunos aspectos importantes relacionados con las características del yacimiento:

- Qué especies mineralógicas conforman el mineral, ya que algunas de ellas no son compatibles con la lixiviación o interfieren en ella.
- Diseminación de las especies: frecuencia y tamaños de los granos.
- Naturaleza de la ganga, si por ejemplo la ganga es carbonatada estos compuestos reaccionan con el ácido aumentando su consumo y muchas veces no permite recuperar todo el cobre del mineral.
- Características físicas de la mena, como su granulometría, cantidad de finos, si es porosa y permeable como para permitir el paso del lixivante cuando se trabaja en montón.
- Comportamiento de la roca en el chancado, es crucial para lograr una mayor fracturación y exposición de superficie, lo que a su vez favorece el ataque químico en etapas posteriores.

2.4 Selección de agentes lixiviantes

De acuerdo con las características del mineral, así como las reservas y el valor potencial del yacimiento, se escoge el reactivo más adecuado para la lixiviación. Primeramente, se hace el estudio del mineral considerando su composición química y sus propiedades físicas, mediante pruebas experimentales realizadas en un laboratorio metalúrgico. Lo primordial en la elección del reactivo lixivante es considerar su costo, su eficiencia y su efecto sobre el medio ambiente.

Es necesario comprender la cinética de la reacción química involucrada en la lixiviación de minerales de cobre, lo cual se logra a través de varias fases de investigación en laboratorio. Se llevan a cabo análisis preliminares en botellas rotatorias y pruebas en columnas o vasijas para evaluar la lixiviación estática o dinámica, respectivamente. Además, se debe considerar el efecto del reactivo utilizado en la recuperación del metal, ya que ciertos iones presentes en el reactivo pueden afectar la calidad del cobre recuperado. Estas investigaciones permiten optimizar las condiciones de operación y garantizar una alta eficiencia en la extracción del cobre, minimizando impurezas y obteniendo un producto de alta calidad.

Todos estos aspectos fueron considerados para diseñar la investigación a ser presentada en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3

Lixiviación ácida con Ácido sulfúrico, Sulfato de hierro (III)
y Oxígeno para optimizar la recuperación del Cobre a
partir de minerales refractarios



Lixiviación ácida con ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno para optimizar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios

La obtención del cobre a partir de minerales refractarios, representa un reto técnico económico y ambiental; sus propiedades y características estructurales son complejas, adicionalmente estos minerales por lo general son de baja ley, lo que demanda de métodos cada vez más eficientes para la recuperación del cobre, que permitan disminuir los costos asociado al proceso y minimizar posibles impactos ambientales derivados de las técnicas de extracción que se implemente.

Dentro de estas técnicas, la lixiviación ácida es ampliamente utilizada en la minería para la recuperación de cobre, pero su eficiencia puede verse afectada por factores como el tipo de reactivos, la concentración de los mismos, y las condiciones experimentales aplicadas. Investigaciones previas han demostrado que la

incorporación de oxidantes como el sulfato de hierro (III) y el oxígeno en la solución lixivante mejora la disolución de los minerales de cobre al acelerar las reacciones químicas involucradas (Hao, et al. 2022), (Anderson y Cui 2021).

Bajo estas consideraciones, la investigación realizada que dio origen al desarrollo de este texto, será presentada en este capítulo. Evaluaremos de qué manera el uso de soluciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno influye en la optimización de la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida.

El indicador para medir la eficiencia del proceso fue el porcentaje de recuperación del cobre, el cual es un indicador esencial para evaluar la eficiencia de los procesos de lixiviación ácida utilizados en la minería de cobre, especialmente en el tratamiento de minerales refractarios. La optimización de los parámetros considerados en la investigación, (concentración de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III), y oxígeno en la solución lixivante), además de mejorar la cantidad de cobre extraído, puede disminuir el consumo de reactivos y con ello los costos operativos asociado a este concepto. Adicionalmente al reducir los volúmenes de mineral procesado aprovechándolo más eficientemente y lograrse un mayor porcentaje de recuperación de cobre, se logra también maximizar los beneficios económicos y operativos de la actividad minera.

De allí la importancia de la presente investigación, pues permite explorar la eficiencia del método de lixiviación ácida para

aumentar el porcentaje de recuperación de cobre a partir de los minerales refractarios, disminuyendo los costos por concepto de consumo de reactivos y procesamiento de material mineral, optimizando el uso de los mismos, mejorando la eficiencia económica y la sostenibilidad de la extracción del cobre, al disminuir los impactos ambientales que se derivan de esta importante actividad económica.

Por lo tanto, el aporte de esta investigación radica en la posibilidad de utilizar lixiviación ácida con soluciones de ácido sulfúrico y sulfato de hierro (III), permitiendo evaluar la eficacia del proceso en condiciones reales en la explotación de cobre en la provincia del Nasca del departamento de Ica, Peru, la cual cuenta con importantes recursos minerales, con una concentración significativa de minerales refractarios con contenidos metálicos bajos, lo que plantea la necesidad de desarrollar tecnologías que optimicen la recuperación de estos recursos.

3.1 Descripción general de la localidad seleccionada para realizar el estudio

Los principales aspectos del área que se consideraron de interés para el estudio se presentan a continuación:

3.1.1 Ubicación geográfica de área

La zona de estudio se encuentra ubicada en la región sur del Perú, específicamente en la provincia de Nasca, reconocida por su rica

actividad minera en el procesamiento de minerales de cobre. Su localización Geográfica es la siguiente:

- Coordenadas geográficas aproximadas: 14° 44' S de latitud y 75° 13' W de longitud.
- La provincia de Nasca está situada a una altitud promedio de 500 metros sobre el nivel del mar, en la vertiente occidental de los Andes.
- Su proximidad a la Carretera Panamericana Sur facilita el acceso logístico a los insumos para el proceso de lixiviación y el transporte de los productos obtenidos. En la Figura 1 se presenta la ubicación relativa de la zona de interés.

Figura 1.

Ubicación del área geográfica del estudio



3.1.2 Geología del área

Los principales rasgos geológicos de interés para el estudio son los siguientes:

- La zona es conocida por sus formaciones geológicas que contienen depósitos de minerales refractarios, particularmente los de cobre, que tienen baja ley y requieren procesos especializados de lixiviación para su recuperación eficiente.
- Los yacimientos estudiados se componen de minerales oxidados y sulfuros secundarios, adecuados para investigar el efecto de las soluciones de ácido sulfúrico y sulfato de hierro (III) en la disolución del cobre.

3.1.3 Clima

La región presenta un clima desértico, con temperaturas que oscilan entre los 18°C y 30°C, y precipitaciones anuales muy bajas (menos de 5 mm). Las condiciones climáticas secas son ideales para estudiar la eficiencia del proceso de lixiviación ácida bajo condiciones de baja humedad, las cuales influyen directamente en la interacción entre los reactivos químicos y los minerales.

La elección de Nasca para desarrollar la investigación sobre *"lixiviación acida con ácido sulfúrico-sulfato de hierro (III) y oxígeno*

para optimizar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios" responde a diversos factores geológicos, mineros y logísticos que hacen de esta región un área idónea para el estudio entre ellas:

Relevancia geológica: la provincia de Nasca, ubicada en el departamento de Ica, es conocida por su riqueza en recursos minerales, con importantes depósitos de cobre y otros metales. Según estudios del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), el sur del Perú presenta una concentración significativa de minerales refractarios con contenidos metálicos bajos, lo que plantea la necesidad de desarrollar tecnologías que optimicen la recuperación de estos recursos.

Los yacimientos en esta región incluyen minerales oxidados y sulfuros secundarios que son ideales para aplicar técnicas de lixiviación ácida con soluciones de ácido sulfúrico y sulfato de hierro (III), permitiendo evaluar la eficacia del proceso en condiciones reales.

Condiciones climáticas e hídricas: su clima árido, implica una disponibilidad limitada de recursos hídricos; este contexto realza la importancia de investigar procesos que optimicen la recuperación de cobre y minimicen el consumo de agua. La lixiviación ácida es una técnica que, bajo control adecuado, puede adaptarse a este tipo de escenarios, ofreciendo soluciones sostenibles para regiones con estrés hídrico. La disponibilidad de oxígeno en el ambiente seco también

favorece la oxidación controlada de los minerales, lo cual es relevante para los mecanismos de disolución en lixiviación.

