

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA



T E S I S

**Eliminación de arsénico mediante el proceso de lixiviación alcalina con
NaOH y Na₂S en concentrados con alto contenido de cobre grises, Ancash**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor:

Bach. Jorge Luis CAMPOS ANGULO

Asesor:

Dr. Cayo PALACIOS ESPIRITU

Cerro de Pasco – Perú – 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA



T E S I S

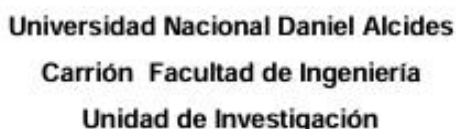
**Eliminación de arsénico mediante el proceso de lixiviación alcalina con
NaOH y Na₂S en concentrados con alto contenido de cobre grises, Ancash**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO
PRESIDENTE

Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO
MIEMBRO

Mg. Uldarico USURIAGA LOPEZ
MIEMBRO



La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

ELIMINACIÓN DE ARSÉNICO MEDIANTE EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN
ALCALINA CON NaOH Y Na_2S EN CONCENTRADOS CON ALTO
CONTENIDO DE COBRE GRIS. ANCASH

Bach. CAMPOS ANGULO, Jorge Luis

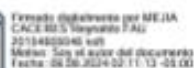
Dr. PALACIOS ESPIRITU, Cayo

Ingeniería Metalúrgica

18 %

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 9 de setiembre del 2024



DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres quienes me han apoyado para poder llegar a esta instancia de mis estudios, ya que ellos siempre han estado presentes para apoyarme moral y psicológicamente.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto, por permitirme cumplir con excelencia en el desarrollo de esta tesis. Gracias por creer en mí y gracias a Dios por permitirme vivir y disfrutar de cada día.

RESUMEN

La presente investigación se realizó por la necesidad de eliminar los contaminantes de arsénico, presentes en los concentrados de las pequeñas mineras en Ancash. Para ello, se tomaron muestras de concentrado de cobre, cuyo análisis químico reportó 23.47 % de Cu, 81.69 Oz-Ag/TC, 0.1 Oz-Au/TC, 6.44% de As, 6.13% de Sb, y 0.88% de Bi. La microscopia óptica de una muestra representativa determinó la presencia de especies de calcopirita, cobres grises, covelita, bornita, sulfosales de plata, plata nativa, pirita, arsenopirita, pirrotita y gangas.

En base a la mineralogía del concentrado de Cu, se realizaron pruebas de lixiviación alcalina con Na_2S y NaOH , evaluando dicho proceso a las temperaturas de 25°, 35°, 70°, y 95°C°, para periodos de 2, 4, 6, y 8 horas de proceso, cuyos mejores resultados demostraron que a 95°C y 6 horas de proceso, se lixivió 90.01%% de arsénico y 58.41% de antimonio, con una dosificación de 20 Kg/TM de NaOH y 60 Kg/TM de Na_2S . En base a las mejores pruebas de evaluación de tiempo y temperatura, se elaboró un diseño factorial de 2 niveles, 3 factores y 2 réplicas. Los factores que se evaluaron fueron la concentración de NaOH , y de Na_2S , así como la granulometría P80, y la mejor prueba se realizó con valores de 120 μ de P80, 40 k/t de NaOH , y 40 Kg/t de Na_2S , alcanzando una tasa de disolución del 98.76% de As, y 92.84% de Sb.

Palabras Clave: Eliminación de arsénico, Lixiviación alcalina, Cobres Grises

ABSTRACT

The present investigation was carried out due to the need to eliminate arsenic and antimony contaminants, present in the concentrates of small mining companies in Ancash. For this, samples of copper concentrate were taken, whose chemical analysis reported 23.47% of Cu, 81.69 Oz-Ag/TC, 0.1 Oz-Au/TC, 6.44% of As, 6.13% of Sb, and 0.88% of Bi. Optical microscopy of a representative sample determined the presence of species of chalcopyrite, gray coppers, covellite, bornite, silver sulfosalts, native silver, pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite and gangues.

Based on the mineralogy of the Cu concentrate, alkaline leaching tests were carried out with Na_2S and NaOH , evaluating said process at temperatures of 25°, 35°, 70°, and 95°C°, for periods of 2, 4, 6, and 8 hours of process, whose best results showed that at 95°C and 6 hours of process, 90.01%% of arsenic and 58.41% of antimony were leached, with a dosage of 20 Kg/MT of NaOH and 60 Kg/ TM of Na_2S . Based on the best time and temperature evaluation tests, a 2-level factorial design, 3 factors and 2 replications, was developed. The factors that were evaluated were the concentration of NaOH and Na_2S , as well as the P80 granulometry, and the best test was carried out with values of 120 μ of P80, 40 k/t of NaOH , and 40 Kg/t of Na_2S , reaching a dissolution rate of 98.76% of As, and 92.84% of Sb.

Keywords: Arsenic Removal, Alkaline Leaching, Gray Copper

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de sulfuros metálicos actuales presentan una complejidad mineralógica significativa al estar vinculados a elementos contaminantes como arsénico y antimonio, generando desafíos ambientales y de procesamiento. Minerales económicamente atractivos como la tetraedrita y la tennantita se ven afectados en valor debido a la presencia de estos contaminantes, llevando a penalizaciones en la adquisición de concentrados que exceden los límites permitidos por regulaciones ambientales rigurosas. Estas penalizaciones no solo impactan negativamente en los ingresos económicos de las operaciones mineras, sino que también limitan la competitividad de los concentrados en los mercados internacionales, donde se priorizan materiales de alta pureza.

Las tecnologías disponibles para eliminar estos contaminantes incluyen procesos pirometalúrgicos, que emiten gases tóxicos y compuestos arsenicales, y procesos hidrometalúrgicos, que representan una alternativa más limpia y eficiente. En particular, la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S ha demostrado ser efectiva para reducir el contenido de arsénico en concentrados complejos, siempre que se controle adecuadamente la temperatura, la concentración de reactivos y el tiempo de reacción. La evaluación efectiva de la disolución de contaminantes requiere un conocimiento detallado de la mineralogía y la distribución de especies, lo cual permite prever su comportamiento frente a distintos procesos.

En este escenario, la presente investigación se centra en la eliminación de arsénico mediante lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S en concentrados de cobre grises de Ancash, buscando desarrollar un proceso eficiente que permita disminuir la concentración de arsénico a niveles aceptables para el mercado. Este trabajo aborda aspectos clave como la caracterización geometalúrgica del mineral, los parámetros

operativos de la lixiviación y la evaluación de la eficiencia del proceso, con el objetivo de producir concentrados con mayor valor comercial y menor impacto ambiental, contribuyendo así a la sostenibilidad y competitividad de la industria minera en el Perú.

El contenido del trabajo está estructurado en cuatro capítulos. El Capítulo I incluye el planteamiento del problema, la formulación de objetivos, hipótesis y justificación de la investigación. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, con antecedentes, bases científicas y variables del estudio. En el Capítulo III se describe la metodología empleada, detallando el diseño experimental, la población, muestra y las técnicas de recolección y análisis de datos. El Capítulo IV presenta los resultados y su discusión, abarcando la caracterización del concentrado, pruebas de lixiviación y análisis estadístico. Finalmente, se exponen las conclusiones, recomendaciones y referencias que sustentan la investigación.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1.	Identificación y determinación del problema	1
1.2.	Delimitación de la investigación	2
1.3.	Formulación del problema	2
1.3.1.	Problema general	2
1.3.2.	Problemas específicos	3
1.4.	Formulación de objetivos	3
1.4.1.	Objetivos generales	3
1.4.2.	Objetivos específicos	3
1.5.	Justificación de la investigación	3
1.6.	Limitaciones de la investigación	4

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio	5
2.2.	Bases teóricas – científicas	8
2.3.	Definición de términos básicos	37
2.4.	Formulación de hipótesis	39

2.4.1. Hipótesis general	39
2.4.2. Hipótesis específica	39
2.5. Identificación de variables	39
2.6. Definición operacional de variables e indicadores	40

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación	41
3.2. Nivel de investigación	42
3.3. Métodos de investigación	42
3.4. Diseño de investigación	43
3.5. Población y muestra	43
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	44
3.6.1. Técnicas de recolección de datos	44
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos	45
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	46
3.8. Tratamiento estadístico	47

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	49
4.1.1. Preparación y planificación de la visita al campo	49
4.1.2. Selección del punto de muestreo	50
4.1.3. Toma y preparación de muestras	50
4.1.4. Preparación de las muestras en laboratorio	51
4.1.5. Uso de reactivos y pruebas experimentales	51
4.1.6. Documentación y sistematización de resultados	51

4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados	52
4.2.1.	Caracterización del concentrado	52
4.2.2.	Análisis químico del concentrado polimetálico	58
4.2.3.	Pruebas de lixiviación alcalina	58
4.3.	Prueba de hipótesis	71
4.3.1.	Prueba de la hipótesis general	71
4.3.2.	Prueba de la Hipótesis Específica 1	71
4.3.3.	Prueba de la Hipótesis Específica 2	72
4.4.	Discusión de resultados	73

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

ANEXOS:

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tabla de minerales de arsénico más comunes	12
Tabla 2 Concentración de arsénico en minerales	13
Tabla 3 Geología de depósitos de minerales de antimonio	15
Tabla 4 Geología de depósitos de minerales de antimonio	18
Tabla 5 Penalización por contener ciertos elementos en una fundición	20
Tabla 6 Límites superiores de concentración en elementos sancionables	20
Tabla 7 Límites superiores de concentración en elementos sancionables	21
Tabla 8 Parámetros operativos en las tecnologías ASL	26
Tabla 9 Parámetros de operación recomendados para la lixiviación con ácido sulfúrico de concentrados de flotación con sulfato de aluminio	29
Tabla 10 Parámetros operativos para los procesos Cominco y MAC	32
Tabla 11 Clasificación de minerales opacos	35
Tabla 12 Operacionalización de variables	40
Tabla 13 Ensayos químicos en % (Cu, As, Sb, y Bi) y en Oz/TC (Au y Ag)	53
Tabla 14	55
Tabla 15 Ensayos químicos en % (Cu, As, Sb, y Bi) y en Oz/TC (Au y Ag)	58
Tabla 16 Condiciones de operación de lixiviación alcalina para evaluar la temperatura	
Tabla 17 Resumen de las pruebas de lixiviación	60
Tabla 18 Constantes de operación para una lixiviación de 6 horas a 95°C	62
Tabla 19 Variables analizadas en el diseño factorial	62
Tabla 20 Diseño factorial	63
Tabla 21 Anova de extracción de arsénico	64
Tabla 22 Resumen del modelo de la lixiviación de arsénico	65

Tabla 23 Diseño factorial de extracción de antimonio	67
Tabla 24 Resumen del modelo de la lixiviación de antimonio	69
Tabla 25 Presentación de la maximización de las variables	69
Tabla 26 Configuración de las variables principales	69
Tabla 27 Ajuste de las extracciones	70
Tabla 28 Ensayos químicos de la mejor prueba	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fuentes de arsénico	9
Figura 2 Vías de exposición humana al arsénico	10
Figura 3 a) Diagrama Eh-pH del sistema SH 2 O a 298 K y (b) 378 K	23
Figura 4 Proceso Cominco	31
Figura 5 Pirámide de la caracterización geometalúrgica	34
Figura 6 Microscopio óptico de luz reflejada	36
Figura 7 Diseño de la investigación	42
Figura 8 Volumen porcentual de los minerales de la muestra	53
Figura 9 Grados de liberación de los minerales de la muestra	54
Figura 10 Distribución porcentual de los entrelazamientos	56
Figura 11 Micrografía que muestra la presencia de GGs, CGRs y py	56
Figura 12 Micrografía que muestra la presencia de GGs, CGRs y cp	57
Figura 13 Micrografía que muestra la presencia de GGs, CGRs, cp y Ag	57
Figura 14 Micrografía que muestra la presencia de GGs, CGRs, apy y po	58
Figura 15 Extracción de arsénico en función del tiempo	61
Figura 16 Extracción de antimonio en función del tiempo	61
Figura 17 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de extracción de arsénico ...	64
Figura 18 Efectos normales (absolutos) estandarizados de extracción de arsénico	65
Figura 19 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de extracción de antimonio	67
Figura 20 Efectos normales (absolutos) estandarizados de extracción de antimonio ..	68
Figura 21 Efectos normales (absolutos) estandarizados de extracción de antimonio ..	70

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Identificación y determinación del problema

Los minerales de cobre grises exhiben niveles de arsénico y antimonio que complican su comercialización. En el ámbito experimental, se abordará la Tetrahedrita y la Tenantita como minerales de cobre gris, cuya fórmula química constituye la solución sólida $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ - $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$, donde la sustitución progresiva del arsénico por antimonio da origen a diferentes minerales de la serie (Antimonio: Tetrahedrita, Arsénico: Tenantita). Estos minerales se concentran mediante procesos de conminución y flotación, logrando concentrados ricos en cobre (Cu) y plata (Ag), pero con niveles elevados de contaminantes de arsénico (As) y antimonio (Sb), que pueden representar hasta el 25% del valor equivalente de los minerales pagables.

La elevada presencia de contaminantes tiene un impacto negativo en el ámbito comercial, ya que las refinerías penalizan estos productos hasta en un 50% de su valor pagable de cobre y plata. Esto obstaculiza el desarrollo de la explotación y la implementación de nuevos proyectos mineros. Actualmente, los

procesos pirometalúrgicos de tostación se emplean para controlar el arsénico, pero este enfoque es altamente contaminante debido a la emisión de partículas volátiles de base arsénico, reconocidas por su potencial cancerígeno. Por ello, se busca desarrollar metodologías de trabajo que limiten los impactos ambientales según las regulaciones pertinentes, al tiempo que se mejora la productividad de materias primas libres de contaminantes.

1.2. Delimitación de la investigación

La investigación del proyecto Eliminación de arsénico mediante el proceso de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S en concentrados con alto contenido de cobre grises, Ancash, permitirá mejorar la calidad de los concentrados de cobre por la eliminación del arsénico, en el departamento de Ancash, y así podrá aumentar la rentabilidad del proceso actual, de esta manera mejoraremos la eficiencia del procesamiento de estos tipos de yacimientos, incrementando la producción nacional de cobre y por consiguiente el aumento de los ingresos por producción de este metal.

El alcance de la presente investigación está orientado para el procesamiento de minerales de cobres grises y el post tratamiento de los concentrados mediante la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S, en el departamento de Ancash.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿De qué forma eliminamos el arsénico mediante la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S en concentrados con alto contenido de cobres grises en el departamento de Ancash?

1.3.2. Problemas específicos

PE1: ¿Cómo caracterizar mineralógicamente el concentrado de flotación para determinar las especies de minerales, distribución volumétrica, grados de liberación y enlaces presentes en los concentrados de flotación en el departamento de Ancash?

PE2: ¿Cómo reducimos arsénico mediante la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S en los concentrados con alto contenido de cobres grises, teniendo en cuenta las variables independientes, dependientes y constantes que intervienen en el proceso?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivos generales

Eliminar arsénico mediante el proceso de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S en los concentrados con alto contenido de cobres grises.

1.4.2. Objetivos específicos

OE1: Caracterizar mineralógicamente los concentrados de flotación, para determinar las especies mineralógicas presentes, distribución volumétrica, grados de liberación, tamaño de partícula, partículas libres y entrelazados, en el departamento de Ancash.

OE2: Reducir el arsénico mediante la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S para eliminar el arsénico en los concentrados con alto contenido de cobres grises, teniendo en cuenta las variables independientes, dependientes y constantes que intervienen en el proceso mediante pruebas metalúrgicas.

1.5. Justificación de la investigación

La importancia del desarrollo del proyecto de tesis expuesto implica el crecimiento y nuevas oportunidades en la industria de la refinación o tratamiento

de minerales con contenido de arsénico empleando tecnologías que generen menos contaminación, comparado con los procesos convencionales de tostación, las cuales ponen en peligro la vida de todo ser vivo. Así mismo la mejora en la calidad de los concentrados generará aumento en la rentabilidad de los procesos, alentando la inversión nacional y extranjera en yacimientos que no son explotados por el alto contenido de contaminante tipo arsénico que estos presentan.

Así también se podría abrir paso a la generación de trióxidos de arsénico para el sector de agricultura y control de plagas, las cuales se obtendrían por sobresaturación y precipitación de las soluciones residuales productos de la primera industria descrita.

1.6. Limitaciones de la investigación

El proyecto de investigación está orientado para las empresas que produzcan concentrados con altos contenidos de cobres grises en el departamento de Ancash, los cuales presentan altos porcentajes de arsénico que generan la reducción de los ingresos por ventas de esta materia prima. Sobre los cuales no existen información suficiente de estudios relacionados a la reducción de arsénico en concentrados de cobre.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Shun et al. (2023), llevaron a cabo un estudio titulado “Citrate-enhanced leaching of arsenic from coal with simulated flue gas under UV irradiation” en el que se exploraron los efectos del ácido cítrico en la lixiviación del arsénico presente en el carbón. Para ello, se introdujo una mezcla de gas de humos simulada que contenía SO_2 y O_2 en una suspensión de carbón con citrato añadido en un reactor agitado de 1 L. Se investigaron los efectos de los principales factores en la lixiviación y oxidación del arsénico, y se analizó el mecanismo de reacción mejorado. En este estudio, se demostró que la adición de ácido cítrico y la irradiación UV mejoran significativamente la lixiviación de pirita de carbón y arsénico asociado. El ácido cítrico aumenta la concentración de hierro soluble, inhibe la readsorción del arsénico y la formación de productos sólidos de hierro pasivos, mientras favorece la generación de radicales libres. La irradiación UV intensifica la producción de estos radicales, que promueven la disolución oxidativa de la pirita y el arsénico, incluyendo la oxidación del arsénico trivalente.