Impacto en el desarrollo local: la investigación no solo tiene un enfoque técnico-científico, sino también un impacto potencial en el desarrollo socioeconómico de Nasca. Al proponer mejoras en la recuperación de cobre, se contribuye a la eficiencia de la actividad minera local, lo que puede traducirse en mayores ingresos y empleos para la región.

Además, la implementación de tecnologías sostenibles promueve el respeto por el medio ambiente, alineándose con los principios de la minería responsable y fortaleciendo la competitividad de Nasca como un polo minero importante en el sur del Perú.

Contexto minero y logístico: Nasca tiene una tradición minera histórica que se remonta a épocas precolombinas, y en la actualidad alberga pequeñas y medianas operaciones mineras dedicadas a la extracción de cobre y oro. Estas operaciones generan minerales refractarios que representan un desafío técnico para su procesamiento, justificando investigaciones que busquen optimizar su aprovechamiento.

La cercanía de Nasca a importantes corredores logísticos, como la Carretera Panamericana Sur, facilita el acceso a insumos químicos como ácido sulfúrico y sulfato de hierro (III), así como la posibilidad de transportar los concentrados obtenidos hacia las plantas metalúrgicas.

3.2 Entramado metodológico

En este apartado nos pasaremos por los supuestos indagatorios, ubicación de los puntos de monitoreo utilizado para desarrollar la investigación, así como los recursos metodológicos utilizadas en la investigación. Se partió de la **Hipótesis principal de que** “El uso de soluciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno influye en la optimización de la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida”.

3.2.1 Definición de las variables

Como punto de partida para la investigación se definieron las variables independientes, dependiente e intervinientes consideradas para el estudio.

Variable independiente: *concentración de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno en la solución lixivante:* la concentración de ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfato de hierro (III) ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) y oxígeno (O_2) en la solución lixivante es un factor clave para optimizar la recuperación del cobre en procesos de lixiviación ácida. El ácido sulfúrico actúa como agente disolvente principal, promoviendo la liberación de iones metálicos desde los minerales, mientras que el sulfato de hierro (III) funciona como un agente oxidante que acelera la disolución de minerales refractarios al oxidar especies insolubles de cobre. Por su parte, el oxígeno disuelto en la solución mejora la eficiencia de las reacciones electroquímicas al oxidar sulfuros metálicos y facilitar la formación de especies solubles. La combinación

de estas sustancias, en concentraciones óptimas, es esencial para maximizar la extracción de cobre, reducir costos operativos y minimizar impactos ambientales (Dreisinger, 2006).

Variable dependiente: *porcentaje de recuperación del cobre:* definida como la relación porcentual entre la cantidad de cobre efectivamente recuperado en el proceso de lixiviación y la cantidad total de cobre presente inicialmente en el mineral tratado (Dreisinger, 2006).

Como ya se analizó el *porcentaje de recuperación del cobre* es un indicador crucial para evaluar la eficiencia del proceso de lixiviación, ya que refleja el grado en que el método empleado logra extraer el metal deseado. Una alta tasa de recuperación indica un proceso eficiente y bien optimizado, mientras que un porcentaje bajo puede revelar problemas en las condiciones operativas, como concentraciones inadecuadas de reactivos, tiempo de lixiviación insuficiente o limitaciones en la reactividad del mineral. El porcentaje de recuperación del cobre es fundamental para el análisis técnico-económico de proyectos mineros y para la sostenibilidad del proceso en términos de aprovechamiento de recursos.

Variable interviniente: *temperatura del proceso de lixiviación,* este parámetro afecta directamente la velocidad de las reacciones químicas y la solubilidad de los compuestos en la solución lixivante. Un aumento en la temperatura puede acelerar la disolución del cobre desde los minerales refractarios, optimizando la recuperación; sin embargo, también puede provocar reacciones secundarias indeseadas o un mayor

consumo de reactivos. Por tanto, la temperatura es un factor que, aunque no es el objeto principal del estudio, puede influir significativamente en la relación entre la concentración de los reactivos y el porcentaje de recuperación del cobre.

Tabla 1

Variables de estudio.

Variable Independiente	Indicadores	Unidades	Estrategia metodológica
VI: Concentración de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno en la solución lixiviante	I_{1,1,1}: Concentración de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄), I_{1,1,2}: Concentración de sulfato de hierro (III) (Fe ₂ (SO ₄) ₃) se seleccionaron puntos de monitoreo y parámetros claves para el estudio: I_{1,1,3}: Concentración de oxígeno (O ₂)	g/L mg/l mg/L	<i>Tipo:</i> Cuantitativa, Aplicada <i>Nivel:</i> Descriptiva <i>Diseño:</i> No experimental <i>Población:</i> minerales refractarios de cobre que se extraen de los yacimientos ubicados en la región de Nasca. <i>Muestra:</i> criterios de homogeneidad y representatividad del material. <i>Técnicas de recolección de datos:</i> Observación, cadena de custodia <i>Instrumentos de recolección de datos:</i> Espectrofotómetro de Absorción Atómica. <i>Técnicas de procesamiento de datos:</i> Estadística descriptiva <i>Interpretación de los datos:</i> Permitió identificar patrones y variaciones significativas en los resultados.
Variable Dependiente	Indicadores		
VD: Porcentaje de recuperación del cobre	I_{D,1,1}: Cantidad de cobre recuperado	mg	

3.2.2 Disposición de monitoreo

Para asegurar la precisión de los resultados y la evaluación de la efectividad del proceso de lixiviación, se establecieron puntos de monitoreo y parámetros claves para el desarrollo del estudio:

a) **Selección de puntos de muestreo considerando:**

- Los puntos de monitoreo se ubicaron estratégicamente en las zonas de excavación y en las áreas de lixiviación, asegurando una cobertura representativa de la variabilidad geológica y mineralógica del yacimiento.
- Se utilizaron muestras de mineral en diferentes etapas del proceso, desde la alimentación del mineral a las pilas de lixiviación hasta las soluciones resultantes.

b) **Monitoreo de parámetros clave:**

- **Concentración de cobre en la solución lixivante:** Se realizó un seguimiento constante de la concentración de cobre en la solución para evaluar la eficiencia del proceso de disolución.
- **pH de la solución lixivante:** parámetro crítico en la lixiviación ácida, ya que influye en la solubilidad de los metales y la actividad de los reactivos.

- **Consumo de ácido:** se midió la cantidad de ácido sulfúrico utilizado durante el proceso para optimizar su consumo y mejorar la sostenibilidad del proceso.
- **Concentración de Sulfato de Hierro (III):** el sulfato de hierro (III) se utiliza como agente potenciador en el proceso, por lo que su concentración en la solución lixivante fue monitoreada.

3.2.3 Análisis de efluentes

Para cumplir con las normativas ambientales, se establecieron puntos de monitoreo en los efluentes de lixiviación. Esto permitió evaluar el impacto potencial de los procesos en la calidad del agua, particularmente en cuanto a la concentración de metales pesados, y garantizar que se cumpla con los estándares de calidad ambiental establecidos por el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM para la calidad del agua.

3.2.4 Equipos y tecnología de monitoreo

Se utilizaron equipos de última tecnología para la medición en tiempo real de los parámetros críticos, tales como pH-metros, espectrómetros de absorción atómica (para la medición de cobre), y sistemas automatizados de toma de muestras.

Además, se emplearon drones para el monitoreo visual de las pilas de lixiviación y para realizar un seguimiento remoto de las condiciones del terreno y la disposición de los reactivos.

3.2.5 Consideraciones ambientales y sociales

Impacto ambiental: se realizó un monitoreo continuo de las condiciones ambientales en las cercanías de la operación para evitar la contaminación de fuentes de agua cercanas debido a la lixiviación ácida. La investigación también considero las posibles implicaciones socioeconómicas de las operaciones mineras en Nasca, buscando promover prácticas de minería responsable que beneficien tanto a las comunidades locales como al medio ambiente.

3.3 Tipo, nivel y diseño de investigación

La investigación sobre "lixiviación ácida con ácido sulfúrico-sulfato de hierro (III) y oxígeno para optimizar la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios" se clasificó como una investigación de tipo experimental, dado que su propósito principal fue evaluar y optimizar un proceso específico de lixiviación ácida mediante la manipulación de variables controladas. En este estudio se sometieron los minerales refractarios a distintas concentraciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno para analizar su impacto en la recuperación del cobre, buscando establecer relaciones causales entre estos factores. La naturaleza experimental de la investigación permitió la realización de pruebas controladas bajo

condiciones de laboratorio y campo, lo que favorece la obtención de datos fiables para la toma de decisiones sobre la optimización del proceso (Supo, 2015).

La investigación se enmarcó dentro del nivel explicativo, ya que se buscó entender los mecanismos y las relaciones causales involucradas en el proceso de lixiviación ácida y su optimización mediante la variación de la concentración de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno. A través de este enfoque, se pretende explicar cómo cada uno de estos factores influye en la eficiencia de la recuperación del cobre de los minerales refractarios. El nivel explicativo es fundamental para establecer el impacto de las variables en los resultados del proceso, lo que permitió formular recomendaciones precisas para la mejora de la técnica y la maximización de la eficiencia operativa en la industria minera (Supo, 2015).

Se adoptó un diseño de investigación cuasi-experimental, ya que, aunque se controló algunas variables del proceso, no se pudo realizar una aleatorización completa de las condiciones del experimento debido a las limitaciones prácticas de la minería. Este diseño es adecuado para estudios donde no se puede realizar un control total sobre el entorno, como en este caso, donde las condiciones geológicas y operativas de los minerales refractarios no pueden ser replicadas completamente de forma controlada. En este diseño cuasi-experimental, se llevaron a cabo pruebas con distintas concentraciones de reactivos y se analizaron los resultados para observar las variaciones en la recuperación del

cobre, lo que permitió evaluar el impacto de cada condición experimental (Hernández y Mendoza Torres, 2018) .

Tanto el nivel como el diseño usado en la investigación se enmarcan en el trabajo realizado por Huamán (2018) sobre la lixiviación ácida con ion férrico de minerales mixtos de cobre en la planta de beneficio ANANAE, Universidad Nacional del Callao, cuyo objetivo fue averiguar experimentalmente si el hierro permite una recuperación más rápida y efectiva del cobre. Su investigación fue aplicada, de nivel explicativo y de diseño experimental. Las pruebas experimentales realizadas en la misma permitieron verificar la validez de la hipótesis planteada.

3.4 Población y muestra

En función de las características de los minerales refractarios presentes en el área de estudio se definió la población y la muestra del estudio de acuerdo a las siguientes consideraciones:

Población. La población de la investigación fue conformada por los minerales refractarios de cobre que se extraen de los yacimientos ubicados en la región de Nasca, en el departamento de Ica, Perú. Estos minerales presentan características de baja ley y alta complejidad en su tratamiento, lo que los hace aptos para ser sometidos a procesos de lixiviación ácida con el fin de recuperar el cobre.

La población es representativa de los minerales que se encuentran en diversas zonas de explotación minera en la región, y su estudio es relevante debido a la necesidad de optimizar los procesos de extracción y aumentar la eficiencia en la recuperación de cobre. Los minerales seleccionados para la investigación estaban en diferentes etapas de explotación, lo que permitió abordar la variabilidad geológica y mineralógica inherente a la población (Ardilla et al., 2018).

Muestra. La muestra fue conformada por un subconjunto de minerales refractarios de cobre seleccionados de las pilas de lixiviación de un yacimiento específico en Nasca. Considerando los planteamientos de Alejo y Gonzales (2008), la selección de la muestra se basó en criterios de homogeneidad y representatividad del material para garantizar que los resultados obtenidos sean extrapolables a otras zonas del mismo yacimiento y a minerales con características similares. La muestra se eligió mediante un muestreo estratificado, para incluir diferentes tipos de minerales, tales como los más oxidados y los más sulfurosos, para evaluar cómo afectan las distintas concentraciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno en cada caso. La muestra permitió realizar experimentos controlados en condiciones específicas de laboratorio y obtener datos que servirán para optimizar el proceso de lixiviación en términos de tiempo, consumo de reactivos y recuperación de cobre.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos se consideró las orientaciones de Diaz (2018) y se emplearon diferentes técnicas para obtener información precisa y relevante sobre el comportamiento de la lixiviación ácida y la eficiencia en la recuperación del cobre. Estas técnicas fueron las siguientes:

- *Muestreo de minerales:* se realizó un muestreo de los minerales refractarios de cobre directamente de las pilas de lixiviación y de los depósitos iniciales de mineral. Los minerales fueron muestreados en diferentes puntos del yacimiento para asegurar la representatividad de la muestra. Este muestreo permitió obtener información sobre las características fisicoquímicas del mineral antes de su tratamiento, como su ley de cobre, pH, contenido de sulfuros, y la presencia de impurezas, lo que es esencial para comprender cómo reaccionan los minerales bajo diferentes condiciones de lixiviación.
- *Análisis de soluciones lixiviantes:* se tomó muestras periódicas de las soluciones lixiviantes a lo largo del proceso de lixiviación para medir la concentración de cobre y los reactivos utilizados (ácido sulfúrico y sulfato de hierro (III)). Estas muestras fueron analizadas en laboratorio mediante técnicas como espectrofotometría de absorción atómica (AAS) para determinar la concentración exacta de cobre disuelto, así como métodos

volumétricos para el análisis de ácido sulfúrico. Los resultados permitieron evaluar la eficiencia del proceso de lixiviación y ajustar las condiciones operativas.

- *Monitoreo de parámetros físico-químicos:* se caracterizaron parámetros clave como el pH de las soluciones lixiviantes en tiempo real y la temperatura. Para ello, se utilizó sensores y medidores portátiles de alta precisión, lo que permitió un seguimiento continuo durante las pruebas experimentales. Estos datos son cruciales, ya que el pH influye directamente en la solubilidad del cobre y la actividad de los reactivos, y la temperatura afecta la velocidad de las reacciones químicas.
- *Cuantificación del consumo de reactivos:* durante las pruebas, se registró la cantidad de reactivos utilizados, especialmente el ácido sulfúrico y el sulfato de hierro (III), con el fin de calcular el consumo de estos compuestos en cada fase del proceso de lixiviación. Estas mediciones fueron fundamentales para determinar el consumo óptimo de ácido y otros reactivos, lo cual es clave para la eficiencia económica del proceso.
- *Observación directa y registro de condiciones operativas:* durante todo el proceso de lixiviación, se llevó a cabo una observación directa del comportamiento de las pilas de lixiviación y las reacciones en curso. Se registraron las condiciones operativas como el tiempo de exposición, la

agitación de las soluciones, la variación en la concentración de oxígeno, y otros factores que puedan influir en la eficiencia del proceso. Este registro fue complementado con bitácoras operativas que detallarán los procedimientos y ajustes realizados durante la experimentación.

Los instrumentos de recolección de datos utilizados permitieron medir y registrar con precisión las variables clave del proceso de lixiviación. Estos se detallan a continuación:

- *Balanzas analíticas:* se utilizó balanzas analíticas de alta precisión para pesar los minerales refractarios antes y después de su tratamiento, lo cual es esencial para determinar la cantidad de cobre recuperado. Estas balanzas permitieron obtener mediciones exactas de los cambios en la masa de los minerales y su contenido metálico tras el proceso de lixiviación.
- *Espectrofotómetro de absorción atómica (AAS):* este instrumento fue utilizado para medir la concentración de cobre en las soluciones lixiviantes. La espectrofotometría de absorción atómica permitió determinar con gran precisión la cantidad de cobre disuelto en la solución, a partir de la absorción de luz en longitudes de onda específicas.
- *Medidor de pH portátil:* un medidor fue utilizado para medir el pH de las soluciones lixiviantes en tiempo real durante todo el

proceso de lixiviación. Este instrumento es esencial para ajustar las concentraciones de ácido sulfúrico en función de los resultados obtenidos, considerando la importancia del pH en el proceso de lixiviación ácida, ya que afecta la solubilidad del cobre y la eficiencia de los reactivos utilizados.