Los resultados sugieren que esta combinación puede ser un enfoque efectivo para mejorar la lixiviación de arsénico en el carbón.

Yang et al. (2022), llevaron a cabo un estudio titulado “Leaching behaviors of copper and arsenic from high-arsenic copper sulfide concentrates by oxygen-rich sulfuric acid leaching at atmospheric pressure” en el que se exploraron los comportamientos de lixiviación del cobre y el arsénico presentes en los concentrados de sulfuro de cobre con alto contenido de arsénico (HACSC, por sus siglas en inglés). Se determinó que la temperatura, el flujo de oxígeno, la relación líquido-sólido, la concentración de ácido sulfúrico y el tiempo son factores importantes que afectan la eficiencia de lixiviación de ambos metales, siendo el cobre más sensible a estos factores que el arsénico. Las condiciones óptimas de lixiviación se establecieron a una temperatura de 80 °C, relación líquido-sólido de 20:1, velocidad de agitación de 400 r·min⁻¹, flujo de oxígeno de 2 L·min⁻¹ y concentración de ácido sulfúrico de 270 g·L⁻¹. Bajo estas condiciones, se logró una alta lixiviación de cobre (>99% en 18 horas) y arsénico (>95% en 36 horas). Los análisis de difracción de rayos X (XRD) y microscopía electrónica de barrido/espectrómetro de dispersión de energía (SEM/EDS) respaldaron los resultados de lixiviación, demostrando cambios en las fases y morfologías de los minerales. Estos hallazgos contribuyen al entendimiento de los procesos de lixiviación y tienen implicaciones para optimizar la extracción de cobre y arsénico en aplicaciones industriales.

Wu et al. (2022), llevaron a cabo una investigación titulada: “Eco-friendly extraction of arsenic and tungsten from hazardous tungsten residue waste by pressure oxidation leaching in alkaline solutions: Mechanism and kinetic model”, se presentó un método de lixiviación oxidativa alcalina a presión para la

extracción simultánea de arsénico y tungsteno de residuos de tungsteno peligrosos (TRW). Los resultados experimentales muestran que el método propuesto es altamente efectivo en la extracción de arsénico y tungsteno, con una eficiencia de extracción del 99,6% y 97,5%, respectivamente. Además, se encontró que la concentración de hidróxido de sodio, la relación líquido-sólido y la temperatura son factores críticos que afectan la eficiencia de extracción. El uso de TRW como recurso secundario de tungsteno puede reducir significativamente la dependencia de los recursos primarios y minimizar la contaminación ambiental. En conclusión, este método tiene un gran potencial para la recuperación de arsénico y tungsteno de residuos peligrosos y puede ser una alternativa más ecológica y sostenible a los métodos tradicionales de extracción.

Liu et al. (2022), en su trabajo de investigación titulada “Removal and reuse of arsenic from arsenic-bearing purified residue by alkaline pressure oxidative leaching and reduction of As (V)” se enfocaron en la eliminación y reutilización del arsénico de los residuos purificados que contienen arsénico. Los resultados del estudio muestran que la lixiviación oxidativa a presión alcalina es un método efectivo para la extracción de arsénico, con una tasa de extracción del 98,6%. Además, la reducción de As (V) a As (III) mediante el método de reducción de sulfato de hierro es un método efectivo para la eliminación selectiva de arsénico, con una tasa de eliminación del 99,9%. El arsénico reducido también puede ser utilizado como un aditivo de aleación de cobre-arsénico de alta calidad. En resumen, estos métodos son efectivos para la eliminación y reutilización del arsénico de los residuos purificados que contienen arsénico.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Minerales de arsénico

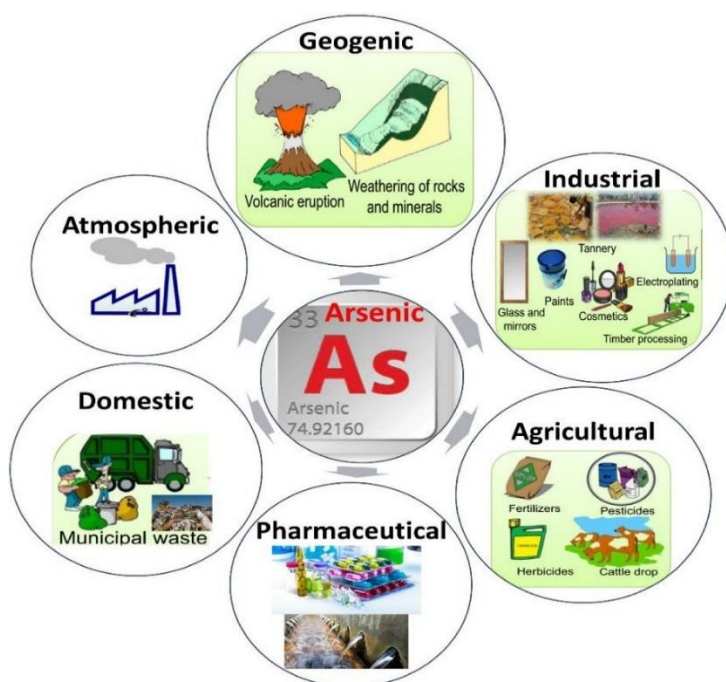
El arsénico puede existir en el medio ambiente tanto en forma orgánica como inorgánica en varios estados de oxidación como As(3-), As(0), As(3+) y As(5+) (Sharma & Sohn, 2009). En general, el arsénico inorgánico es más tóxico que el arsénico orgánico y las especies de arsénico que se encuentran en el agua natural y el arroz son principalmente arseniato inorgánico (InAsV) y arsenito (InAsIII) tóxicos (Williams et al., 2005; Abuawad et al., 2021). El arsénico es un metaloide tóxico ampliamente conocido que se encuentra de forma natural y se distribuye de manera generalizada en el medio ambiente, como el agua, el suelo y el aire (Mandal & Suzuki, 2002; Singh et al., 2015). La contaminación del agua subterránea con arsénico se ha informado en todos los continentes, incluyendo Asia, África, América del Norte, América del Sur, Europa y Oceanía, y se considera una preocupación a nivel mundial. Se estima que más de 200 millones de personas en todo el mundo están potencialmente expuestas a los niveles más altos de arsénico en el agua subterránea, principalmente en Asia (Podgorski & Berg, 2020; Shaji et al., 2021). La contaminación del agua subterránea con arsénico también se ha reportado en numerosos países, como Estados Unidos, China, Taiwán, México, Mongolia, Myanmar, Argentina, India, Chile, Camboya, Nepal, Filipinas, Vietnam, Afganistán, Indonesia y Pakistán (Rahaman et al., 2021).

La exposición al arsénico afecta prácticamente todos los sistemas corporales en los seres humanos, siendo los más afectados el sistema cardiovascular, el sistema nervioso, el sistema hepático, el sistema renal, el sistema hematológico, el sistema endocrino, el sistema respiratorio y el sistema

reproductivo (Rahman et al., 2018). Además de impactar la salud de los adultos, la exposición al arsénico también tiene efectos perjudiciales en la salud infantil. La exposición materna al arsénico durante el embarazo se ha asociado con un mayor riesgo de mortalidad infantil, aborto espontáneo, muerte fetal, parto prematuro, bajo peso al nacer, retraso en el crecimiento infantil, sistema inmunitario debilitado, menor coeficiente intelectual, neurotoxicidad y deterioro del desarrollo neurológico (Vahter, 2008). Sin embargo, la toxicidad del arsénico es más frecuente en las personas con una ingesta baja de proteínas, y las personas desnutridas son más susceptibles a desarrollar lesiones cutáneas relacionadas con el arsénico. La principal fuente natural de arsénico es de origen geogénico, que incluye la actividad geotérmica, rocas sedimentarias enriquecidas con arsénico, rocas volcánicas, minerales, carbón, agua geotérmica y actividades volcánicas (Rahaman et al., 2022).

Figura 1

Fuentes de arsénico

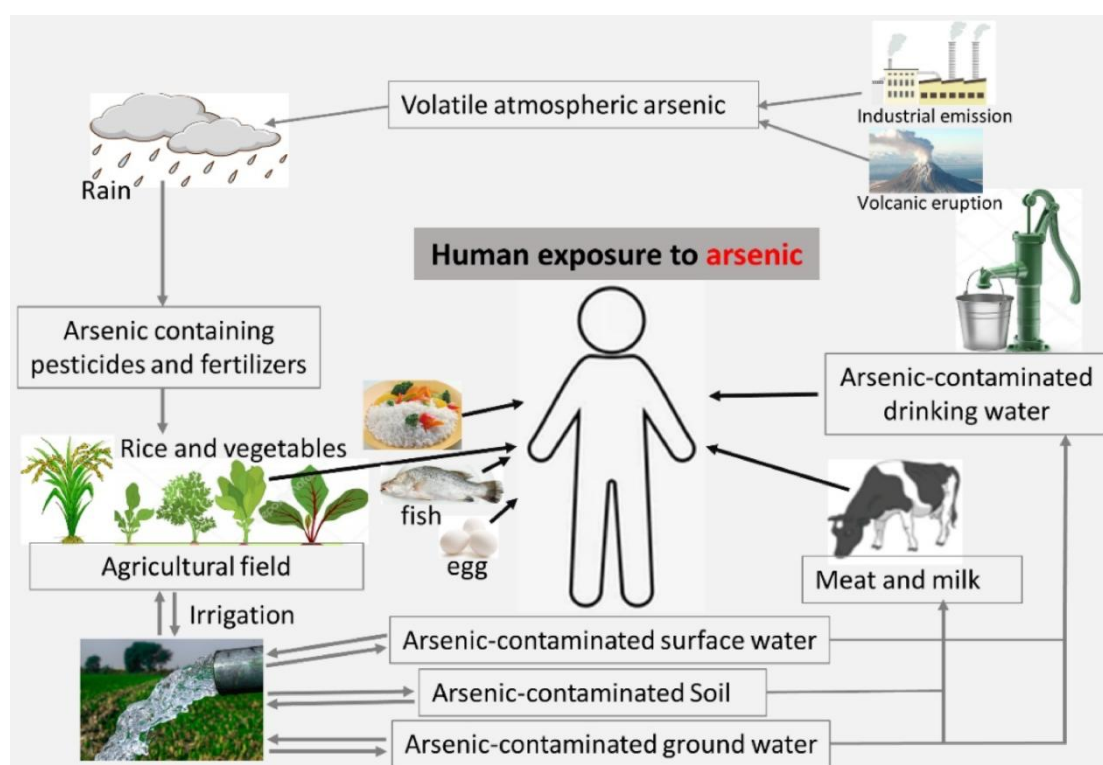


Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Rahaman et al. (2022).

Es ampliamente aceptado que la contaminación por arsénico en las aguas subterráneas es principalmente resultado de procesos biogeoquímicos naturales y fuentes geogénicas naturales, como minerales y rocas enriquecidas con arsénico, en lugar de fuentes o actividades antropogénicas (Zinke, 2020). Sin embargo, las acciones humanas, como la extracción excesiva y el bombeo de agua subterránea, el uso de pesticidas con contenido de arsénico, fertilizantes fosfatados y riego con agua contaminada con arsénico en prácticas agrícolas, pueden desencadenar y contribuir al proceso de contaminación por arsénico (Jayasumana et al., 2015)

Figura 2

Vías de exposición humana al arsénico



Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Rahaman et al. (2022).

El arsénico es un metaloide presente en más de 200 minerales diferentes, que incluyen arseniuros, sulfuros, óxidos elementales, arseniatos, arsenitos y sulfosales, los cuales se encuentran en diversas formas en la naturaleza. Algunos de los minerales más comunes que contienen arsénico incluyen la arsenopirita,

enargita, tennantita, rejalgar y oropimente. La arsenopirita es el mineral con mayor contenido de arsénico y se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza. Además, muchos yacimientos de cobre contienen altas concentraciones de arsénico, como es el caso de los minerales enargita (Cu_3AsS_4) y tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) presentes en los cobres grises (Smedley & Kinniburgh, 2002).

Enargita: La enargita es un mineral que se caracteriza por ser un sulfuro de cobre y arsénico, presentando una apariencia que oscila entre el gris y el rosado con un brillo semi metálico. Se distingue por su notable exfoliación en una dirección y por sus cristales de forma prismática. Fue descubierto por primera vez en Perú en el año 1850. Su nombre proviene de la palabra griega "enarge", que significa "distinto", en referencia a su exfoliación predominante. (Landa, 2018). La complejidad mineralógica de este tipo de mineral arsenical, como la enargita, dificulta su control mediante técnicas convencionales de flotación, ya que tiende a flotar fácilmente con la adición de Xantatos. Su composición química se compone de 48,42% de Cu, 19,02% de As y 32,56% de S, y puede contener pequeñas cantidades de otros elementos como el mercurio y el antimonio (Basurco, 2019).

Tennantita: La tennantita es el mineral de cobre más abundante después de la enargita. Su composición química incluye 48,50% de Cu, 27,04% de S, 18,82% de As, 2,77% de Fe y 2,44% de Sb. Se encuentra comúnmente en depósitos de calcopirita, pero también puede estar asociada con esfalerita, galena o pirita. Su apariencia varía desde un color gris acero hasta negro, y presenta un brillo metálico con un sistema cristalino isométrico (Puga, 2014).

La tabla 1 proporciona una descripción de los minerales principales que contienen arsénico, los cuales están asociados con diversos yacimientos, junto con su correspondiente composición química.

Tabla 1

Tabla de minerales de arsénico más comunes

Mineral	Composición	Ocurrencia
Arsénico nativo	As	Venas hidrotermales
Realgar	AsS	Filones y noritas
Oropimente	As ₂ S ₃	Filones, muchas veces asociado con
Cobaltita	CoAsS	oropimente, arcillas y carbonatos en Depósitos de alta temperatura, rocas
Arsenopirita	FeAsS	Es el mineral de As más abundante.
Tennantita	(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃	Venas hidrotermales
Enargita	Cu ₃ AsS ₄	Venas hidrotermales
Arsenolita	As ₂ O ₃	Mineral secundario formado por
Claudetita	As ₂ O ₃	oxidación de arsenopirita, arsénico Mineral secundario formado por
Escorodita	FeAsO ₄ .2H ₂ O	oxidación de arsenopirita, arsénico Mineral secundario
Annabergita	(Ni,Co) ₃ (AsO ₄).8H ₂ O	Mineral secundario
Hoernesita	Mg ₃ (AsO ₄).2.8H ₂ O	Mineral secundario, en escorias
Hematolita	(Mn,Mg) ₄ Al(AsO ₄)(OH) ₈	Mineral en fisuras de rocas
Conicalcita	CaCu(AsO ₄)(OH)	Mineral secundario
Farmacosiderita	Fe ₃ (AsO ₄) ₂ (OH) ₃ .5H ₂ O	Producto de oxidación de arsenopirita y

Fuente: Recuperado del informe elaborado por Lillo (2010).

Existen minerales que contienen arsénico en proporciones menores, desde formas primarias hasta secundarias. En los sulfuros, el arsénico puede reemplazar al azufre en la estructura del mineral, llegando a representar más del 10% del peso total del mineral. Algunos ejemplos de estos minerales son la galena, la marcasita, la pirita y la calcopirita. La pirita autigénica juega un papel crucial en el ciclo

geoquímico del arsénico, ya que se encuentra en lagos, ríos, acuíferos y fondos marinos. Durante la formación de la pirita, el arsénico puede incorporarse en su estructura. Además, con los cambios climáticos, la pirita puede oxidarse y liberar arsénico (Lillo, 2010).

Otras especies mineralógicas que contienen arsénico son los óxidos y oxihidróxidos de hierro, así como, en menor medida, los de aluminio y manganeso. En estos minerales, el arsénico puede estar presente en su estructura o absorbido en su superficie. Además, los fosfatos pueden contener grandes concentraciones de este elemento. El arsénico puede reemplazar al silicio, aluminio, hierro y titanio en varios minerales, y se encuentra en bajas concentraciones en diferentes minerales formadores de rocas, como se muestra en la tabla 2 (Lillo, 2010).

Tabla 2

Concentración de arsénico en minerales

Tipo de Mineral	Mineral	Concentración de As (ppm)
Sulfuros	Pirita	100 – 77000
	Pirrotina	5 – 100
	Galena	5 – 10000
	Esfalerita	5 – 17000
	Calcopirita	10 – 5000
	Hematites	Hasta 160
Óxidos	Óxidos de Fe	Hasta 2000
	Oxihidróxido de Fe (III)	Hasta 76000
	Magnetita	2,75 – 41
	Cuarzo	0,4 – 1,3
Silicatos	Feldespato	< 0,1 – 2,1
	Biotita	1,4
	Anfíbol	1,1 – 2,3
	Olivino	0,08 – 0,17
	Piroxeno	0,05 – 0,8
	Calcita	1 – 8
Carbonatos	Dolomita	< 3
	Siderita	< 3
	Yeso/Anhidrita	< 1 – 6
Sulfatos	Barita	< 1 – 12
	Jarosita	34 – 1000
Fosfatos	Apatito	< 1 – 1000

Fuente: Recuperado del informe elaborado por Lillo (2010).