- *Cromatógrafo de Iones:* para el análisis de la concentración de otros iones relevantes en la solución, como los iones de hierro (III), se utilizó un cromatógrafo de iones. Este instrumento permitió identificar y cuantificar los componentes iónicos de la solución lixivante, lo que es clave para evaluar el impacto del sulfato de hierro (III) en el proceso y la formación de complejos con el cobre.
- *Software de análisis de datos:* se empleó el programa especializado para el análisis estadístico y la interpretación de los datos recolectados. Esto es el *SPSS* se utilizó para procesar y analizar las variables experimentales, lo que permitió obtener las conclusiones claras sobre la relación entre las concentraciones de reactivos y la eficiencia del proceso de lixiviación.

3.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- *Recolección y organización de datos experimentales:* los datos provenientes de los experimentos de lixiviación se registraron

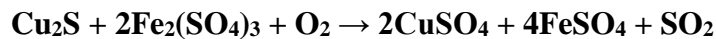
sistemáticamente, incluyendo variables como la concentración de reactivos y el pH.

- *Estadística descriptiva y análisis exploratorio:* se emplearon herramientas estadísticas para determinar las tendencias, identificar valores atípicos y describir el comportamiento de las variables experimentales.
- *Análisis estadístico de los resultados experimentales:* los datos recolectados, como tasas de recuperación de cobre, cambios en el pH y consumo de reactivos, se sometieron a estadística descriptiva para calcular medidas de tendencia central, dispersión y correlación. Esto permitió identificar patrones y variaciones significativas en los resultados.
- *Evaluación de las relaciones entre variables:* a través de técnicas de regresión, se analizaron las relaciones entre las concentraciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III), oxígeno. Este enfoque permitió establecer modelos predictivos que describen cómo estos factores influyen en la recuperación del cobre.

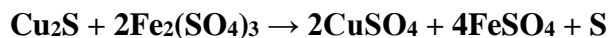
3.7 Estimaciones de las concentraciones de las soluciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno para la optimización de la recuperación de cobre

En la lixiviación de minerales de cobre, los reactivos normales suelen ser ácido sulfúrico para minerales oxidados y sulfato férrico acidificado en medio oxidante, para minerales sulfurados.

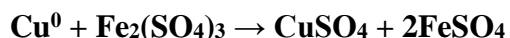
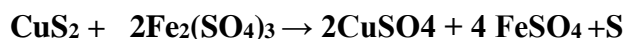
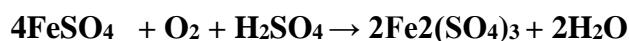
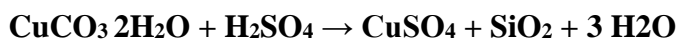
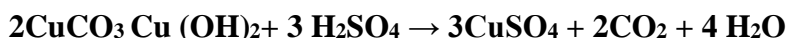
En la investigación realizada se usó el sulfato de hierro (III), sal soluble en agua el cual se agregó en la cantidad requerida de acuerdo a la reacción determinada de manera experimental, se consideró porcentajes bajos de la sal y cantidades altas de ácido sulfúrico. Ambas sustancias actúan sobre el metal en presencia de oxígeno el cual tiene como función catalizar la reacción como oxidante energético dando finalmente, como resultado la reacción dióxido de azufre según la reacción:



Durante el proceso esta no es la única reacción que se produce en el interior del reactor en el que se trabaja, otras de las reacciones son las siguientes:



En esta reacción se forma una nata de azufre de color amarillo, la cual interfiere en el proceso, el aumento de la concentración del sulfato de hierro (III) y la presencia de oxígeno permite eliminar el azufre, como hemos visto en la primera reacción. Otra de las reacciones son las siguientes:



3.7.1 Condiciones para la lixiviación dinámica

Para el desarrollo de la investigación se utilizó la técnica de lixiviación dinámica. Para llevar a cabo esta técnica, se empleó un reactor con agitador de eje flexible, también conocido como tanque agitado, con una capacidad de dos litros. Este reactor está equipado con una tapa que cuenta con tres orificios. A través del primer orificio, se insertó el eje de un mezclador de paletas, accionado por un pequeño motor con velocidades ajustables mediante un reductor. El segundo orificio se utilizó para colocar un termómetro, el cual permitió controlar la temperatura durante el proceso. El tercer orificio fue utilizado para conectar un tubo, acoplado a una manguera de hule, con el objetivo de enlazarlo con el absorbedor-mezclador.

3.7.2 Procedimiento

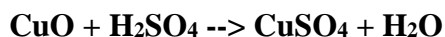
Para el cálculo de la concentración del ácido a emplear se determinó primeramente la ley del mineral, en nuestro caso la ley de cobre, para luego determinar la cantidad de cobre en gramos en la muestra a tratar. Por ejemplo, según el cálculo estequiométrico, y partiendo del análisis del mineral hecho para determinar la ley, en cobre total, la muestra tiene una concentración del 8,65%, es decir:

Si 100 g de mineral contienen 8,65 g de Cu, entonces 500 g de mineral contienen (x) g de cobre:

$$\mathbf{X = (8,65 \times 500) / 100 = 43,25 \text{ g de Cu}}$$

En 500 g de mineral hay un total de 43,25 g de cobre.

Planteamos la ecuación química:



Consideramos que en el óxido de cobre que tiene un peso molecular de 79,55 g contiene 63,55 g de cobre, lo que quiere decir que:

Si 63,55 g de Cu reaccionaron 98,08 g de H₂SO₄

Entonces: 43,25 g de Cu, que tiene la muestra reacciona con X g de ácido

$$\mathbf{X = (43,25 \times 98,08) / 63,55 = 66,75 \text{ g de ácido}}$$

Esto quiere decir que el cobre que tiene los 500 g de muestra requiere de 66,75 g de ácido sulfúrico para reaccionar estequiométricamente, que en mL equivale a:

$$\mathbf{V = M/\rho = 66,75/1,84 = 36,27 \text{ mL}}$$

Se procede a calcular que porcentaje tendrá 1500 mL de solución de ácido sulfúrico que contenga 66,75 g de dicho ácido:

Partimos de la ecuación:

$$\mathbf{V_{ac.} = (C_1 \times V \times \rho_1) / (\rho_2 \times C_2) = mL}$$

Donde:

$V_{ac.}$ = Volumen de ácido necesario para preparar la solución, en mL

C_1 = Concentración (porcentaje) que se pide, en %

V = Volumen de la solución a preparar, mL

ρ_1 = Densidad de la solución al porcentaje que se pide, g/mL (se obtiene de las tablas)

ρ_2 = Densidad del ácido concentrado, g/mL

C_2 = Concentración del ácido concentrado, en %

De esa fórmula despejamos C_1 :

$$C_1 = (V_{ac} \times \rho_2 \times C_2) / (V \times \rho_1)$$

Reemplazando valores tenemos:

$$C_1 = (66,75 \times 1,84 \times 98) / (1\ 500 \times 1,026)$$

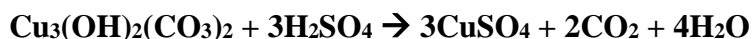
$$C_1 = 4,25\%$$

Esto quiere decir que para tratar o para recuperar el cobre total que hay en el mineral es necesario una solución de ácido sulfúrico de 4,25% de concentración. Teniendo en cuenta este cálculo teórico se hicieron ensayos con porcentajes un tanto superiores, considerando que en el mineral existen otros elementos y compuesto que consumen ácido. Los porcentajes ensayados fueron: 4, 5, 6, 7, 8, 9, y 10%.

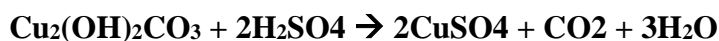
La finalidad de utilizar estas concentraciones fue aumentar la seguridad al proceso y poder recuperar todo el cobre ya que la reacción no es estrictamente estequiométrica y considerando, además, que en el mineral hay otros compuestos químicos que también reaccionan con el ácido para formar sulfatos, tales como compuestos de hierro, aluminio, zinc, plomo, carbonatos, etc.; a estos se les denomina acidificadas.

Las reacciones que reproducen entre las especies mineralógicas de cobre y el ácido sulfúrico durante la lixiviación están expresadas en las siguientes ecuaciones químicas:

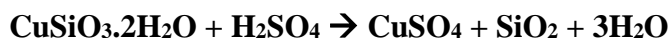
Con la Azurita:



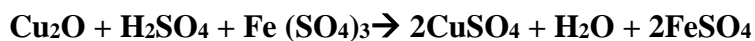
Con la malaquita:



Con la crisocola:



Con la cuprita:



Con la tenorita:



3.8 Resultados: a continuación, se presentan los resultados de las pruebas descritas y realizadas a las muestras:

Tabla 2*Muestra vs Densidad.*

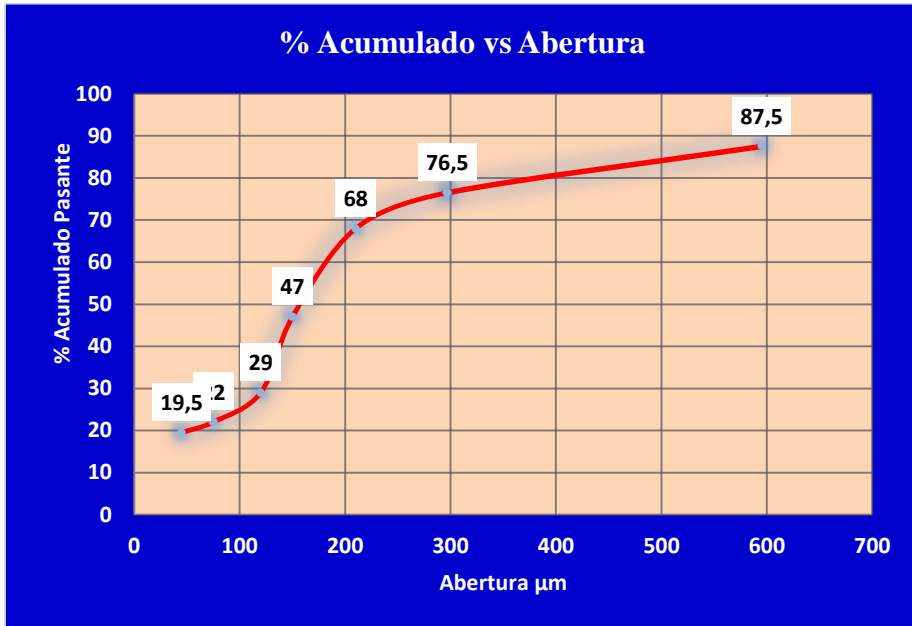
Muestra	Densidad (gr/cm ³)	
	Real	Aparente
1	1,253	1,312
2	1,245	1,321
3	1,247	1,278

Tabla 3*Análisis granulométrico.*

N° malla TYLER	Abertura µm	Mineral Refractario				
		Peso Kg	Peso gr	% Parcial	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
30	595	0,025	25	12,50	12,50	87,50
50	297	0,022	22	11,00	23,50	76,5
70	210	0,017	17	8,50	32,00	68,00
100	150	0,042	42	21,00	53,00	47,00
140	120	0,036	36	18,00	71,00	29,00
200	75	0,014	14	7,00	78,00	22,00
325	45	0,005	5	2,50	80,5	19,5
CIEGA		0,039	39	19,5	100,00	0,00
TOTAL			200	100		

Figura 2

% Acumulado Pasante vs Abertura (μm).



Para el estudio de la ley, se entregaron tres muestras que fueron examinadas con la granulometría correspondiente y la malla control Tyler 100. La ley de cobre fue examinada en las tres muestras, y los hallazgos de dichos análisis se pueden apreciar en la Tabla 4.

Es notable que el cobre soluble es significativamente inferior al Cu total; por ende, podemos inferir que es un sulfuro de baja ley.

Tabla 4

Ley de mineral de baja ley.

Muestras	Cobre Total	Cobre Soluble	Cobre Insoluble
1	0,753	0,225	0,532
2	0,756	0,227	0,530
3	0,755	0,225	0,534

No se observó un incremento en el cobre soluble después de que la partícula fue liberada mediante la molienda.

Tabla 5

Ensayo de humedad del mineral refractario.

Ensayo	Masa inicial	Masa final	% humedad
1	100	98,67	1,35
2	100	98,82	1,19
3	100	98,80	1,21
Promedio	100	98,76	1,25

Se deduce que la humedad media del es del 1,21%.

Es imprescindible tener en cuenta la humedad del mineral al comenzar la prueba, dado que el uso de la masa húmeda modificaría la cantidad de agua empleada en la lixiviación.

Tabla 6
Lixiviación con H₂SO₄

Tiempo (Días)	% Recuperación Lixiviación con H ₂ SO ₄
0	0
1	4,7
2	10,23
4	18,3
6	28,5
8	31,7
12	36,4

Prueba de hipótesis

H₀: El uso de soluciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno NO influye en la optimización de la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida, ($\mu \geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

H_a: El uso de soluciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno influye en la optimización de la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida, ($\mu < 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Se resuelve el t-Student experimental

$$t_{\text{Experimental}} = -40.0642$$

La distribución del $t_{\text{Teórico}} = -2.9200$. Distribución t de Student, $gl = 2$ y $\alpha = 0.05$)

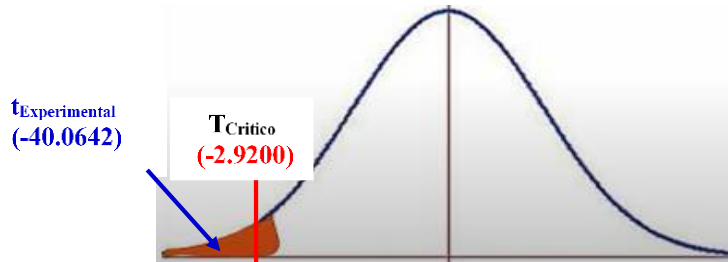
Entonces,

Si $t_{\text{Experimental}} (-40.0642) > t_{\text{Teórico}} (-2.9200)$ entonces SE RECHAZA

H₀

Figura 3

Distribución de t-Student para el uso de soluciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno.



Se afirma, que:

La interpretación de la hipótesis alterna (H_a) en este caso es que el uso de soluciones de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno influye significativamente en la optimización de la recuperación del cobre a partir de minerales refractarios mediante lixiviación ácida. Dado que el valor de t experimental (-40.0642) es menor que el valor t teórico (-2.9200), se rechaza la hipótesis nula (H_0) en favor de la hipótesis alternativa. Esto indica que la combinación de estas soluciones tiene un impacto significativo en el proceso de lixiviación, mejorando la recuperación del cobre en comparación con lo que se podría esperar si no se utilizara esta combinación de reactivos.

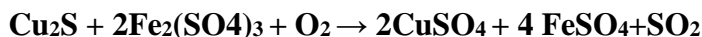
Por lo tanto, la hipótesis alternativa se confirma, lo que sugiere que el tratamiento con estas soluciones mejora la eficiencia del proceso de recuperación del cobre de los minerales refractarios.

3.8.1 Discusión de resultados, aspectos adicionales del proceso

La lixiviación ácida es un proceso fundamental en la extracción de cobre, especialmente en minerales refractarios, donde la interacción entre el ácido sulfúrico y el mineral de cobre forma compuestos solubles como el sulfato de cobre. Hao et al. (2022), en su investigación sobre lixiviación ácida con ion férrico subraya la importancia de utilizar agentes como el sulfato de hierro (III), que puede catalizar las reacciones de disolución del mineral, acelerando la liberación de cobre. Este trabajo experimental es relevante porque confirma que el hierro, en su forma de sulfato férrico, mejora la recuperación del cobre mediante un mecanismo redox en el que el hierro (III) actúa como agente oxidante, favoreciendo la disolución de cobre del mineral; estos resultados se corresponden con los obtenidos con la presente investigación.