2.2.2. Emisión de arsénico

Es fundamental implementar medidas para controlar y reducir las emisiones de arsénico, ya que esto puede disminuir significativamente el riesgo asociado con sus fuentes. En la actualidad, se estima que las actividades humanas son responsables del 66% al 90% de las emisiones totales de arsénico en la atmósfera. Dentro de estas fuentes antropogénicas, la fundición de metales, la quema de carbón y la incineración de desechos contribuyen con porcentajes significativos, representando el 35% al 65%, el 11% al 30% y el 0,5% al 15%, respectivamente (Wai et al., 2016). Estos hallazgos evidencian que la quema de carbón es una fuente antropogénica de emisiones de arsénico de gran relevancia. Se calcula que las concentraciones promedio de arsénico en los depósitos de carbón de China y Estados Unidos son de 5,8 µg/kg y 15 µg/kg, respectivamente, y aproximadamente el 6% se libera al ambiente durante el proceso de combustión (Tian et al., 2016). Es aún más preocupante que en ciertas zonas de Australia, la concentración de arsénico en el lignito puede llegar a ser tan alta como 15 mg/kg (Zhang et al., 2016).

2.2.3. Minerales de antimonio

Este elemento se halla en depósitos asociados con rocas ígneas, manifestándose en rocas ácidas intermedias y granitos, incluyendo las monzonitas, cuarzo-monzonitas, dioritas y cuarzo-dioritas (Giron, 2007).

En Perú, las menas de antimonio se localizan típicamente en forma de filones, en regiones como Junín, Huancavelica y Cusco. Este metaloide se encuentra a menudo en las vetas a poca profundidad, asociado con otros minerales como blenda, pirita, scheelita y cuarzo (Giron, 2007).

Tetraedrita: La tetraedrita, cuyo nombre se deriva de los cristales cúbicos en forma de tetraedro, tiene un brillo metálico y un color que varía desde el gris acero hasta el negro. Es una sulfosal de cobre y antimonio con la fórmula $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$, y raramente se encuentra en su forma pura, es decir, suele tener elementos sustitutivos en su estructura molecular como el zinc, la plata, el mercurio, el plomo, entre otros. Fue mencionada por primera vez en 1845 en Freiberg, Sajonia, Alemania (Kapera & Koleżyński, 2022).

En la tabla 3, se organizan las principales menas y ocurrencias en el mundo que se tienen del antimonio.

Tabla 3

Geología de depósitos de minerales de antimonio

Nombre de la mena	Ocurrencias principales	Observaciones
Antimonio Nativo	West Gore, Nueva Escocia	
	Wolfe Co., Quebec	
	Near Armidable Co. Sandon, New South Wales	Masivo, con un corteza de óxido
	Erskine Creek, Kern Co., California	Nodular, revestido con óxido de antimonio
	Cerca de Viruela, Malaya, España	Impregnando pizarras
	Bidi, British Norte de Borneo	En vetas y detritus
	Sidi – Rgheiss, Argelia	Como senarmontita
Óxidos	Sensa, Algeria	Como valentinita
Hidróxidos (Estibiconita)	El Altar, Sonora, México	

Oxisulfuros (Kermesita)	Toscaza	
	Sur de Rodesia	Impregnando esquistos
	Hastings & Frontenac Co.	Asociada con plata
	Québec	
	Distrito Oruro plata- estaño, Bolivia	Asociado con tetraedrita
	Distrito Tasasi, plata, Bolivia	Asociado con tetraedrita, con alguna estefanita, franckeita y kylindrita
	Soana di Campligia, Italia	Asociada con tetraedrita rica en plata
	Santa Rosa, Santiago de Chuco, Perú	Jamesonita argentífera asociada a tetraedrita
	Distrito Ywelo, Sur de Rodesia	Asociada a estibinita
Jamesonita	Wolfsberg, E. Harz	Asociada a estibinita, zinkenita, bournonita y calcoestibinita
	Servier Co. Arkansas	Asociada a estibinita y zikenita
	Pribham, Bohemia	Asociada a boulangerita en lodos apareciendo plata
	Rosena, Checoslovaquia	Asociada a berthierita y estibinita
	Zimapán, Hidalgo, México	Asociado a pirita, arsenopirita, etc., jamesonita en grandes cantidades
	Distrito de Arabia, Nevada	Asociado a bindeimita
Tetraedrita	Área de Wheaton River, Yukon	Asociada a galena argentífera

	México, Bolivia, Perú,	Frecuentemente se presenta entre otros.	en vetas, apreciando plata
	Idaho, EE.UU.		
	Djebel Nador, Argelia	Asociado a menas de plomo – zinc	
	Broken Hill y Chancarcillo		
Nadorita (PbSbO_2Cl)	Huitzucó, Guerrero, México	Estibinita	
Dicrasita (Ag_3Sb)			
Livingstonita y Barcenita	West Gore, Nueva Escocia; Costerfields, cerca de Bendigo, Victoria; La Lucette, Francia; Murchison Range, Treansvaal, Sur África; Alaska, Nevada, México, Nueva Zelanda	En la mayoría de los casos el objetivo es recubierto de oro; el contenido de antimonio es considerado como de importancia secundaria.	

Fuente: Recuperado de la tesis elaborada por Giron (2007).

2.2.4. Fuentes de antimonio en el medio ambiente

El antimonio tiene formas inorgánicas y orgánicas en el ambiente (Cai et al., 2016). Aunque la cantidad de Sb en la corteza es muy baja, perteneciente a los escasos recursos minerales, el contenido de Sb en el entorno geoquímico aumentó debido a la explotación del mineral de Sb y al uso de compuestos de Sb. Además, la meteorización de las rocas, la pérdida de suelo y el uso generalizado de productos industriales con Sb también son causas importantes de la contaminación por Sb (Wu et al., 2008).

Diferentes países y regiones, incluidos China, Noruega, Finlandia, Etiopía, Pacífico Norte, Atlántico Norte, Suiza, Alemania, Japón han detectado concentraciones de Sb en aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas marinas,

suelo y organismos vivos respectivamente, los detalles como a continuación (Tabla 4).

Tabla 4

Geología de depósitos de minerales de antimonio

Ubicación (Países)	Fuentes ambientales	Concentraciones
11 países y regiones diferentes	aguas superficiales	0,03–0,07 µg/L
Río Yangtze, China	aguas superficiales	0,029–0,736 µg/L (Sb(III)) 0,121–2,567 µg/L (Sb(V))
476 muestras de agua subterránea, Noruega	agua subterránea	0,002–8.000 µg/L
739 Pozos, Finlandia	agua subterránea	0,02–0,82 µg/L
138 agua subterránea sin filtrar, Etiopía	agua subterránea	0,002–1,780 µg/L
Ambiente anóxico de las aguas subterráneas.	agua subterránea	0,008 µg/L (Sb(III)) 0,012 µg/l (Sb(V))
Capa inferior en el río Yangtze, China	agua subterránea	0,023–0.116 µg/L (Sb(III)) 0,047–0,441 µg/L (Sb(V))
Pacífico Norte	aguas marinas	0,09–0,14 µg/L
Atlántico Norte	aguas marinas	0,21 mcg/l
Océano Atlántico occidental	aguas marinas	0,13 mg/l
300 m de nueva mina South Sales, Australia	Suelo	39,4 mg/kg
Minas de Xishan, China	Suelo	5949,20 mg/kg
Campo de tiro, Suiza	Suelo	13,8 g/kg
Buenos Aires, Argentina	Atmósfera	0,9–15,3 ng/m ³
Tokio, Japón	Atmósfera	5,7–16 ng/m ³
Minería de estaño de Dachang, China	Atmósfera	575 mg/m ³
	Organismos	1367 mg/kg (Hojas)

Achillea en la antigua zona de Sb, Italia		1105 mg/kg (flores)
Plantago en la antigua zona de Sb, Italia	Organismos	1150 mg/kg (raíces)
Silene en la antigua zona de antimonio, Italia	Organismos	1164 mg/kg (tallos vulgaris)
Pescado en río contaminado, Japón	Organismos	0,06 µg/g (peces omnívoros) 0,42 µg/g (pez carnívoro)
19 hortalizas cultivadas en el suelo minero abandonado	Organismos	<0,02–0,09 mg/kg (raíz) 0,02–2,2 mg/kg (hojas) 0,02–0,06 mg/kg (fruta)
Oryza sativa creciendo en la fundición de antimonio en estaño, China	Organismos	225,34 mg/kg (raíces) 18,78 mg/kg (hojas de tallo) 5,79 mg/kg (Semillas)

Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Li et al. (2018).

2.2.5. Métodos de eliminación de arsénico y antimonio a partir de concentrados de cobre

Los contaminantes como el arsénico, antimonio, mercurio, bismuto, entre otros, presentes en los concentrados de metales, generan penalizaciones o deducciones económicas debido a su peligrosidad para el medio ambiente. Los procesos de transformación de cobre establecen límites permisibles para estos contaminantes, como se detalla en las tablas 5 y 6, ya que el aumento de estos elementos resultará en emisiones dañinas excesivas y deterioro de los equipos de fundición (Bazan et al., 2015). Debido a lo anteriormente descrito, emergen tratamientos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos con el objetivo de reducir los contaminantes antes de su tratamiento posterior; estos primeros tipos de tratamientos están perdiendo uso debido a las fuertes contaminaciones que generan y el difícil control de los elementos contaminantes fácilmente volatilizables en estos tipos de procesos. Por otro lado, los procesos

hidrometalúrgicos resultan bastante atractivos para el pretratamiento de concentrados con alto contenido de contaminantes (Azañero et al., 2004).

Tabla 5

Penalización por contener ciertos elementos en una fundición

Elemento	NCM (% o ppm)	Penalidad (US\$/DMT de concentrado)
As	0,2%	\$2.50/0,1% por NCM
Bi	0,05%	\$0.30/0,01% por NCM
Cl	0,05%	\$0.50/0,01% por NCM
F	330 ppm	\$0.10/10 ppm por NCM
Hg	10 ppm	\$0.20/1ppm por NCM
Pb	1%	\$1.50/1,0% por NCM
Sb	0,1%	\$0.50/0,01% por NCM
Zn	3,0%	\$1.50/1,0% por NCM
Ni + Co	0,5%	\$0.30/0,1% por NCM

Fuente: NCM = carga máxima, DMT = Tonelada métrica seca, recuperado del artículo elaborado por Lane et al. (2016).

Tabla 6

Límites superiores de concentración en elementos sancionables

Elemento penado	Límite superior (%)
Pb	6,0
As	0,5
F	0,1
Cd	0,005
Hg	0,01

Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Lane et al. (2016).

Se han ideado varios sistemas de lixiviación para la extracción selectiva de elementos penalizadores de concentrados de cobre, que incluyen: lixiviación de sulfuro alcalino (ASL); lixiviación de hipoclorito; lixiviación de ácido

sulfúrico diluido con sulfato de aluminio; y lixiviación por oxidación a presión combinada (POX) con lixiviación por precipitación de cobre. A continuación, se describen más detalladamente estos tipos de procesos (Lane et al., 2016).

2.2.6. Lixiviación de sulfuros alcalinos

Este proceso hidrometalúrgico utiliza NaOH-Na₂S y es bastante selectivo, por lo que es uno de los principales procesos utilizados para la eliminación de arsénico y antimonio de los concentrados de minerales de cobre. La eficacia de este proceso depende de las especies mineralógicas presentes en el concentrado. El sulfuro de sodio utilizado es capaz de disolver arsénico cuando se encuentra en forma de enargita, tennantita, realgar, oropimente y trióxido de arsénico. Así mismo es conocido que el sulfuro de sodio lixivia antimonio cuando este se encuentre como tetraedrita, estibina y jamesonita (Baláz & Achimovičová, 2006). Las reacciones químicas que explican la disolución de las especies mineralógicas se detallan en la tabla 7.

Tabla 7

Límites superiores de concentración en elementos sancionables

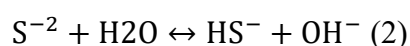
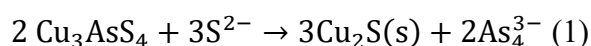
Mineral huésped	Reacción
Minerales portadores de As	
Enargita (Cu ₃ AsS ₄)	$2\text{Cu}_3\text{AsS}_4(\text{s}) + 3\text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow 3\text{Cu}_2\text{S}(\text{s}) + 2\text{Na}_3\text{AsS}_4(\text{aq})$
Realgar (AsS)	$2\text{AsS}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}_2\text{As}_2\text{S}_3(\text{aq})$
Oropimente (As ₂ S ₃)	$\text{As}_2\text{S}_3(\text{s}) + \text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow 2\text{NaAsS}_2(\text{aq})$
	$\text{NaAsS}_2(\text{aq}) + \text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}_3\text{AsS}_3(\text{aq})$
Arsenolita (As ₂ O ₃)	$\text{As}_2\text{S}_3(\text{s}) + 4\text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaAsS}_2(\text{aq}) + 6\text{NaOH}(\text{aq})$
	$\text{NaAsS}_2(\text{aq}) + \text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}_3\text{AsS}_3(\text{aq})$
Minerales portadores de Sb	
Tetraedrita [Cu ₁₀ (Fe,Zn) ₂ Sb ₄ S ₁₃]	$\text{Cu}_{10}\text{Sb}_4\text{S}_{13}(\text{s}) + 2\text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow 5\text{Cu}_2\text{S}(\text{s}) + \text{CuS}(\text{s}) + 4\text{NaSbS}_2(\text{aq})$
	$\text{NaSbS}_2(\text{aq}) + \text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}_3\text{SbS}_3(\text{aq})$
Estibina (Sb ₂ S ₃)	$\text{Sb}_2\text{S}_3(\text{s}) + 2\text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}_4\text{Sb}_2\text{S}_3(\text{aq})$
	$\text{Sb}_2\text{S}_3(\text{s}) + 2\text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow 2\text{Na}_3\text{SbS}_3(\text{aq})$
Jamesonita (Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄)	$\text{FePb}_4\text{Sb}_6\text{S}_{14} + 3\text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow \text{FeS}(\text{s}) + 4\text{PbS}(\text{s}) + 6\text{NaSbS}_2(\text{aq})$
Minerales portadores de Hg	
Cinabrio (HgS)	$\text{HgS}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{S}(\text{aq}) \rightarrow \text{Na}_2[\text{HgS}_2](\text{aq})$

Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Lane et al. (2016).

Una de las mayores restricciones del tratamiento hidrometalúrgico de lixiviación utilizando sulfuro de sodio radica en la extensa duración requerida para la disolución efectiva de contaminantes significativos. Este proceso puede demandar hasta 8 horas para lograr una eliminación rentable de estos elementos, constituyendo una de las principales dificultades para su implementación a nivel industrial (Ruiz et al., 2013).

2.2.7. Lixiviación selectiva

La lixiviación selectiva implica la disolución del arsénico del mineral mientras que otros metales y azufre permanecen en la fase sólida. La importancia de la eliminación selectiva de arsénico de los minerales de sulfuro que contienen arsénico se puede resumir en los siguientes puntos: (i) el desarrollo y uso eficiente de los recursos, (ii) la reducción de la contaminación ambiental, y (iii) el aumento del valor económico de los minerales que contienen arsénico. El sistema de sulfuro alcalino, compuesto principalmente por sulfuro de sodio e hidróxido de sodio, ha demostrado ser efectivo en la eliminación selectiva de arsénico de la enargita, logrando una extracción de arsénico superior al 95% en un corto período de tiempo. Bajo condiciones de pH elevado, el S^{2-} actúa selectivamente para disolver el arsénico de la enargita en forma de AsS_4^{3-} , mientras que el cobre permanece en el residuo de lixiviación como sulfuro de cobre. El principio fundamental de la lixiviación selectiva de enargita se puede resumir en las siguientes ecuaciones (Filippou et al., 2007).



Según se observa en la ecuación (2) y la figura 3, cuando se presentan condiciones de pH bajo, el ion S^{2-} experimentará una reacción de hidrólisis. Sin

embargo, una alta concentración de NaOH puede inhibir dicha hidrólisis y mejorar la eficiencia de utilización del ion S^{2-} . En investigaciones anteriores, se ha utilizado principalmente Na_2S como fuente directa de S^{2-} para llevar a cabo la lixiviación selectiva. Cabe destacar que la disolución de azufre elemental en NaOH también puede proporcionar el ion S^{2-} necesario para la lixiviación, generándose otras especies como Na_2SX y $Na_2S_2O_3$ durante el proceso. Esta reacción se muestra de forma concisa en las siguientes ecuaciones (Filippou et al., 2007).