Efectividad de los reactivos utilizados

En esta investigación, se planteó el uso combinado de ácido sulfúrico y sulfato de hierro (III), los cuales interactúan con el mineral en presencia de oxígeno para mejorar la cinética de la lixiviación. Este proceso involucra la siguiente reacción global:



Durante la lixiviación dinámica, el oxígeno actúa como catalizador, aumentando la velocidad de la reacción y la eficiencia en la disolución del cobre, lo cual está respaldado por estudios previos que indican que la presencia de oxígeno en el proceso mejora significativamente la recuperación del cobre de minerales sulfurados entre ellos los investigadores (Bai et al., 2018). Las reacciones secundarias, como la formación de sulfuro de cobre (CuS) y su posterior conversión en sulfato de cobre, son indicativas de la complejidad de la lixiviación en estos minerales refractarios. Según lo observado en las pruebas realizadas en esta investigación, el control de las condiciones de oxígeno y la concentración de sulfato de hierro (III) pueden ayudar a minimizar la formación de compuestos de azufre que interfieren en el proceso.

Optimización de condiciones de lixiviación

La optimización de la lixiviación implica ajustar parámetros entre ellos la temperatura, el pH, la concentración de reactivos y la velocidad de agitación, como se destaca en los estudios citados de Hao et al. (2022). La elección de estos parámetros es esencial para maximizar la solubilización del cobre y minimizar la presencia de impurezas en el extracto. En este sentido, la lixiviación dinámica con agitación constante, implementada en el reactor de dos litros, permitió un mejor contacto entre los reactivos y el mineral, mejorando la

eficiencia de la disolución del cobre. El control de la temperatura también juega un papel importante, ya que temperaturas más altas suelen aumentar la velocidad de las reacciones químicas, favoreciendo una mayor disolución del metal.

Recuperación del cobre y purificación del extracto

El extracto obtenido de la lixiviación, principalmente sulfato de cobre, debe ser separado de la ganga o material no valioso, proceso que se realiza mediante decantación y filtración. Este paso es crucial, ya que asegura que el cobre recuperado esté libre de impurezas. En concordancia con los estudios realizados por Komulainen, et al. (2008), la purificación del extracto, en la que se eliminan compuestos indeseables, puede realizarse mediante procesos de cambio de pH o extracción por solventes que son métodos comunes en la metalurgia extractiva. Además, la cementación del cobre mediante la adición de hierro metálico, como se describe en la investigación, es un método económico y eficiente para obtener cobre de alta pureza, lo cual es vital para la aplicación industrial.

Impacto ambiental de los reactivos

Es fundamental considerar los efectos ambientales de los reactivos utilizados en el proceso de lixiviación. El ácido sulfúrico, aunque efectivo, es un ácido fuerte que puede tener impactos negativos en los ecosistemas cercanos a las plantas de procesamiento si no se

gestionan adecuadamente los residuos. En este sentido, el uso de sulfato de hierro (III) puede ser una alternativa favorable, ya que su solubilidad en agua facilita su manejo y reciclaje dentro del proceso, reduciendo la carga ambiental de los reactivos empleados. Sin embargo, la formación de dióxido de azufre (SO₂), como subproducto, debe ser cuidadosamente gestionada, ya que puede contribuir a la contaminación atmosférica (Adrianto y Pfister, 2022).

3.9 Conclusiones

De la investigación realizada se desprenden importantes aportes en cada una de las aristas estudiadas, los cuales se señalan a continuación:

Eficiencia del proceso de lixiviación

La investigación concluye que el proceso de lixiviación utilizando una combinación de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno ha demostrado ser altamente eficiente para la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios. Este proceso permite una extracción más rápida y eficaz del metal, ya que el ácido sulfúrico facilita la disolución del cobre, el sulfato de hierro (III) actúa como un catalizador y el oxígeno mejora la oxidación de los compuestos de cobre. Estos factores contribuyen a un proceso de lixiviación más completo, con mayor rendimiento en la extracción del metal.

Condiciones óptimas para la lixiviación

Se identificaron las condiciones óptimas para maximizar la recuperación de cobre. La concentración adecuada de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno resultó en una disolución más eficiente del cobre, reduciendo al mismo tiempo la formación de compuestos indeseables. Estas condiciones no solo incrementan la recuperación de cobre, sino que también minimizan el uso de reactivos y el tiempo de proceso, lo que hace que el proceso sea más económico y menos impactante ambientalmente.

Efecto de la granulometría y la calidad del mineral

Los resultados indican que la granulometría del mineral y su composición mineralógica son factores clave que afectan la tasa de recuperación del cobre. Los minerales con menor cantidad de ganga y mayor accesibilidad a los compuestos de cobre son más fácilmente procesables, lo que subraya la importancia de ajustar el proceso de lixiviación en función de las características específicas del mineral. Esto permite optimizar el uso de los reactivos y mejorar los rendimientos del proceso.

Ventajas frente a métodos tradicionales

El proceso de lixiviación con sulfato de hierro (III) y oxígeno mostró ventajas significativas sobre los métodos tradicionales, tales

como el uso exclusivo de ácido sulfúrico. Al incorporar estos reactivos adicionales, se logró una lixiviación más rápida y eficiente, reduciendo el tiempo de tratamiento y la cantidad de reactivos necesarios. Esta mejora en la eficiencia no solo beneficia el proceso de extracción del cobre, sino que también reduce los costos operativos, lo que lo convierte en una alternativa más rentable y sostenible.

Impacto ambiental y medidas mitigadoras

Aunque el proceso de lixiviación mejora la eficiencia de la extracción, se concluye que los reactivos utilizados, como el ácido sulfúrico, pueden tener impactos ambientales negativos, especialmente en la emisión de gases como el dióxido de azufre. Para mitigar estos efectos, se recomienda la implementación de tecnologías para capturar y tratar estos gases, minimizando su liberación al medio ambiente. Además, se deben establecer protocolos adecuados para el manejo y disposición de los residuos generados durante el proceso.

Viabilidad industrial y recomendaciones

El proceso de lixiviación con sulfato de hierro (III) y oxígeno se presenta como una opción viable para la industria minera, especialmente en el tratamiento de minerales refractarios. Este proceso no solo mejora la recuperación de cobre, sino que también reduce los costos operativos, lo que aumenta la rentabilidad de las operaciones mineras. Se recomienda que la industria explore la adopción de este

proceso a gran escala, evaluando su integración en plantas industriales para maximizar los beneficios económicos y operativos.

Direcciones para futuras investigaciones

Se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en la escalabilidad del proceso y su implementación en diferentes tipos de mineral, para evaluar su aplicabilidad en una variedad más amplia de condiciones. Además, se recomienda investigar más a fondo los efectos a largo plazo de los reactivos sobre el medio ambiente y la salud humana. También sería útil optimizar los procesos de purificación y recuperación del cobre, con el fin de aumentar aún más la sostenibilidad y eficiencia del tratamiento de minerales refractarios.

3.10. Recomendaciones

Optimización de condiciones operativas

Se recomienda que las plantas mineras optimicen las condiciones operativas del proceso de lixiviación, en particular la concentración de ácido sulfúrico, sulfato de hierro (III) y oxígeno, para maximizar la eficiencia en la recuperación de cobre. Esto debe incluir un estudio detallado de la granulometría y composición mineralógica del mineral, lo que permitirá ajustar los parámetros del proceso y garantizar una recuperación más rápida y efectiva del metal.

Uso de tecnologías más sostenibles

Es crucial que la industria minera explore tecnologías más sostenibles que permitan minimizar los impactos ambientales asociados al proceso de lixiviación, como la emisión de dióxido de azufre. Se recomienda invertir en sistemas de captura y tratamiento de gases, como los filtros de SO₂, y en el uso de reactivos menos dañinos para el medio ambiente. Esto contribuirá a mejorar la sostenibilidad del proceso a largo plazo, alineándose con las normativas ambientales y reduciendo el riesgo de contaminación.

Monitoreo ambiental continuo

Se sugiere implementar un monitoreo ambiental continuo en las zonas cercanas a las plantas de lixiviación, para detectar posibles impactos negativos como la acidificación de los suelos y la contaminación de fuentes de agua cercanas. El monitoreo en tiempo real de los niveles de pH, metales pesados y otros contaminantes ayudará a mitigar posibles daños al ecosistema y a la salud humana. Además, este monitoreo debe incluir el seguimiento de los residuos generados, asegurando su disposición adecuada.

Investigación en alternativas de reciclaje de reactivos

Para mejorar la sostenibilidad del proceso, se recomienda investigar y desarrollar métodos para reciclar los reactivos utilizados

en la lixiviación, como el ácido sulfúrico y el sulfato de hierro (III). El reciclaje de estos reactivos no solo reduciría los costos operativos, sino que también disminuiría la cantidad de residuos generados, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y al aumento de la eficiencia del proceso de extracción.

Capacitación y sensibilización en prácticas sostenibles

Es fundamental capacitar al personal de las plantas mineras en el uso eficiente de los recursos y en la aplicación de buenas prácticas de gestión ambiental. Esto incluye la correcta manipulación de los reactivos, la gestión de residuos y el cumplimiento de las normativas medioambientales. La sensibilización sobre la importancia de la sostenibilidad en la minería puede contribuir a la adopción de medidas preventivas que minimicen los riesgos ambientales y mejoren la competitividad de la industria a largo plazo.

Exploración de nuevos procesos tecnológicos

Se recomienda continuar investigando nuevas tecnologías y procesos alternativos que puedan mejorar aún más la eficiencia de la extracción de cobre de minerales refractarios. El uso de tecnologías innovadoras, como el uso de biolixiviación o el desarrollo de procesos electrometalúrgicos más eficientes, puede ofrecer soluciones más ecológicas y económicas para la industria minera, favoreciendo una transición hacia una minería más sostenible.

Fomento de la cooperación interinstitucional

Es recomendable fomentar la cooperación entre la industria minera, instituciones académicas y organismos gubernamentales para promover la investigación y el desarrollo de procesos más eficientes y sostenibles en la lixiviación de minerales. La colaboración permitirá compartir conocimientos, recursos y mejores prácticas, lo que puede acelerar la adopción de tecnologías más limpias y eficientes en la minería, beneficiando tanto al sector como a la comunidad en general.

Referencias bibliográficas

- Adrianto, L. R. and Pfister, S. (2022). Prospective environmental assessment of reprocessing and valorization alternatives for sulfidic copper tailings,” *Resour. Conserv. Recycl.*, 186, July, 106567. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106567.
- Ahtiainen, R., Liipo, J. and Lundström, M. (2021). Simultaneous sulfide oxidation and gold dissolution by cyanide-free leaching from refractory and double refractory gold concentrates, *Miner. Eng.*, 170, June. doi: 10.1016/j.mineng.2021.107042.
- Alfaro Alejo, R. and Gonzales Gonzales, V. A. (2008). *Estadística y probabilidades para ingenieros*. (1ra ed.). Universidad Nacional del Altiplano.
- Anderson, C. G. and Cui, H. (2021). Advances in mineral processing and hydrometallurgy. *Metals (Basel)*, 11(9). doi: 10.3390/met11091393.
- Andújar-Palao, J., Ormachea-Hermoza, R., Ruiz-Ruiz, M. y Chirinos-Cuadros, C. R. (2021). Minería del cobre en Perú: análisis de las variables exógenas y endógenas para gestionar su desarrollo. *Revista Venezolana de Gerencia*, 26(94), 784-801.
- Ardilla, M., Farias, L. and Mora, M. (2018). *Fundamentos investigativos*. (1ra ed.). Arquidiócesis de Tunja.

- Bai, X., Wen, S., Liu, J. and Lin, Y. (2018). Response surface methodology for optimization of copper leaching from refractory flotation tailings. *Minerals*, 8(4), 1–13. doi: 10.3390/min8040165.
- Canchanya, A. (2024). *Minería para la transición energética: desafíos y contradicciones de la explotación del cobre en Perú*. <https://climatetrackerlatam.org/>
- Carrasco Diaz, S. (2019). *Metodología de la investigación científica metodología de la investigación científica. Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación*.
- Chen et al. (2018). *Lixiviación Feriva de la Calcopirita y su Dependencia con el Efecto Galvanico de la Pirita, Universidad de Chile*. [Online]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gde.2016.09.008><http://dx.doi.org/10.1007/s00412-015-0543-8><http://dx.doi.org/10.1038/nature08473><http://dx.doi.org/10.1016/j.jmb.2009.01.007><http://dx.doi.org/10.1016/j.jmb.2012.10.008><http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-2212>
- da Fonseca, L. M. C. M. (2015). ISO 14001:2015: An improved tool for sustainability. *J. Ind. Eng. Manag.*, 8(1), 35–50. doi: 10.3926/jiem.1298.
- Davis, K. and Demopoulos, G. P. (2023). Hydrometallurgical recycling technologies for NMC Li-ion battery cathodes: current industrial practice and new R&D trends. *RSC Sustain.*, 1(8), 1932–1951. doi: 10.1039/d3su00142c.
- DECRETO SUPREMO N°014-2017-MINAM. (2017). Aprueban el Reglamento del Decreto Supremo N° 014-2017 Decreto Legislativo de Aprueba la ley Integral de Residuos Sólidos. *El Peruano*. MINAM, Lima - Perú, p. 32.

- Dreisinger, D. (2006). Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper. *Hydrometallurgy*, 83 (1–4), 10–20. doi: 10.1016/j.hydromet.2006.03.032.
- D. S. N°024-2016-EM (2016). Aprueban Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. *Norma Legal*. Presidencia de la Republica, Lima - Perú, p. 186. [Online]. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/901782/DS-024-2016-EM.pdf?v=1593568355>
- ECA Decreto Supremo N°004.2017-MINAM (2017). Aprueban Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. *Norma Legal*. El Diario el Peruano, Lima - Perú, p. 10.
- Ghahreman, A., Wang, J. and Faraji, F (2020). Effect of ultrasound on the oxidative copper leaching from chalcopyrite in acidic ferric sulfate media,” *Minerals*, 10(7), 1–17. doi: 10.3390/min10070633.
- Ghahremaninezhad, A., Asselin, E. and Dixon, D. G. (2010). Electrochemical evaluation of the surface of chalcopyrite during dissolution in sulfuric acid solution. *Electrochim. Acta*, 55(8), 5041–5056. doi: 10.1016/j.electacta.2010.03.052.
- Hao, J., Wang, X., Wang, Y., Wu, Y. and 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. doi: 10.1021/acsomega.1c06173.
- Hernández-Sampieri, R. and Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación. Las rutas cuantitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.

- Herrera Herbert, J. (2017). *Introducción a la Minería. (Vol. I) Conceptos, tecnologías y procesos.* https://oa.upm.es/63396/1/INTRODUCCION_MINERIA-Edicion2_LM1B1T2_R2-20180110.pdf
- Hiroiyoshi, N., Miki, H., Hirajima, T. and Tsunekawa, M. (2001). Enhancement of chalcopyrite leaching by ferrous ions in acidic ferric sulfate solutions. *Hydrometallurgy*, 60(3), 185–197. doi: 10.1016/S0304-386X(00)00155-9.
- Komulainen, T., Doyle, F. J., Rantala, A. and Jämsä-Jounela, S. L. (2009). Control of an industrial copper solvent extraction process. *J. Process Control*, 19(1), 2–15. doi: 10.1016/j.jprocont.2008.04.019.
- Lara Muñoz, E. (2011). *Fundamentos de Investigación.* (1ra ed.) Alfaomega Grupo Editor.
- L. de R. H. N°29338 (2009). Ley de Recursos Hídricos N°29338. Presidente de la República, Lima-Perú, p. 40.
- Ley General del Ambiente Ley N° 28611 (2016). Ley General del Ambiente LEY N° 28611. Congreso de la República, Lima - Perú, p. 45. [Online]. extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N°-28611.pdf
- Liu, Y., Zhao, S., Wang, G. and Yang, H. (2024). Copper leaching from complex chalcopyrite-rich ores: Utilizing mechanical activation and wastewater-based sulfuric acid system,” *Sep. Purif. Technol.*, 354(P1), 128631, doi: 10.1016/j.seppur.2024.128631.
- Maltrana, V. and Morales, J. (2023). The Use of Acid Leaching to Recover Metals from Tailings: A Review. *Metals (Basel)*, 13(11). doi: 10.3390/met13111862.