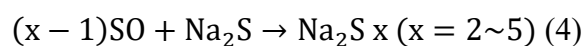
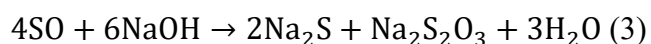
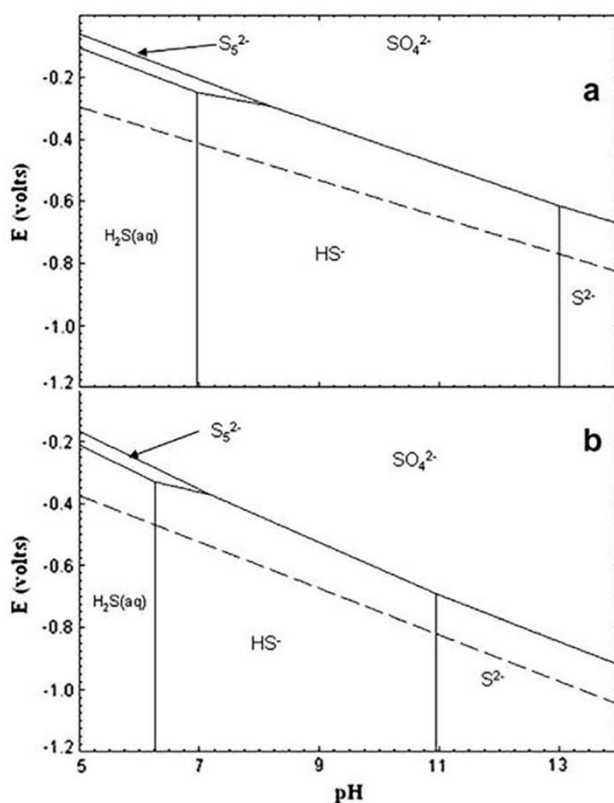


Figura 3

a) Diagrama Eh-pH del sistema SH₂O a 298 K y (b) 378 K



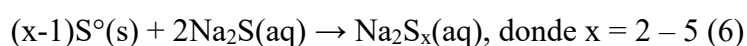
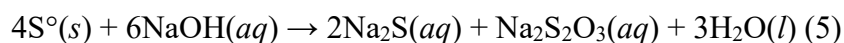
Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Awe & Sandström (2014).

2.2.8. Aplicaciones industriales del proceso de lixiviación alcalina con NaOH-Na₂S

➤ El proceso “Sunshine”

Se sabe que la implementación industrial más temprana del proceso de lixiviación alcalina con sulfuro de sodio se realizó en la mina Sunshine en Idaho, Estados Unidos. Este proceso se basa en la patente desarrollada por Holmes en 1943, diseñada para eliminar el antimonio de un concentrado de cobre rico en tetraedrita, que contenía aproximadamente un 19% de antimonio. Con este método, se logró reducir la concentración de este contaminante hasta un 1%. (Lillo, 2010).

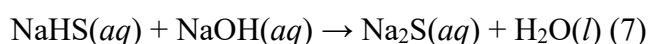
El método hidrometalúrgico se fundamentó en la adición de azufre elemental, sosa cáustica, carbonato de sodio y una solución rica en sulfuro alcalino. El azufre elemental interactúa con la sosa cáustica para generar sulfuro de sodio, polisulfuros y tiosulfatos de sodio, lo cual representaba uno de los factores más significativos en la eliminación de la especie de interés. Las reacciones que sustentan este proceso se describen en las siguientes ecuaciones.



➤ El proceso “La Equidad”

Se hace referencia al uso del proceso de lixiviación alcalina para reducir los contaminantes de arsénico y antimonio presentes en un concentrado de cobre-oro-plata de la empresa minera Equity Silver Mines Ltd. en British Columbia, Canadá. Inicialmente, los

concentrados mostraban una ley de aproximadamente 7% de antimonio y 4% de arsénico. Después de aplicar el tratamiento hidrometalúrgico, los concentrados lograron reducir su concentración de antimonio a un 0,3% y su contenido de arsénico a un 1,5% en peso. Durante el proceso de eliminación de contaminantes, se observó una correlación no lineal entre el grado de lixiviación de antimonio y el consumo de los reactivos. Inicialmente, se utilizaban cantidades excesivas de reactivos para lograr las leyes mencionadas anteriormente. Sin embargo, posteriormente se ajustó el proceso para controlar la dosificación de reactivos y lograr una remoción de antimonio del 0,8% y un contenido de arsénico del 2% en peso. Estos ajustes permitieron justificar económicamente el proceso. El proceso se basó principalmente en el uso de hidrosulfuro de sodio e hidróxido de sodio, y las reacciones que tuvieron lugar durante este proceso se describen en la siguiente ecuación.



➤ **El proceso “Melt”**

Este proceso se lleva a cabo a escala piloto en la ciudad de Krompachy, Eslovaquia, con el objetivo de eliminar arsénico y antimonio de un concentrado de mineral de cobre tipo tetraedrita extraído de la mina Maria Rožňava. Este proceso piloto combina la reducción del tamaño de las partículas durante la molienda y la aplicación de la lixiviación alcalina. Esta combinación mejora significativamente la cinética de lixiviación de los contaminantes, lo

que resulta en un proceso eficiente con un tiempo de duración de aproximadamente 30 a 40 minutos (Lane et al., 2016).

En la actualidad, los procesos Sunshine y Equity no se utilizan, y el proceso Melt solo ha alcanzado la etapa de pilotaje. Se sabe que el proceso de lixiviación alcalina de arsénico en un concentrado de cobre-oro se encuentra en estudios de viabilidad en la mina de Tampakan en Filipinas (Lane et al., 2016).

A continuación, en la tabla 8 se muestra una comparación entre los procesos descritos anteriormente, destacando las diferencias y su aplicabilidad industrial.

Tabla 8

Parámetros operativos en las tecnologías ASL

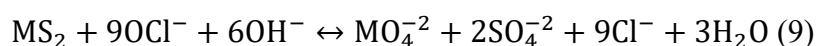
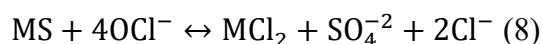
Características	Sunshine process	Equity process	Metl process
Comercial (C)/planta piloto (PP)	C (1940 – 2001)	C (1981 – 1994)	PP (1990s)
Modo de operación	Lote	Lote	Continuo
Producción	20 TM/día	90 TM/día	0.5 TM/día
Tiempo de residencia	8 – 12 h	8 h	1 h
Temperatura	104°C	107°C	88 – 105 °C
Presión	Atmosférica	Atmosférica	Atmosférica
Minerales	Tetraedrita, pirita, galena, bornite	Tetraedrita, tennantita, calcopirita, pirita, esfalerita, galena, arsenopirita	Tetraedrita, pirita, calcopirita, siderita, cuarzo
Densidad de lodo	200 g/L	Mayor a 600 g/L	300 g/L
Tamaño de partícula inicial	70% - 200 malla	-	60% - 200 malla
Dosificación de reactivos	Na ₂ S: 100 g/L NaOH: 15 g/L Na ₂ CO ₃ : 25 g/L	NaHS: Dependerá del concentrado de Sb. NaOH: -	Na ₂ S: 300 g/L NaOH: 50 g/L

Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Lane et al. (2016).

2.2.9. Lixiviación con hipoclorito de sodio

La sustancia comúnmente conocida como lejía se utiliza principalmente como blanqueador y desinfectante de textiles y papeles. En el proceso de lixiviación, la molécula responsable de la actividad química es el ion hipoclorito (OCl^-), que se hidroliza para formar ácido hipocloroso. El cloro, siendo el segundo compuesto gaseoso más oxidante, presenta alta reactividad y solubilidad en agua, lo que lo hace atractivo en este proceso.

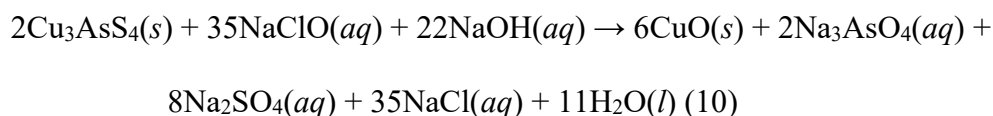
Sin embargo, el cloro también muestra una selectividad deficiente en relación con la presencia de minerales sulfurados de hierro, lo que lleva a la disolución de la mayoría de estos minerales. Por lo tanto, la lixiviación con hipoclorito a un pH superior al natural se puede definir como un proceso que puede ser selectivo con respecto a la especie comercial. Esto se logra mediante las reacciones químicas que se describen en las siguientes ecuaciones (Curreli et al., 2005).



La mayoría de los estudios sobre la lixiviación con hipoclorito se han realizado a temperaturas que varían entre 20 y 60 °C, a presión atmosférica y con un pH alcalino que oscila entre 12 y 12.5. Durante estos estudios, se ha utilizado una dosificación periódica de hidróxido de sodio para mantener la alcalinidad de la pulpa.

En relación con la eficiencia de este compuesto para solubilizar el arsénico presente en la enargita, la mayoría de los estudios han investigado y demostrado su capacidad. Esta solubilización se representa mediante la siguiente

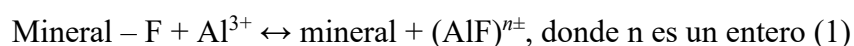
ecuación, que describe la reacción de disolución del arsénico en este mineral (Lane et al., 2016).



Este proceso ha demostrado una cinética de disolución de arsénico bastante rápida, sin embargo, no ha sido muy selectivo debido a que una parte de los sulfuros comerciales también ha reaccionado. Además, otra limitación de este proceso es la baja reactividad del hipoclorito para disolver el antimonio (Ruiz et al., 2013).

2.2.10. Lixiviación de ácido sulfúrico diluido con sulfato de aluminio

Este proceso es empleado para la remoción de flúor a partir de los concentrados de cobre, disolviéndose selectivamente con ácido sulfúrico en presencia de sulfato de aluminio, formándose dos compuestos iónicos de fluoruro de aluminio AlF^{2+} y AlF^{2+} . La reacción química que sintetiza la disolución de flúor en el proceso se describe en la siguiente ecuación.



Este proceso se lleva a cabo a presión atmosférica y dentro de un rango de temperatura que puede llegar hasta los 60°C. El ácido sulfúrico desempeña la función de mantener un pH ácido en el rango de 3 a 4.3, el cual se considera óptimo para el proceso (Torrise, 2001).

Los parámetros que por lo general se emplean para la lixiviación de flúor se describen en la tabla 9 (Lane et al., 2016).

Tabla 9

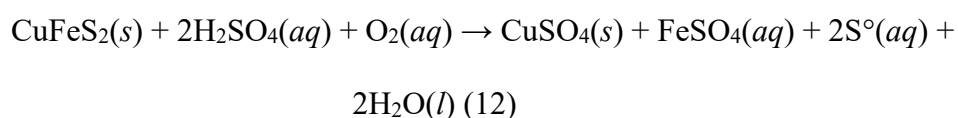
Parámetros de operación recomendados para la lixiviación con ácido sulfúrico de concentrados de flotación con sulfato de aluminio

Parámetro	Valor
Reactivos	Al ₂ (SO ₄) ₃ , H ₂ SO ₄
Tamaño de partícula	90% < 37 μm
Al:F ratio (molar)	Al menos 1:1
Densidad de sólidos	20 – 60%
Ph	2.8 – 3.8
Oxidación potencial redox	-200 a +100 mV
Temperatura	25 – 60 °C
Tiempo de residencia	2 h

Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Lane et al. (2016).

2.2.11. Oxidación a presión/lixiviación por precipitación de cobre

Existen varios métodos patentados que combinan la lixiviación por oxidación a presión y la lixiviación por precipitación de cobre para tratar concentrados de cobre con altos contenidos de calcopirita. El método de lixiviación a presión se utiliza para eliminar la ganga o los sulfuros sin valor comercial, como la pirita. En la mayoría de los casos, este método utiliza ácido sulfúrico como agente lixivante, aunque también es posible llevar a cabo la lixiviación con ácido clorhídrico (Guiachetti, 2011). Las condiciones oxidantes son inducidas por el aire, aunque a veces se usa algún otro oxidante químico. La siguiente ecuación describe la lixiviación por oxidación a alta presión de la calcopirita en una solución de ácido sulfúrico.



Por otro lado, el proceso hidrometalúrgico de lixiviación por precipitación de cobre a partir de sulfuros de cobre-hierro implica el intercambio de iones de hierro y azufre con los respectivos iones de cobre y hierro presentes en los minerales disueltos durante la lixiviación. Estas reacciones de intercambio se conocen como reacciones químicas de metátesis y pueden ocurrir tanto en medios oxidantes como reductores (Abed & Dreisinger, 2002).

Los procesos hidrometalúrgicos de lixiviación por precipitación se diseñan principalmente para aumentar la concentración de cobre en lugar de reducir el contenido de contaminantes. Sin embargo, existen dos patentes, el proceso Cominco y el proceso MAC, que describen el comportamiento de los elementos contaminantes en los procesos de lixiviación por precipitación. Estos procesos patentados se centran en abordar específicamente la remoción de contaminantes durante la lixiviación por precipitación, proporcionando soluciones para minimizar la presencia de impurezas no deseadas en el producto final (Lane et al., 2016).

➤ **El proceso Cominco**

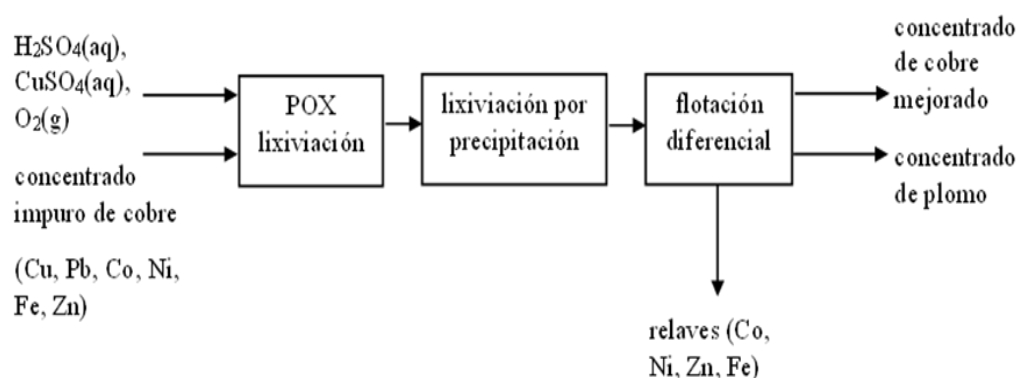
Esta patente fue desarrollada con el objetivo de separar cobalto, níquel, zinc y plomo de los concentrados de minerales de cobre con un alto contenido de calcopirita. De estos metales mencionados, solo el plomo no se disuelve, sino que se convierte en sulfato de plomo. El proceso consta de una etapa de lixiviación oxidante a alta presión, seguida de una etapa de lixiviación por precipitación de cobre, y finalmente se realizan flotaciones para separar el sulfato de plomo formado (Lane et al., 2016).

El concentrado de cobre con un alto contenido de calcopirita se introduce en un reactor junto con ácido sulfúrico, sulfato de cobre y un compuesto que

contiene oxígeno. La presencia de galena en el concentrado contribuye al contenido de plomo, el cual reacciona para formar sulfato de plomo insoluble que posteriormente se elimina mediante flotación. Además, el cobalto, níquel y zinc se convierten en sulfatos solubles. El diagrama de flujo del proceso Cominco se ilustra en la figura 2, mostrando las diferentes etapas del proceso.

Figura 4

Proceso Cominco



Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Lane et al. (2016).

➤ **Proceso Mac**

Este proceso fue desarrollado para la lixiviación los radionucleidos del ^{238}U , ^{210}Pb y ^{210}Po presentes en los concentrados de cobre, cuyo nivel de reactividad limita su comercialización. El proceso también remueve elementos como cobalto, níquel y zinc. El concentrado de cobre se alimenta a un reactor para la lixiviación de cobre en lugar de la oxidativa, formando sulfato de cobre que es evacuado mediante procesos de sedimentación y filtrado. Es conocido que más del 90% de uranio y torio son removidos a solución.

El análisis comparativo de los parámetros de los procesos Cominco y MAC se muestran a continuación en la tabla 10.

Tabla 10*Parámetros operativos para los procesos Cominco y MAC*

Características	Proceso Cominco	Proceso MAC
Propiedades del alimento		
Densidad del concentrado (g/L)	670	-
Tamaño de partícula	d ₉₀ < 44 µm	-
Reactivos	H ₂ SO ₄ : 10 – 70 g/L CuSO ₄ : 20 – 80 g/L	H ₂ SO ₄ : 1 – 50 g/L Cl ⁻ : -
Lixiviación por oxidación a presión		
Temperatura (°C)	90 – 115	140 – 180
Presión parcial de O ₂ (kPa)	689 – 1379	200 – 1000
Tiempo de residencia	1 – 5	0.25 – 6
Lixiviación por precipitación de cobre		
Temperatura (°C)	150 – 180	160 – 240
Presión total (kPa)	Autógeno	0.5 – 3.5
Potencial redox oxidante (mV, Ag/AgCl 3.8 M KCl)	No oxidante	200 – 450
Tiempo de residencia	1 – 5	0.5 – 8

Fuente: Recuperado del artículo elaborado por Lane et al. (2016).

La selección del agente lixivante se basa en varios factores, que incluyen:

- Las características mineralógicas y químicas del material que se va a lixiviar.
- Los costos del agente lixivante y su impacto ambiental en términos de descomposición.
- Las posibles consecuencias del agente lixivante en los equipos utilizados en el proceso.
- El grado de selectividad del agente lixivante para el metal o los minerales de interés.
- La capacidad de regeneración o reutilización del agente lixivante.

Estos factores son considerados cuidadosamente para determinar el agente lixivante más adecuado que cumpla con los requisitos específicos del proceso y garantice la eficiencia y la viabilidad económica de la operación.

2.2.12. Caracterización mineralógica

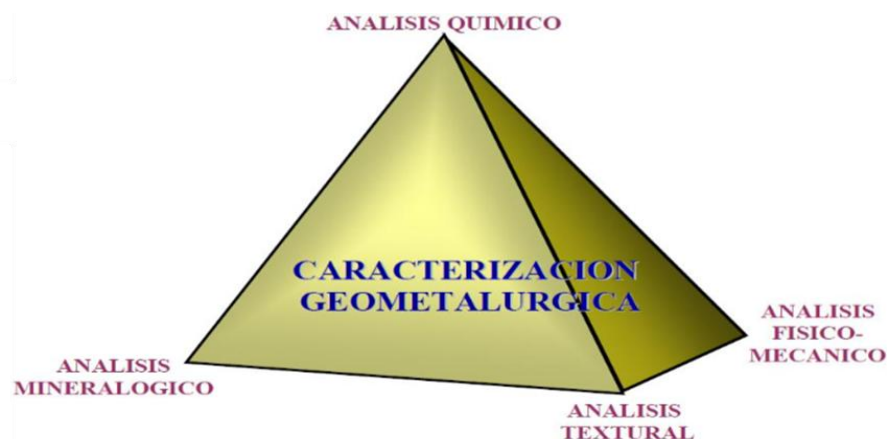
La caracterización mineralógica desempeña un papel fundamental al proporcionar información detallada sobre los minerales presentes en la mena, su asociación con otros minerales y su grado de liberación. Esta información es crucial para establecer los procesos metalúrgicos óptimos que permitan la extracción eficiente de los minerales de interés. El objetivo principal de los procesamiento de beneficio es maximizar la recuperación de los minerales valiosos y minimizar las pérdidas, y la caracterización mineralógica proporciona los datos necesarios para lograr este objetivo. Al comprender la composición y las propiedades de los minerales presentes, se pueden diseñar y optimizar los procesos de beneficio para garantizar la máxima eficiencia y rentabilidad en la extracción de los minerales de interés (Tabares, 2020).

Los estudios mineralógicos desempeñan un papel crucial al complementar las caracterizaciones geoquímicas, fisicoquímicas y metalúrgicas del mineral. Estos estudios proporcionan una visión global del proceso y permiten la elaboración de diagramas de flujo sin cuellos de botella. Al realizar estudios mineralógicos, podemos predecir si la presencia de minerales afectará los procesos de concentración, como la falta de liberación adecuada durante la etapa de molienda para la concentración del material valioso. Esta información es fundamental para tomar decisiones informadas en el diseño y la optimización de los procesos de beneficio. Al comprender la composición mineralógica y las características de los minerales presentes, se pueden identificar los desafíos potenciales y desarrollar estrategias adecuadas para maximizar la recuperación de los minerales de interés. En resumen, los estudios mineralógicos son esenciales

para garantizar la eficiencia y la rentabilidad de los procesos de concentración de minerales (Cañola et al., 2015).

Figura 5

Pirámide de la caracterización geometalúrgica



Fuente: Recuperado de la tesis elaborada por Canchanya & Yance (2019).

La caracterización de minerales se lleva a cabo comúnmente utilizando técnicas como la microscopía óptica con luz reflejada, que resulta especialmente útil para estudiar minerales que no permiten el paso de la luz, conocidos como minerales opacos. Esta técnica nos permite examinar las propiedades físicas y morfológicas de los minerales a través de la interacción de la luz con la superficie del material. Al utilizar microscopios ópticos con iluminación reflejada, podemos observar la textura, el color, la forma y las estructuras cristalinas de los minerales opacos. Además, se pueden realizar análisis cualitativos y cuantitativos para identificar los diferentes minerales presentes en una muestra y determinar su distribución y asociaciones. La microscopía óptica con luz reflejada se complementa con otras técnicas analíticas, como la microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos X, para obtener una caracterización más completa y detallada de los minerales. Estos estudios mineralógicos permiten una comprensión más profunda de la composición y las propiedades de los minerales,

lo que a su vez contribuye a la optimización de los procesos de beneficio y a la toma de decisiones informadas en la industria minera (Chirif, 2010).

Tabla 11

Clasificación de minerales opacos

Clase	Grupo	Especie	Abreviatura	
ENs		Oro	Au	
		Plata	Ag	
		Cobre	Cu	
		Arsénico	As	
		Antimonio	Sb	
		Bismuto	Bi	
		Grafito	gf	
		Argentita	arg	
		Calcosita	cc	
		Digenita	dg	
		Bornita	bn	
		Calcopirita	cp	
		Galena	gn	
		Esfalerita	ef	
		Pirrotita	po	
SULs		Pentlandita	pnt	
		Covelita	cv	
		Rejalgá	rj	
		Oropimente	orp	
		Estibinita	stb	
		Bismutinita	bmt	
		Pirita	py	
		Bravoita	bv	
		Marcasita	mc	
		Arsenopirita	apy	
		Molibdenita	mb	
		PGRs	Pearcita	prc
			Polibasita	plb
			PRJs	Proustita
		Pirargirita		pgt
CGRs	Tetraedrita	tet		
	Tennantita	ten		
	Bournonita	bnn		
SFSs	SFSsSb	Boulangerita	blg	
		Jamesonita	jm	
		Enargita	en	
OXs		Luzonita	luz	
		Cuprita	cup	
		Tenorita	tn	
		Magnetita	mt	
		Hematita	hm	
		Ilmenita	il	
		Rutilo	rt	

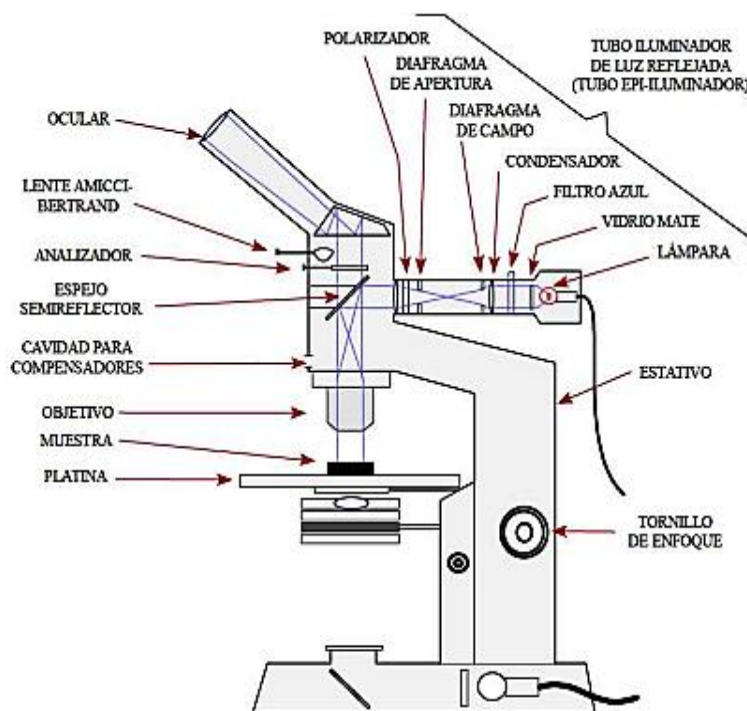
	Pirolusita	prl
	Casiterita	cst
	Cromita	crm
WFTs	Wolframita	Wfm

Fuente: Recuperado del libro elaborado por Chirif (2010).

En el análisis mineralógico del oro, se emplea un microscopio de reflexión de luz polarizada, que cuenta con un sistema de iluminación vertical dirigido hacia la zona de pulido. En el contexto específico de la visualización en campo oscuro, este microscopio utiliza un mecanismo lumínico que no atraviesa directamente el objetivo, sino que los rayos de luz inciden oblicuamente en la muestra, reflejándose en ella y ampliando la visualización de la estructura original (Chirif, 2010).

Figura 6

Microscopio óptico de luz reflejada



Fuente: Recuperado del libro elaborado por Chirif (2010).

A través de esta técnica, es posible adquirir información relacionada con el matiz, la capacidad de reflejar la luz, la capacidad de reflejar la luz en dos

planos, el fenómeno de mostrar diferentes colores al ser observado desde distintos ángulos, la propiedad de presentar distintas propiedades físicas en distintas direcciones y las reflexiones internas de las muestras. Esto nos permite identificar los minerales presentes en las muestras. Una vez que se ha logrado la identificación, se puede determinar las relaciones entre los diferentes minerales mediante el estudio de cómo se encuentran entrelazados. Esta investigación se considera fundamental para establecer un procesamiento metalúrgico adecuado (Chirif, 2010).

2.3. Definición de términos básicos

Lixiviación. - La lixiviación es un proceso químico en la minería para extraer minerales valiosos del mineral. La lixiviación también tiene lugar en la naturaleza, donde las rocas se disuelven por el agua. Después de la lixiviación, las rocas se quedan con una proporción menor de minerales de lo que originalmente contenían.

Concentrado de mineral. - pulpa espesa obtenida de la etapa de flotación en el proceso productivo, en la que se encuentra una mezcla de sulfuro de cobre, fierro y una serie de sales de otros metales. Su proporción depende de la mineralogía de la mina.

Elementos penalizables. - Existen elementos que traen complicaciones al proceso o al medio ambiente. Se penalizan según el contenido de cada una de ellas.

Hidrometalurgia. - Es la rama de la metalurgia extractiva que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas.

Sulfosales de cobre. - El término sulfosal se propuso inicialmente para indicar que el mineral era una sal de una serie de oxiácidos en los cuales el Azufre (S) ha sustituido al Oxígeno (O). dado que dichos ácidos suelen ser hipotéticos, resulta engañoso tratar así esta clase de minerales. Sin embargo, el término Sulfosal es útil y se mantiene aquí para indicar cierto número de minerales de S diferentes a los sulfuros.

Arsénico. - Es un elemento químico de la tabla periódica que pertenece al grupo de los metaloides, también llamados semimetales; se puede encontrar de diversas formas, aunque raramente se encuentra en estado sólido. Se conoce desde la antigüedad y se reconoce como extremadamente tóxico. A presión atmosférica el arsénico sublima a 613 °C.

Solución básica o basicidad. - es la capacidad ácido neutralizante de una sustancia química en solución acuosa. Esta alcalinidad de una sustancia se expresa en equivalentes de base por litro o en su equivalente de carbonato cálcico.

pH. - es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones.

Recuperación. - Es la cantidad de metal que se logra obtener mediante un determinado proceso metalúrgico con respecto a la cantidad de metal que entra al proceso.

Ley. - Contenido de metal valioso en una mena, expresado generalmente en porcentaje o en gramos de metal por tonelada de mena.

Remolienda. - Es la operación de reducción de tamaños de las partículas posterior a la molienda primaria, con la finalidad de liberar las especies valiosas.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S logrará la eliminación de arsénico de los concentrados con alto contenido de cobres grises.

2.4.2. Hipótesis específica

HE1: La caracterización de los concentrados con altos contenido de cobres grises, en el departamento de Ancash, permitirá detallar las especies de minerales involucradas, distribución volumétrica de las especies, enlaces entre minerales y grados de liberación.

HE2: El procesamiento de los resultados obtenidos en las pruebas metalúrgicas de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S de los concentrados de cobres grises, mediante balances metalúrgicos y análisis estadísticos, determinará la eliminación de arsénico en el departamento de Ancash.

2.5. Identificación de variables

Variable dependiente

- Eliminación de arsénico

Variables independientes

- Tiempo de lixiviación
- Temperatura
- Concentración del agente lixivante
- Tamaño de partícula

Variables constantes

- % Sólidos
- pH de cianuración
- Densidad de pulpa

- Revoluciones de agitación

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Para procesar e identificar la influencia de las variables en el proceso, se aplicó los balances metalúrgicos en hojas de cálculo, y análisis estadístico en Minitab 19 de los resultados obtenidos en las pruebas de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S de los concentrados de cobres grises, a fin de evaluar, interpretar y analizar las relaciones entre las variables independientes y dependientes del proceso en estudio.

Tabla 12

Operacionalización de variables

Tipo de Variable	Variable	Definición operacional	Dimensiones
Dependiente	Eliminación de arsénico	Arsénico eliminado del mineral o material tratado mediante el proceso de lixiviación.	Porcentaje de eliminación de arsénico (%)
	Tiempo de lixiviación	Período durante el cual el material es sometido al proceso de lixiviación.	Horas de lixiviación (h)
	Temperatura	Calor aplicado durante el proceso de lixiviación.	Rango de temperatura (°C)
Independiente	Concentración del agente lixivante	Proporción del agente químico utilizado en la solución de lixiviación.	Peso del agente (Kg/t)
	Tamaño de partícula	Diámetro promedio de las partículas del material sometido a lixiviación.	Rango de tamaño de partícula (µm)

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

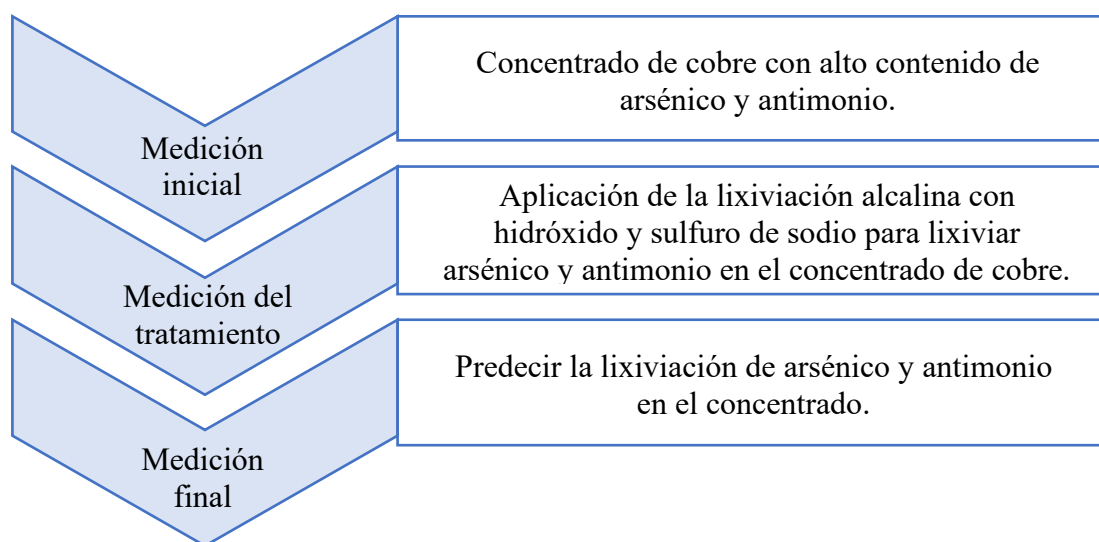
El presente estudio de investigación es de tipo experimental, utilizando los experimentos y los principios encontrados en el método científico, aplicando los conocimientos disponibles de microscopia óptica, lixiviación alcalina con hidróxido y sulfuro de sodio. Estos métodos son aplicados para reducir la concentración de arsénico y antimonio en el concentrado final.

La investigación es cuantitativa y deductiva, porque realizó la manipulación, análisis e interpretación de variables independientes y dependientes del proceso en estudio, tomando como punto de partida la problemática del presente estudio.

El diseño de la investigación es el siguiente:

Figura 7

Diseño de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación utilizado en este estudio es de tipo explicativa, lo que implica que se busca comprender y explicar las relaciones causales entre las variables involucradas en la eliminación de arsénico con el proceso de lixiviación.

3.3. Métodos de investigación

- Información bibliográfica sobre la problemática de la investigación.
- Obtener una muestra representativa del concentrado de cobres grises en el departamento de Ancash.
- Se envían 500 gramos de muestra a laboratorio de análisis químico para el reporte de ley de arsénico, antimonio, bismuto, cobre, plata.
- Se envían 500 gramos de muestra al laboratorio de Microscopia óptica, para la caracterización y tener como resultado los componentes de la muestra,

diferentes tipos de entrelazamientos, tamaño de las partículas y grados de liberación de las especies mineralógicas.

- Diseño de pruebas metalúrgicas de lixiviación con el uso de Excel.
- Pruebas preliminares de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S del concentrado de cobres grises en agitador magnético a nivel de laboratorio para evaluar la temperatura de trabajo.
- Pruebas definitivas de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S del concentrado de cobres grises en agitador magnético a nivel de laboratorio para evaluar la temperatura y tiempo de trabajo.
- Pruebas preliminares de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S del concentrado de cobres grises en agitador magnético a nivel de laboratorio para evaluar la concentración del agente lixivante y el tamaño de partícula.
- Pruebas definitivas de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S del concentrado de cobres grises en agitador magnético a nivel de laboratorio para evaluar la concentración del agente lixivante y el tamaño de partícula.
- Sistematizar los resultados obtenidos, mediante balances metalúrgicos y graficas en hojas de cálculo y análisis estadístico.