- Ministerio de Energía y Minas. (Diciembre 2024). *MINEM: Exportaciones mineras de cobre y oro registran notable incremento en mayo de 2024*. www.gob.pe/institucion/minem/noticias/1012206-minem-exportaciones-mineras-de-cobre-y-oro-registran-notable-incremento-en-mayo-de-2024
- Nicol, M., Ye, K. and Garrard, N. (2024). The combined leaching of copper, gold and uranium in chloride solutions. II. Concentrate leach tests,” *Hydrometallurgy*, 231. doi: 10.1016/j.hydromet.2024.106407.
- Nikouei Mahani, A., Karamoozian, M., Jahani Chegeni, M. and Mahmoodi Meymand, M. (2024). Effect of Stable Nanomicrobubbles on Sulfide Copper Flotation and Reduction of Chemicals Dosage,” *J. Min. Environ.*, 15(1), 261–283. doi: 10.22044/jme.2023.13205.2413.
- Propiedades químicas del Cobre. (Enero, 2025). Efectos del Cobre sobre la salud - Efectos ambientales del Cobre. *Lenntech*. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm>
- Radivojević, M., Rehren, T., Pernicka, E., Šljivar, D., Brauns, M. and Borić, D. (2010). On the origins of extractive metallurgy: New evidence from Europe. *J. Archaeol. Sci.*, 37(11), 2775–2787. doi: 10.1016/j.jas.2010.06.012.
- Ritcey, G. M. (2006). Solvent extraction in hydrometallurgy: Present and future,” *Tsinghua Sci. Technol.*, 11(2), 137–152. doi: 10.1016/S1007-0214(06)70168-7.
- Sinclair, L. and Thompson, J. (2015). In situ Leaching of Copper: Challenges and Future Prospects. *Hydrometallurgy*, 157, 306–324. doi: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.

- Supo, J. (2015). *Cómo escribir una tesis: Redacción del informe final de tesis*. (1ra Ed.). BIOESTADISTICO EIRL.
- Szymanowski, J. (2015). *Hidroxyoximes and Copper Hydrometallurgy*. Taylor & Francis Group. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/9780203751336_previewpdf.pdf
- Tanne, C. K., and Schippers, A. (2018). Electrochemical investigation of chalcopyrite (bio)leaching residues. *Hydrometallurgy*, 187, 8–17. doi: 10.1016/j.hydromet.2019.04.022.
- Tian, Z., Li, H., Wei, Q., Qin, W. and Yang, C. (2021). Effects of redox potential on chalcopyrite leaching: An overview. *Miner. Eng.*, 172, 107135. doi: 10.1016/j.mineng.2021.107135.
- Tran, D. T., Tran, N. T. T., Song, M. H., Pham, T. P. T., and Yun, Y. S. (2024). Thiosulfate-based leaching for eco-friendly urban mining: Recent developments and challenges. *Sep. Purif. Technol.*, 359. doi: 10.1016/j.seppur.2024.130775.
- ULMA .(2023). *Historia del cobre y sus usos*. <https://www.ulmaforge.com/noticia/historia-del-cobre-y-sus-usos/>
- Watling, H. R. (2013). Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 1. Review of acidic sulfate, sulfate-chloride and sulfate-nitrate process options. *Hydrometallurgy*, 140, 163–180. doi: 10.1016/j.hydromet.2013.09.013.
- Zhao et al.(2019). “The dissolution and passivation mechanism of chalcopyrite in bioleaching: An overview. *Miner. Eng.*, 136, (932), 140–154. doi: 10.1016/j.mineng.2019.03.014.

ANEXO

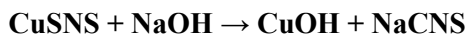
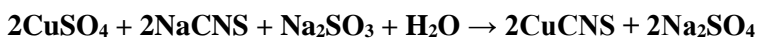


ANÁLISIS DEL COBRE
COBRE - METODO DEL PERMANGANATO DE POTASIO

Fundamento

Este método se basa en la precipitación del cobre como tiocianato cuproso, el cual se descompone después en filtro con NaOH al 7 % - 8 %, hirviendo, y después de lavar el filtro con agua caliente, la solución se hace ácida con H₂SO₄ (1:1) y se titula con solución valorada de permanganato de potasio hasta color rosa permanente.

El método se basa en las reacciones siguientes:



La solución del sulfocianuro cuproso en la manipulación de este método es posible que sufra una oxidación incompleta.

Procedimiento

1. Pesar de 0.5 a 2.0 gramos de muestra, preparada a malla-100, en Erlenmeyer de 300 mL.
2. Agregar 10-15 mL de ácido nítrico y atacar a bajo calor, cuando ha cesado de desprender vapores nitrosos, a regar 0.1 g de clorato de potasio y seguir atacando a bajo calor, hasta que quede en unos 7mL aproximadamente.
3. Agregar 5-10 mL de ácido clorhídrico y continuar el ataque hasta que quede 7 mL aproximadamente.
4. Agregar 5ml de ácido sulfúrico, seguir atacando hasta que comience a desprender vapores blancos, esfumar en la plancha caliente hasta el estado pastoso, bajar y enfriar.
5. Agregar cuidadosamente 30 mL de agua y calentar hasta ebullición, hervir por 5 minutos, bajarlos.
6. Filtrar en caliente, usando filtro N° 2 ó 4, recibiendo el filtrado en Erlenmeyer de 300 mL lavar bien los frascos, pasando varilla con goma si es necesario. Lavar el precipitado 5 veces con agua caliente. Descartar el residuo del filtro.
7. Neutralizar la solución con amoníaco, hasta que aparezca precipitado de fierro, agregar HCl gota a gota hasta que desaparezca el precipitado, agregar dos gotas de exceso, lavar las paredes del frasco con agua caliente.
8. Agregar 10-20 mL de solución de sulfito de sodio al 10% y calentar.

9. Agregar 5-10 mL de solución de sulfocianuro de sodio al 10% y hervir unos minutos más. Agregar más sulfito si el color rojo persiste. El precipitado debe ser blanco lechoso.
10. Filtrar la solución caliente, usando filtro N° 5 (o filtro doble N° 2 y 4). Pasar todo el precipitado al filtro lavando bien el frasco. Lavar el precipitado del filtro 5 veces con agua caliente. Descartar el filtrado.
11. Colocar debajo del embudo el frasco de 300 mL. Disolver el precipitado de CuCNS, con solución caliente de NaOH al 7 %, lavando dos veces, removiendo bien el precipitado.
12. Lavar 6 veces con agua caliente. Descartar el residuo del filtro.
13. Dejar enfriar la solución. Agregar 25 mL de ácido sulfúrico (1:1) al frasco y titular con solución valorada de permanganato de potasio.
14. Hacer una prueba en blanco usando los mismos reactivos. Descontar el blanco de la titulación.

$$\%Cu = \frac{\text{mL de la titulación} \times \text{factor de la solución}}{\text{Peso de l muestra}} \times 100$$

Notas.

- 1°. Cuando las muestras son pacos (coloreados) atacar primero con HCl y después con ácido nítrico y finalmente con ácido sulfúrico y esfumar. No usar clorato de potasio.
- 2°. Es posible eliminar el primer proceso de filtración, cuando las muestras no contienen mucho insoluble.
- 3°. Cuando las muestras son sulfuros, se puede eliminar el proceso de sulfatizar. Se ataca con nítrico y después con HCl, cuando está en estado siruposo, se agregan gotas de ácido sulfúrico y se lleva a sequedad, se enfría, diluye, hierve y filtra, etc., y se continúa.
- 4°. Cuando se usa ácido sulfúrico comercial (1:1) para la titulación, tener cuidado con el blanco, este varía según el sulfúrico tomado.

Es recomendable purificar el ácido sulfúrico comercial (1:1) antes de diluirlo, para lo cual se echa el sulfúrico en un matraz de 600 mL, se agrega cuidadosamente poco a poco y agitando, 1 gramo de clorato por litro, se calienta a ebullición, cuando está claro se deja enfriar hasta el día siguiente.

ISBN: 978-9942-679-47-5



9789942679475