3.4. Diseño de investigación

Para el desarrollo de la presente investigación el diseño de la investigación es de tipo experimental cuantitativo, de acuerdo con la clasificación propuesta por Hernandez et al. (2014), y permite la manipulación de las variables independientes.

3.5. Población y muestra

La población de estudio corresponde al concentrado de cobre con alto contenido de arsénico en el departamento Ancash.

La cantidad estimada de material para los estudios correspondientes fueron de 20 Kg. Teniendo en cuenta que dejaremos muestra testigo para cualquier prueba metalúrgica o ensayo químico.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

a. Información bibliográfica

- Revisión documental: Se revisan fuentes bibliográficas confiables, tales como revistas científicas, publicaciones especializadas, libros y recursos en internet. Se pone especial atención a la información relacionada con los procesos de lixiviación de arsénico en concentrados de cobre grises.

b. Información de campo

- Observación directa: Se realiza una visita a la zona minera para observar directamente la realidad y las condiciones de operación de las diversas plantas concentradoras. Durante esta observación, se toman muestras representativas de los concentrados procesados en estas plantas.
- Entrevistas: Se llevan a cabo entrevistas con operadores, ingenieros y otros profesionales de las plantas concentradoras para obtener información detallada sobre los procesos de extracción y tratamiento de minerales, especialmente en lo que respecta a la eliminación de arsénico.

c. Información experimental

- Caracterización mineralógica: Se evalúan y caracterizan los minerales polimetálicos del departamento de Ancash mediante estudios mineralógicos y microscópicos.
- Estudio cualitativo y cuantitativo: Se realizan estudios detallados tanto cualitativos como cuantitativos para determinar las propiedades de los minerales y la presencia de arsénico.
- Pruebas experimentales: Se llevan a cabo pruebas de lixiviación alcalina para evaluar la eficacia de diferentes condiciones en la eliminación del arsénico de los concentrados.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

a. Información bibliográfica

- Fichas de registro bibliográfico: Se utilizan para documentar y organizar la información obtenida de revistas científicas, libros, publicaciones e internet que traten sobre la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S para la eliminación de arsénico.

b. Información de campo

- Hoja de muestreo y reporte de campo: Se emplea para registrar detalles sobre el muestreo probabilístico, asegurando la representatividad y confiabilidad de las muestras de mineral seleccionadas en las plantas concentradoras.

c. Información experimental

- Hoja de reporte de ensayos mineralógicos: Se utiliza para documentar los resultados obtenidos durante la caracterización de las muestras utilizando el microscopio electrónico.

- Hoja de análisis cuantitativo: Se emplea para registrar los datos obtenidos mediante microscopía óptica de luz polarizante.
- Hoja de preparación de muestras: Utilizada para detallar el proceso de preparación de muestras, incluyendo el uso de la pulverizadora de discos de laboratorio.
- Hoja de balance metalúrgico: Se emplea para registrar y evaluar los resultados de las pruebas experimentales de lixiviación alcalina, incluyendo datos obtenidos con el agitador magnético, potenciómetro y voltímetro.
- Informe de análisis químico: Documenta los análisis químicos realizados en los laboratorios de la ciudad de Lima, proporcionando una base detallada y precisa para la interpretación de los resultados.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

a. Análisis de la documentación

- Revisión de la bibliografía: Se realiza una revisión exhaustiva de la bibliografía relevante.
- Selección de teorías: Se seleccionan teorías relacionadas con el problema y la hipótesis.
- Análisis teórico: Se analizan las teorías sobre la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S para eliminar arsénico.
- Interpretación de fenómenos: Se interpretan los fenómenos físicos y/o químicos que ocurren durante la lixiviación alcalina para reducir contaminantes.

b. Información de Campo

- Garantía de representatividad: Se asegura la representatividad de las muestras de concentrado de cobre y de las pruebas de lixiviación.
- Análisis estadístico: Se aplican medidas de tendencia central (como el promedio) y medidas de dispersión (como la varianza y la desviación estándar) para evaluar la consistencia de las muestras.

c. Información Experimental

- Obtención de datos: Se obtienen datos experimentales de las corridas experimentales para evaluar los parámetros de operación.
- Tabulación de datos: Los datos experimentales se organizan en tablas para su análisis.
- Representación gráfica: Se elaboran gráficos para visualizar los resultados experimentales.
- Correlación de datos: Se correlacionan los datos experimentales para identificar relaciones entre variables.
- Interpretación de resultados: Se interpretan los datos experimentales correlacionados para contrastar la hipótesis.
- Software de procesamiento: Los datos teóricos recopilados se gestionan con Mendeley, y los datos experimentales se procesan utilizando Minitab 19 para facilitar el análisis estadístico.

3.8. Tratamiento estadístico

El procesamiento de datos se realizará mediante la recolección de información a través de la aplicación de las técnicas anteriormente mencionadas, posteriormente se realizará la estadística de los resultados de nuestro instrumento

bajo el estadístico alfa de Cronbach y la prueba de hipótesis con el estadístico no paramétrico R de Spearman, todo esto con el programa estadístico SPSS 23.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El trabajo de campo realizado en esta investigación siguió una serie de etapas clave, diseñadas para garantizar la precisión y representatividad de las muestras obtenidas del concentrado de cobre con alto contenido de arsénico en el departamento de Ancash. A continuación, se detallan estas etapas:

4.1.1. Preparación y planificación de la visita al campo

- Definición de objetivos: Se establecieron los objetivos específicos del trabajo de campo, centrados en la obtención de muestras representativas del concentrado de cobres grises, cruciales para la evaluación de los parámetros de lixiviación.
- Coordinación logística: Se planificó y coordinó con las plantas concentradoras en la zona minera del departamento de Ancash, asegurando el acceso y disponibilidad de las instalaciones necesarias para la recolección de muestras.

4.1.2. Selección del punto de muestreo

- Identificación de áreas de interés: Se seleccionaron los puntos de muestreo en función de la concentración de arsénico en los concentrados de cobre. Se consideraron las condiciones geológicas y las técnicas de extracción utilizadas en las plantas concentradoras.
- Representatividad de las muestras: Se garantizó que los puntos de muestreo fueran representativos de la población total de concentrados de cobre en la región, con un enfoque en asegurar la representatividad estadística de las muestras recolectadas.

4.1.3. Toma y preparación de muestras

- Recolección de muestras: Se recolectaron 20 kg de concentrado de cobre, asegurando que la cantidad fuera suficiente para las pruebas metalúrgicas y análisis químicos posteriores, así como para mantener una muestra testigo para futuros estudios.
- Envío de muestras para análisis: Se enviaron 500 gramos de muestra a un laboratorio de análisis químico para determinar la ley de arsénico, antimonio, bismuto, cobre y plata. Otros 500 gramos se enviaron a un laboratorio de microscopía óptica para la caracterización de los componentes de la muestra, incluyendo tipos de entrelazamientos, tamaño de las partículas y grados de liberación de las especies mineralógicas.

4.1.4. Preparación de las muestras en laboratorio

- Pulverización y homogenización: Las muestras fueron pulverizadas y homogenizadas utilizando una pulverizadora de discos de laboratorio, asegurando uniformidad en las pruebas subsecuentes.
- Caracterización de las muestras: Se realizaron estudios microscópicos y mineralógicos para identificar las características clave de las muestras y preparar el material para las pruebas de lixiviación.

4.1.5. Uso de reactivos y pruebas experimentales

- Selección de reactivos: Se utilizaron reactivos específicos como NaOH y Na₂S para las pruebas de lixiviación, seleccionados por su eficacia en la eliminación de arsénico.
- Preparación de soluciones lixiviantes: Se prepararon las soluciones de NaOH y Na₂S en concentraciones determinadas, las cuales se usaron en pruebas preliminares y definitivas de lixiviación alcalina en un agitador magnético, para evaluar la temperatura, tiempo de trabajo, concentración del agente lixiviante y el tamaño de partícula.
- Pruebas de lixiviación: Se realizaron pruebas preliminares y definitivas a nivel de laboratorio con el concentrado de cobres grises, utilizando el agitador magnético. Estos experimentos se diseñaron utilizando Excel para evaluar los efectos de las diferentes variables en la eliminación del arsénico.

4.1.6. Documentación y sistematización de resultados

- Registro de datos de campo y laboratorio: Durante el trabajo de campo y las pruebas experimentales, se mantuvo un registro detallado

de todos los datos y observaciones. Estos datos fueron sistematizados mediante balances metalúrgicos y análisis estadísticos realizados en hojas de cálculo.

- **Análisis de resultados:** Los resultados obtenidos fueron graficados y analizados estadísticamente para evaluar la eficacia del proceso de lixiviación y contrastar las hipótesis planteadas en el estudio.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Caracterización del concentrado

La muestra de material concentrado de cobre con alto contenido de As se observó mediante el método de microscopia polarizante de luz reflejada y se llevó a cabo el análisis modal. En la tabla 13 se insertan los minerales observados, así como la distribución porcentual y grados de liberación de las especies. Los cobres grises, así como los sulfosales de plata, y arsenopirita, aportan los contaminantes de arsénico y antimonio, con una distribución porcentual del 35,16%, 2,58%, y 2,10%, respectivamente, tal y como se observa en la figura 8. Así también, los cobres grises presentan un grado de liberación de 99,17%, tal y como se observa en el gráfico de barras que representa el grado de liberación de las especies identificadas.

Tabla 13

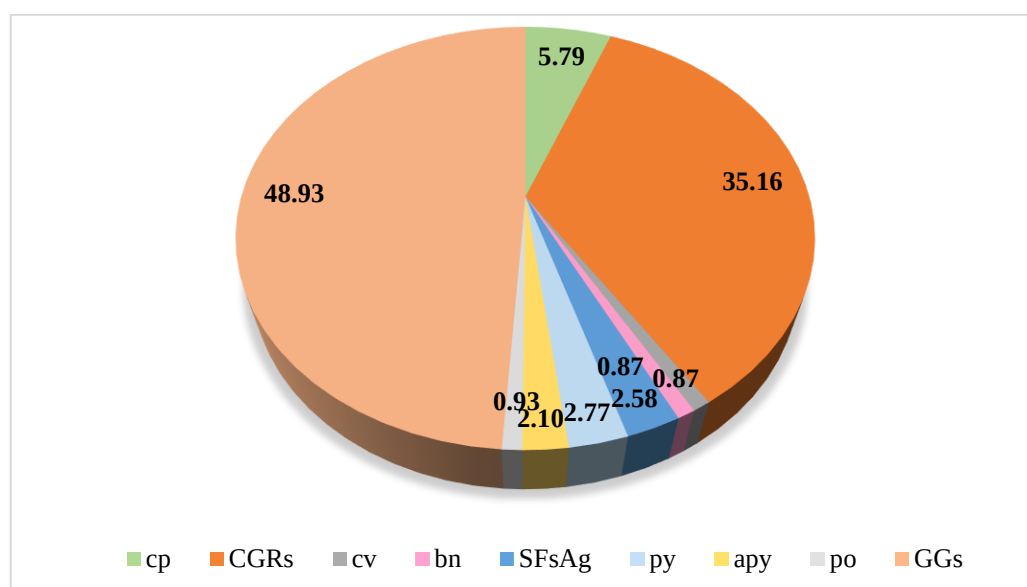
Ensayos químicos en % (Cu, As, Sb, y Bi) y en Oz/TC (Au y Ag)

Minerales	Volumen porcentual (%)	Grado de liberación (%)
Calcopirita	5.79	88.24
Cobres grises	35.16	99.17
Covelita	0.87	66.67
Bornita	0.87	72.22
Sulfosales de plata	2.58	96.23
Plata nativa	Trazas	-
Pirita	2.77	92.28
Arsenopirita	2.10	93.02
Pirrotita	0.93	89.47
Gangas	48.93	96.41
Total	100.00	

Fuente: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 8

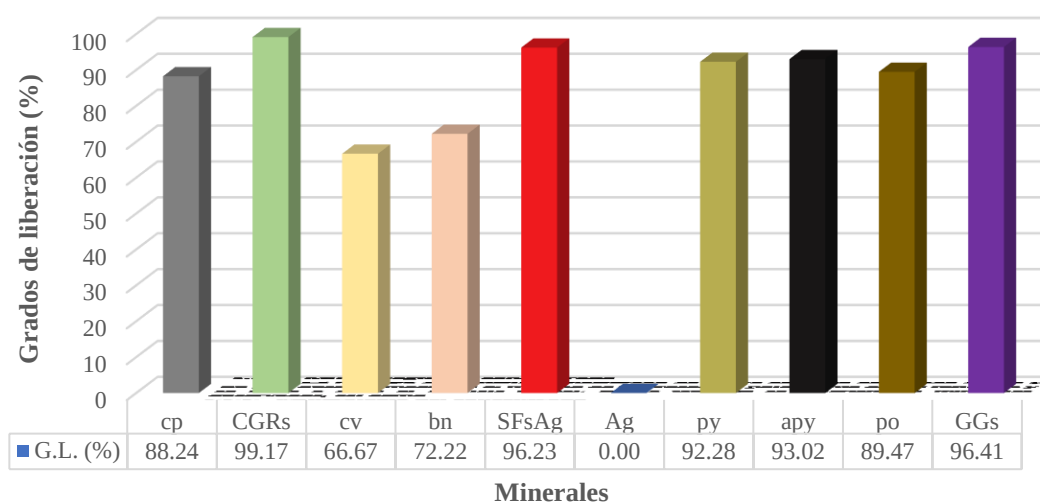
Volumen porcentual de los minerales de la muestra



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9

Grados de liberación de los minerales de la muestra



Fuente: Elaboración propia.

a. Interpretación de la distribución de minerales observados

Los cobres grises ocupan el 35,16% del volumen total de la muestra, de este volumen el 99,17% se halla libre, mientras que el 0,83% restante, se encuentra aún entrelazada, el motivo de su no liberación total se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos.

Otras especies de cobre como la calcopirita, covelita, y bornita, se identificaron ocupando un volumen del 5,79%, 0,87%, y 0,87%, respectivamente.

Otras especies que aportan contaminantes son las sulfosales de plata que representaron un volumen de 2,58%, de las cuales, 96,23% se encuentra como especie libre; la arsenopirita que ocupó un volumen del 2,10%, encontrándose 93,02% como libre.

Por último, las gangas representaron un volumen de 48,93%, y 96,41 % de las especies se identificaron como libres, el motivo de que no se haya liberado

totalmente, se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los que está inmerso, como se puede observar en la tabla 14 y la figura 10. Así también, las principales micrografías de la microscopía óptica se pueden observar en las figuras 11, 12, 13 y 14.

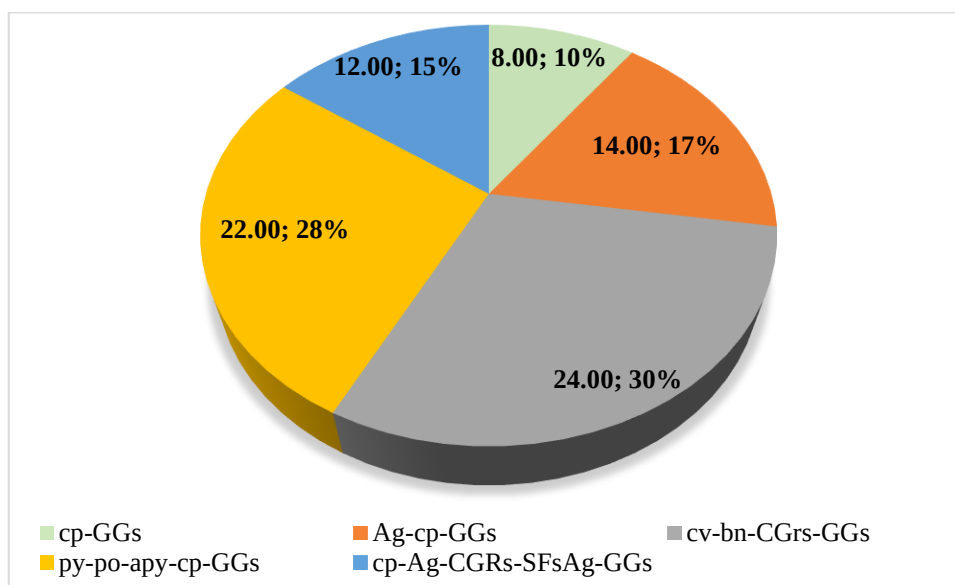
Tabla 14

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc. (%)	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		1976	96.11	
cp-GGs	1aIII	3	0.15	Fácil
	2dI	5	0.24	Muy difícil a imposible
	1eIII	4	0.29	Muy difícil a imposible
Ag-cp-GGs	2aII	6	0.18	Muy difícil a imposible
	2bI	4	0.21	Muy difícil
	1bIV	8	0.43	Moderadamente fácil
cv-bn-CGrS-GGs	2bI	5	0.18	Muy difícil
	1eIV	6	0.36	Muy difícil a imposible
	3bII	5	0.20	Imposible
py-po-apy-cp-GGs	1bIV	10	0.45	Moderadamente fácil
	4aII	3	0.09	Muy difícil
	3bI	4	0.22	Imposible
	4bIII	5	0.31	Moderadamente difícil
cp-Ag-CGrS-SFsAg-GGs	2aII	3	0.13	Muy difícil a imposible
	1eIII	6	0.34	Muy difícil a imposible
	2bI	3	0.11	Muy difícil
TOTAL		2056	100.00	

Fuente: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 10

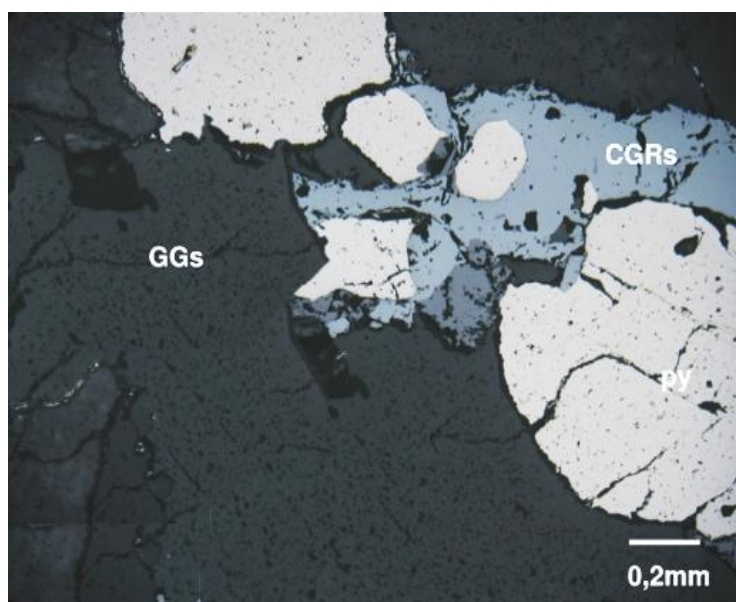
Distribución porcentual de los entrelazamientos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11

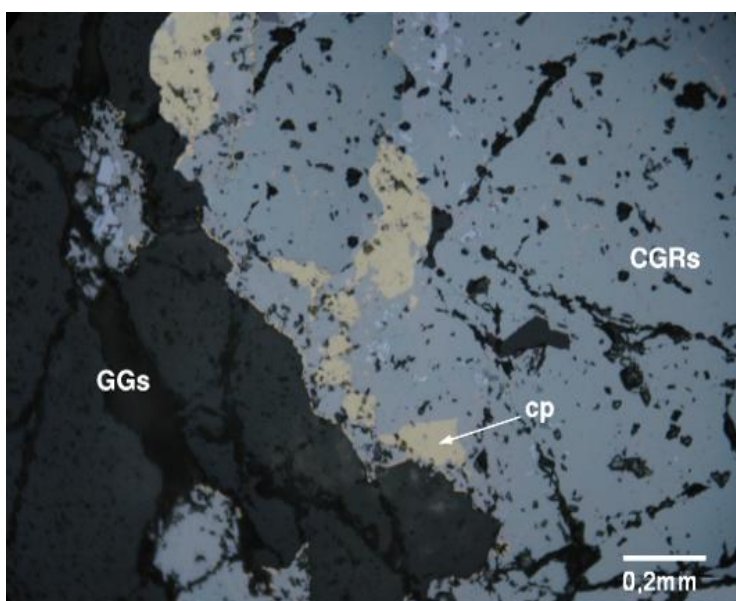
Micrografía que muestra la presencia de GGs, CGRs y py



Fuente: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 12

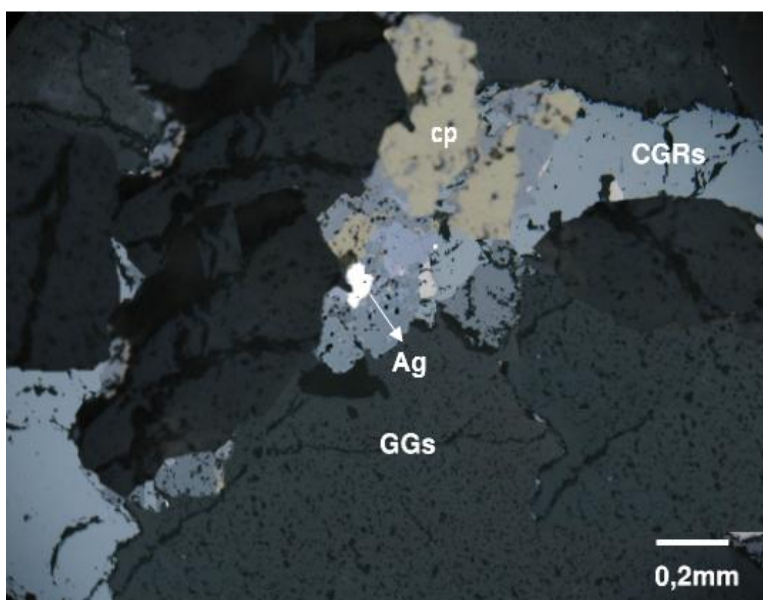
Micrografía que muestra la presencia de GGs, CGRs y cp



Fuente: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 13

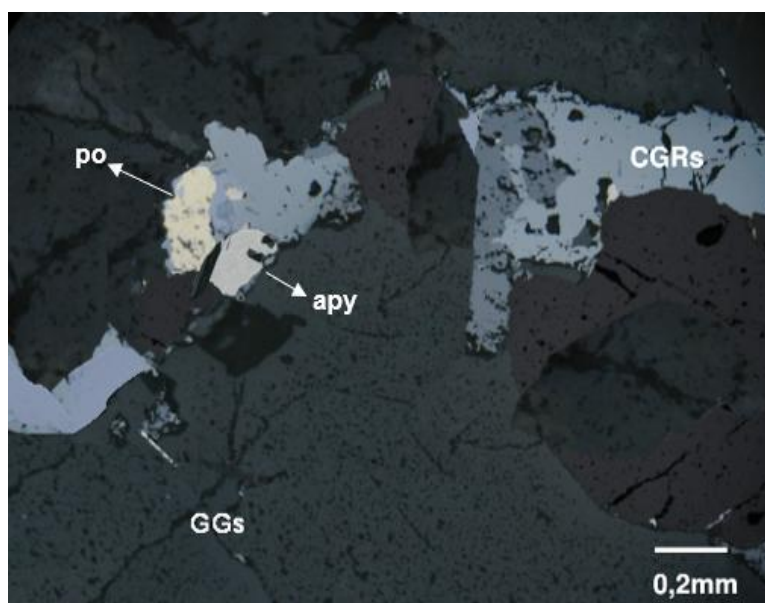
Micrografía que muestra la presencia de GGs, CGRs, cp y Ag



Fuente: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

Figura 14

Micrografía que muestra la presencia de GGs, CGRs, apy y po



Fuente: Reportado por el laboratorio GEOXINPESAC.

4.2.2. Análisis químico del concentrado polimetálico

Una muestra representativa de 250 g de concentrado de cobres grises se envió a laboratorio químico metalúrgico para determinar las leyes en % de Cu, Au, As, Bi, y Sb. Los ensayos por volumetría determinaron una ley de 23,47 % de Cu, tal y como se puede observar en la tabla 15.

Tabla 15

Ensayos químicos en % (Cu, As, Sb, y Bi) y en Oz/TC (Au y Ag)

Cu (%)	Ag Oz/TC	Au Oz/TC	As %	Sb %	Bi %
23.47 %	81.69	0.1	6.44 %	6.13 %	0.88 %

Fuente: Reportado por el laboratorio H&F.

4.2.3. Pruebas de lixiviación alcalina

Las pruebas de lixiviación alcalina se diseñaron para evaluar la eficiencia del proceso en la eliminación de arsénico del concentrado de cobre con alto contenido de cobres grises. Estas pruebas se realizaron en diferentes condiciones

para evaluar diversos aspectos del proceso, como el efecto de la temperatura, el tiempo de lixiviación, la concentración de los reactivos y la granulometría del concentrado.

➤ **Análisis del tiempo y la temperatura de lixiviación alcalina**

En base a los resultados de la caracterización mineralógica se desarrollaron pruebas de lixiviación alcalina del concentrado con alto contenido de cobres grises, evaluando el proceso a las temperaturas de 35°, 70°, y 95°C, para periodos de 3, 6, y 9 horas. Las pruebas se realizaron con un agitador magnético a 500 rpm, para lo cual se empleó 20 g/Kg de soda caustica, y 60 g/Kg de sulfuro de sodio. Las condiciones de operación del desarrollo de las pruebas se detallan en la tabla 16.

Tabla 16

Condiciones de operación de lixiviación alcalina para evaluar la temperatura

Parámetro	Valor
Peso de concentrado	150 g
pH	11
Agitación	500 rpm
Relación L/S	2
Temperatura	35, 70 y 95°C
Granulometría	62.58 % - 200 Malla
Sulfuro de sodio	60 g/Kg
Hidróxido de sodio	20 g/Kg
Tiempo de proceso	3, 6, y 9 horas

Fuente: Elaboración propia.

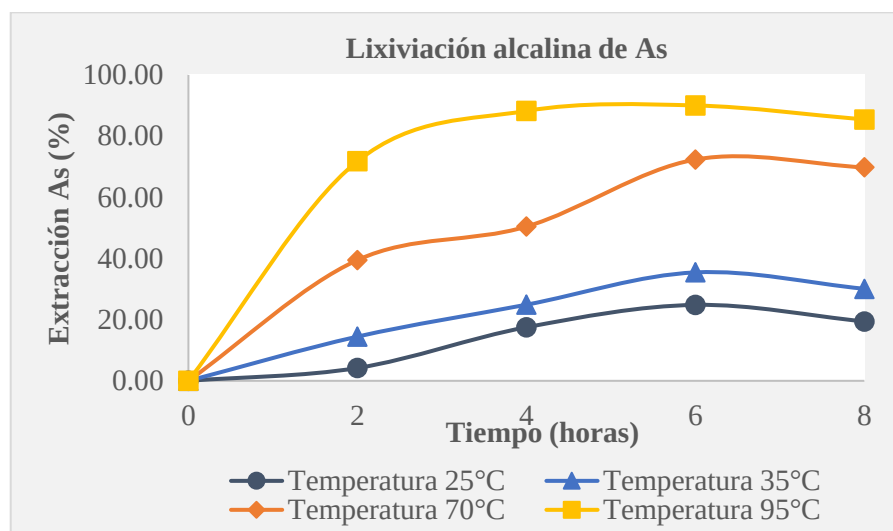
Tabla 17*Resumen de las pruebas de lixiviación*

Tiempo (horas)	Temperatura (°C)	Leyes del concentrado bulk (%)			Extracción (%)		
		As	Sb	Cu	As	Sb	Cu
0	25	6.44	6.13	23.47	0.00	0.00	0.00
	35	6.44	6.13	23.47	0.00	0.00	0.00
	70	6.44	6.13	23.47	0.00	0.00	0.00
	95	6.44	6.13	23.47	0.00	0.00	0.00
2	25	6.17	5.91	23.47	4.19	3.54	0.01
	35	5.51	5.59	23.46	14.45	8.77	0.03
	70	3.90	4.75	23.45	39.47	22.59	0.08
	95	1.82	4.02	23.45	71.77	34.46	0.09
4	25	5.31	5.71	23.44	17.51	6.77	0.11
	35	4.84	5.22	23.44	24.88	14.86	0.14
	70	3.19	4.26	23.43	50.41	30.49	0.19
	95	0.76	3.19	23.41	88.22	47.88	0.25
6	25	4.84	5.24	23.43	24.82	14.54	0.17
	35	4.16	4.91	23.43	35.44	19.88	0.19
	70	1.78	4.10	23.42	72.33	33.06	0.23
	95	0.64	2.55	23.40	90.01	58.41	0.29
8	25	5.19	4.98	23.42	19.41	18.77	0.21
	35	4.50	4.45	23.41	30.08	27.40	0.25
	70	1.95	3.75	23.40	69.77	38.76	0.29
	95	0.94	2.19	23.40	85.42	64.23	0.30

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15

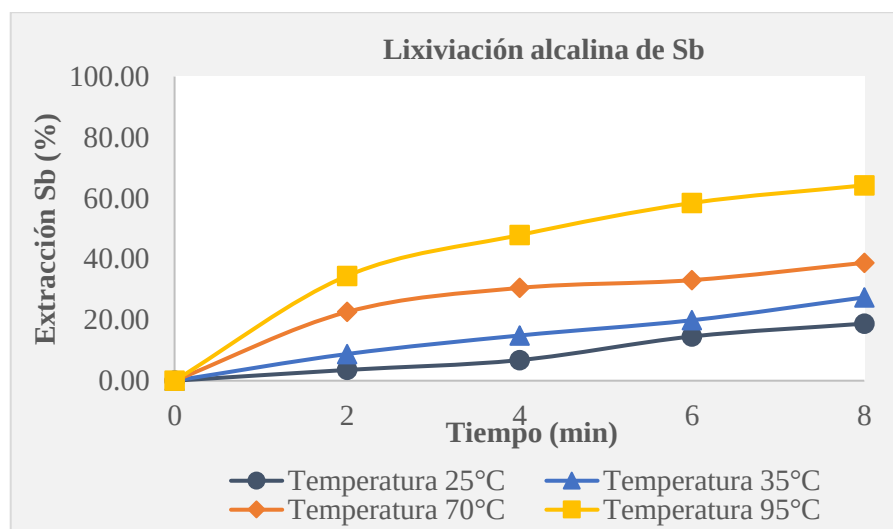
Extracción de arsénico en función del tiempo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16

Extracción de antimonio en función del tiempo



Fuente: Elaboración propia.

➤ **Diseños experimentales factoriales para evaluar la concentración de los reactivos y la granulometría en la lixiviación de arsénico y antimonio**

Se proyectó elaborar y desarrollar un diseño experimental factorial para evaluar la contribución de los agentes lixiviantes en la disolución de arsénico

y antimonio en un periodo de 6 horas a la temperatura de 95°C. Las condiciones de operación se detallan en la tabla 18.

Tabla 18

Constantes de operación para una lixiviación de 6 horas a 95°C

Parámetro	Valor
Peso de concentrado	250.00 g
pH	11
Agitación	500 rpm
Relación L/S	2.00
Temperatura	95°C
Tiempo de proceso	6 horas

Fuente: Elaboración propia.

- **Elaboración del diseño factorial**

Se elaboró un diseño del experimento factorial de 3 factores, 2 niveles y 2 réplicas, con lo cual se pretende determinar el nivel de contribución de la granulometría, la concentración de los agentes lixiviantes de hidróxido y sulfuro, sobre la lixiviación de arsénico y antimonio, así también determinar un modelo que representa la solubilidad de estos contaminantes bajo las condiciones de operación que se denotaron en la tabla 18. Los niveles de las variables en estudio se detallan en la tabla 19 y el diseño factorial y las variables respuesta en la tabla 20.

Tabla 19

Variables analizadas en el diseño factorial

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Granulometría (P80 en μ)	120	150
Sulfuro de sodio (g/t)	20	40
Hidróxido de sodio (g/t)	20	40

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20*Diseño factorial*

OrdenEst	P80	NaOH (Kg/t)	Na₂S (Kg/t)	Ext. As (%)	Ext. Sb (%)	Ext. Cu (%)
1	120	20	20	91.11	77.45	0.25
2	150	20	20	90.44	65.74	0.22
3	120	40	20	93.45	84.45	0.31
4	150	40	20	92.11	81.55	0.27
5	120	20	40	94.01	87.24	0.25
6	150	20	40	91.03	84.08	0.20
7	120	40	40	97.45	92.07	0.34
8	150	40	40	94.21	90.00	0.30
9	120	20	20	90.09	78.14	0.26
10	150	20	20	90.65	63.24	0.18
11	120	40	20	94.11	85.69	0.29
12	150	40	20	93.69	80.99	0.29
13	120	20	40	95.22	88.96	0.24
14	150	20	40	90.09	86.99	0.24
15	120	40	40	98.76	92.84	0.39
16	150	40	40	95.23	90.09	0.33

Fuente: Elaboración propia.

- Análisis estadístico de la lixiviación de arsénico**

El análisis de varianza para la lixiviación de arsénico demostró que la contribución del hidróxido de sodio es de 41,91%, la del sulfuro de sodio 24,96 %, la granulometría 16,91%, y la interacción doble de P80*Na₂S en 10.20%, siendo estas variables las de mayor contribución en la disolución de este contaminante, así mismo la interacción de las 3 variables en estudio no representan efecto alguno sobre dicho proceso, tal y como se muestran en la tabla 21, en el diagrama de Pareto de la figura 17 y la gráfica normal de efectos estandarizados en la figura 18.

Tabla 21

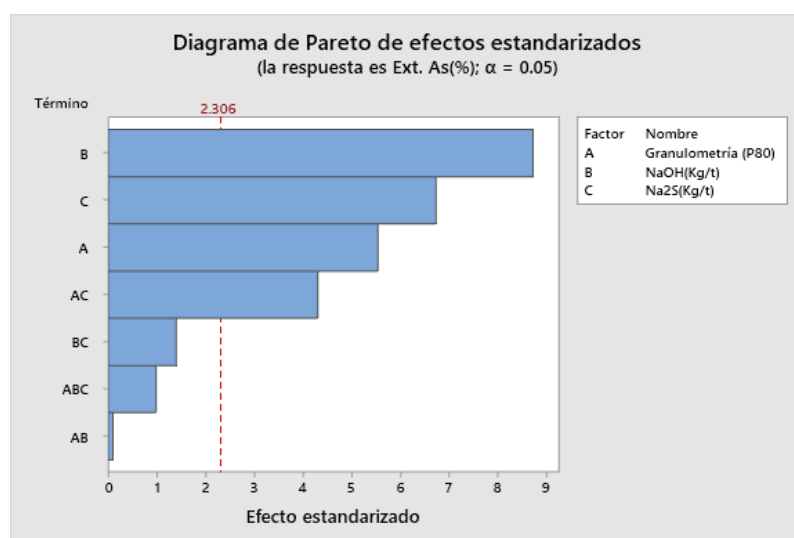
Anova de extracción de arsénico

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	99.141	95.60%	99.1407	14.163	24.85	0
Lineal	3	86.879	83.78%	86.8789	28.9596	50.8	0
P80	1	17.535	16.91%	17.5352	17.5352	30.76	0.001
NaOH	1	43.461	41.91%	43.4611	43.4611	76.24	0
Na ₂ S	1	25.883	24.96%	25.8827	25.8827	45.4	0
Interacciones dobles	3	11.703	11.29%	11.7031	3.901	6.84	0.013
P80*NaOH	1	0.006	0.01%	0.006	0.006	0.01	0.921
P80*Na ₂ S	1	10.579	10.20%	10.5788	10.5788	18.56	0.003
NaOH*Na ₂ S	1	1.118	1.08%	1.1183	1.1183	1.96	0.199
Interacciones triples	1	0.559	0.54%	0.5588	0.5588	0.98	0.351
P80*NaOH*Na ₂ S	1	0.559	0.54%	0.5588	0.5588	0.98	0.351
Error	8	4.56	4.40%	4.5603	0.57		
Total	15	103.701	100.00%				

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17

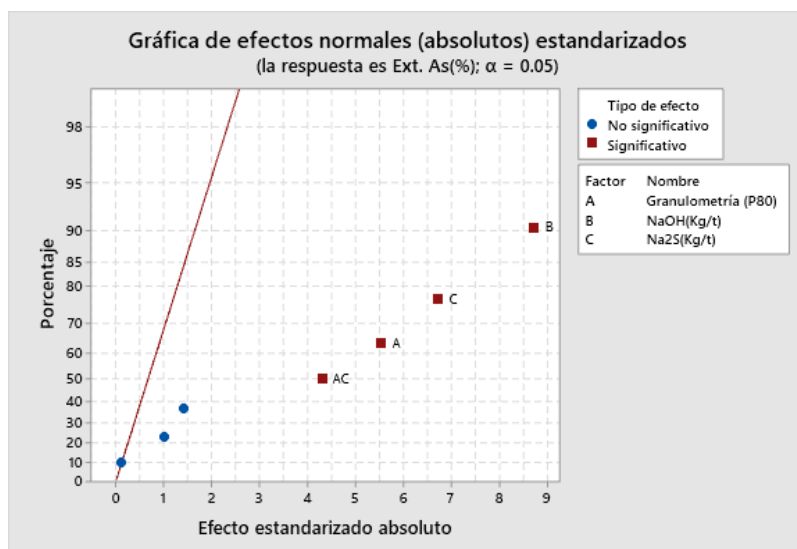
Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de extracción de arsénico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18

Efectos normales (absolutos) estandarizados de extracción de arsénico



Fuente: Elaboración propia.

a. Ecuación de regresión para la lixiviación de arsénico en unidades no codificadas

Se presenta un modelo matemático para la lixiviación de arsénico en función de la granulometría, y la dosificación de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio, la cual se describe en la 22, con un coeficiente de correlación predictivo del 82,41 %, lo que demuestra la confiabilidad del modelo.

Tabla 22

Resumen del modelo de la lixiviación de arsénico

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
0.755012	95.60%	91.75%	18.2414	82.41%	73.32	50.28

Fuente: Elaboración propia.

$$\begin{aligned} \text{Ext. As(\%)} = & 58.7 + 0.209 \text{ Granulometría (P80)} + 0.608 \text{ NaOH(Kg/t)} + 1.284 \\ & \text{Na}_2\text{S(Kg/t)} - 0.00387 \text{ Granulometría (P80)*NaOH(Kg/t)} \\ & - 0.00916 \text{ Granulometría (P80)*Na}_2\text{S(Kg/t)} - 0.0142 \\ & \text{NaOH(Kg/t)*Na}_2\text{S(Kg/t)} + 0.000125 \text{ Granulometría} \\ & \text{(P80)*NaOH(Kg/t)*Na}_2\text{S(Kg/t)} \end{aligned}$$

- **Análisis estadístico de la lixiviación de antimonio**

El análisis de varianza para la lixiviación de antimonio demuestra la mayor influencia de la dosificación de reactivo Na_2S sobre la lixiviación de antimonio, con una contribución del 50,97%, así también las variables de granulometría y dosificación de hidróxido de sodio contribuyen con 11,10% y 24,47%, respectivamente, tal y como lo demuestra el análisis de la varianza de la lixiviación de antimonio en la tabla 23. Así también el diagrama de Pareto y la gráfica normal de efectos estandarizados demuestra el total de las contribuciones de las variables y sus interacciones en la disolución de antimonio, tal y como lo demuestran la figura 19 y 20.

Tabla 23

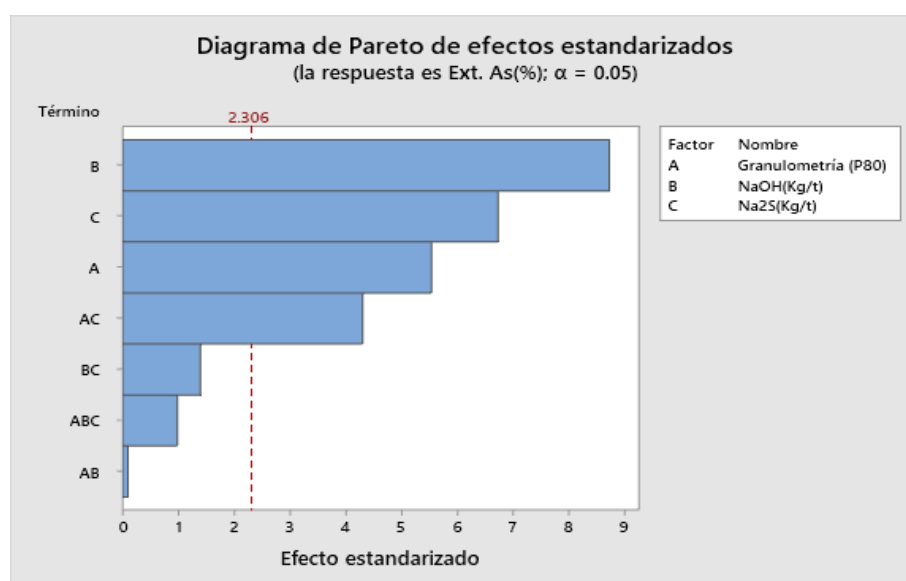
Diseño factorial de extracción de antimonio

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	1096.77	99.07%	1096.77	156.681	121.67	0
Lineal	3	957.11	86.45%	957.11	319.038	247.74	0
P80	1	121.88	11.01%	121.88	121.882	94.64	0
NaOH	1	270.93	24.47%	270.93	270.932	210.38	0
Na ₂ S	1	564.3	50.97%	564.3	564.3	438.19	0
Interacciones dobles	3	117.8	10.64%	117.8	39.266	30.49	0
P80*NaOH	1	23.33	2.11%	23.33	23.329	18.12	0.003
P80*Na ₂ S	1	36.78	3.32%	36.78	36.784	28.56	0.001
NaOH*Na ₂ S	1	57.68	5.21%	57.68	57.684	44.79	0
Interacciones triples	1	21.86	1.97%	21.86	21.856	16.97	0.003
P80*NaOH*Na ₂ S	1	21.86	1.97%	21.86	21.856	16.97	0.003
Error	8	10.3	0.93%	10.3	1.288		
Total	15	1107.07	100.00%				

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19

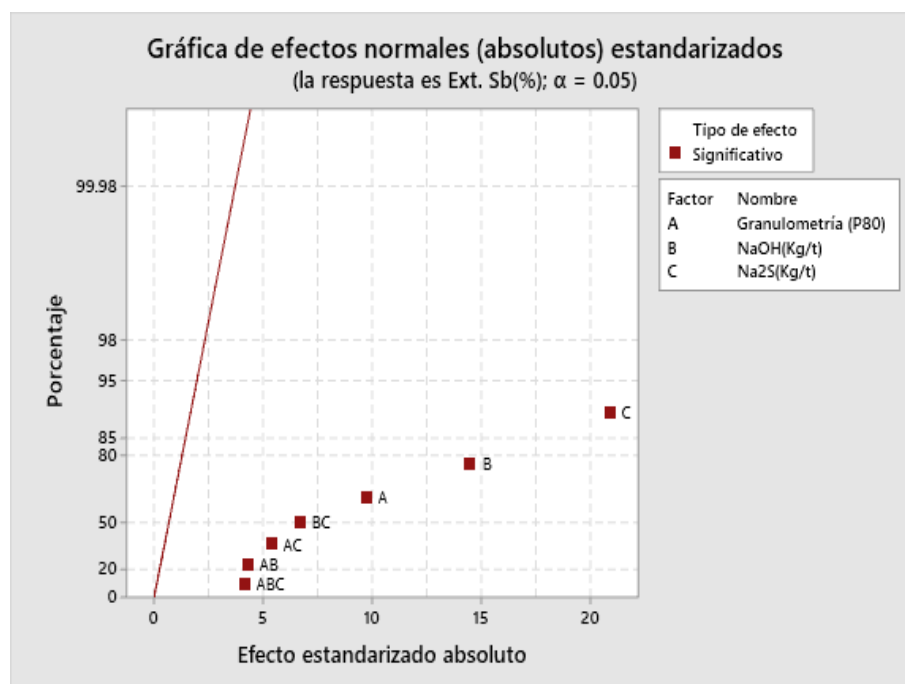
Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de extracción de antimonio



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20

Efectos normales (absolutos) estandarizados de extracción de antimonio



Fuente: Elaboración propia.

a. Ecuación de regresión para la lixiviación de antimonio en unidades no codificadas

Se presenta un modelo matemático para la lixiviación de antimonio en función a la granulometría del concentrado, dosificación de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio, y sus interacciones, la cual es descrita en la ecuación con un coeficiente de correlación predictivo del 96,28%, lo que demuestra la confiabilidad del modelo, tal y como se muestra en la tabla 24.

Tabla 24*Resumen del modelo de la lixiviación de antimonio*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)	AICc	BIC
1.13481	99.07%	98.26%	41.2096	96.28%	86.36	63.32

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Ext. Sb(\%)} = 228.9 - 1.430 \text{ Granulometría (P80)} - 3.261 \text{ NaOH(Kg/t)} - 3.357 \text{ Na}_2\text{S(Kg/t)} + 0.03142 \text{ Granulometría (P80)*NaOH(Kg/t)} + 0.03348 \text{ Granulometría (P80)*Na}_2\text{S(Kg/t)} + 0.0862 \text{ NaOH(Kg/t)*Na}_2\text{S(Kg/t)} - 0.000779 \text{ Granulometría (P80)*NaOH(Kg/t)*Na}_2\text{S(Kg/t)}$$

- **Optimización de los valores para maximizar la lixiviación de As y Sb**

En base a los valores mínimos y máximos de las variables, presentadas en la tabla 25, se realizó una configuración para optimizar los valores (tabla 26 y 27), obteniendo lo presentado en la figura 21.

Tabla 25*Presentación de la maximización de las variables*

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo
Ext. Sb(%)	Máximo	63.24	92.84
Ext. As(%)	Máximo	90.09	98.76

Fuente: Elaboración propia.**Tabla 26***Configuración de las variables principales*

Variable	Valor de configuración
Granulometría (P80)	120
NaOH(g/t)	40
Na ₂ S(g/t)	40

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27

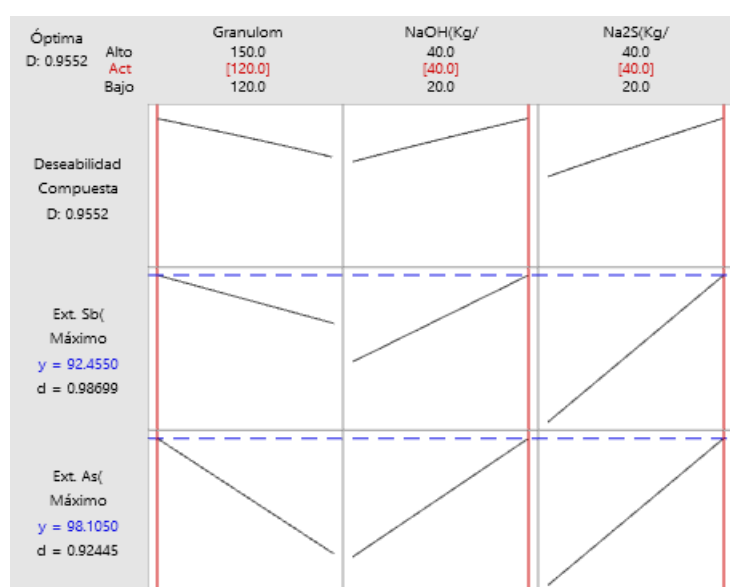
Ajuste de las extracciones

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Ext. Sb (%)	92.455	0.802	(90.605; 94.305)	(89.250; 95.660)
Ext. As (%)	98.105	0.534	(96.874; 99.336)	(95.973; 100.237)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21

Efectos normales (absolutos) estandarizados de extracción de antimonio



Fuente: Elaboración propia.

La prueba más representativa del diseño de pruebas de lixiviación corresponde a la prueba de orden 15, cuyo concentrado lixiviado ensayó una ley según se presenta en la tabla 28:

Tabla 28

Ensayos químicos de la mejor prueba

Cu (%)	Ag Oz/TC	Au Oz/TC	As %	Sb %	Bi %
22.25	80.27	0.1	0.13	0.49	0.55

Fuente: Reportado por el laboratorio H&F.

4.3. Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis en esta investigación se enfoca en evaluar la eficacia de la lixiviación alcalina para la eliminación de arsénico de los concentrados de cobre con alto contenido de arsénico. A continuación, se detalla cómo se abordarán la hipótesis general y específicas.

4.3.1. Prueba de la hipótesis general

Hipótesis general (HG): La lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S logrará la eliminación de arsénico de los concentrados con alto contenido de cobres grises.

La evaluación de las pruebas de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S bajo diversas condiciones de temperatura y tiempo, así como el análisis de los resultados experimentales, muestra que:

- La mayor eficiencia en la eliminación de arsénico se logró a una temperatura de 95°C y un tiempo de 6 horas, alcanzando una solubilización del 90,01%.
- El modelo predictivo para la solubilidad de arsénico muestra un coeficiente de correlación del 82,41%, indicando una alta precisión en la predicción de la solubilidad basada en las variables operativas.

Dado que los resultados experimentales indican una eliminación significativa de arsénico bajo las condiciones especificadas, se acepta la hipótesis. Esto confirma que la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S es efectiva para la eliminación de arsénico de los concentrados de cobre con alto contenido de arsénico.

4.3.2. Prueba de la Hipótesis Específica 1

Hipótesis Específica 1 (HE1): La caracterización de los concentrados con alto contenido de cobres grises en el departamento de Ancash permitirá detallar

las especies de minerales involucradas, distribución volumétrica de las especies, enlaces entre minerales y grados de liberación.

La caracterización mineralógica realizada identificó las especies minerales principales, como calcopirita, covelita, bornita, sulfosales de plata, entre otras, y detalló su distribución y grados de liberación. Los resultados confirmaron que la caracterización proporciona información completa y detallada.

Dado que los resultados confirmaron la información detallada sobre las especies minerales y su distribución, se acepta la hipótesis.

4.3.3. Prueba de la Hipótesis Específica 2

Hipótesis Específica 2 (HE2): El procesamiento de los resultados obtenidos en las pruebas metalúrgicas de lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S de los concentrados de cobres grises, mediante balances metalúrgicos y análisis estadísticos, determinará la eliminación de arsénico en el departamento de Ancash.

El análisis de los resultados obtenidos, junto con los balances metalúrgicos y el análisis estadístico, demuestra que se alcanzaron altas tasas de eliminación de arsénico y antimonio, con valores de hasta 98,76% y 92,84% respectivamente. El modelo predictivo para la solubilidad de antimonio mostró un coeficiente de correlación del 96,28%, indicando una alta precisión en la predicción de la solubilidad.

Dado que los resultados muestran una eliminación efectiva de arsénico y que los modelos predictivos respaldan estos resultados, se acepta la hipótesis.

4.4. Discusión de resultados

La caracterización mineralógica identificó las principales especies minerales en el concentrado bulk, destacando a los cobres grises como los principales portadores de cobre, arsénico y antimonio. Este hallazgo concuerda con la información presentada en estudios previos, donde los cobres grises y sulfosales de plata son reconocidos como fuentes significativas de arsénico y otros contaminantes. En comparación, Liu et al. (2022) también identificaron arsénico en residuos minerales, y su estudio demuestra la presencia de arsénico en concentrados purificados, lo que respalda nuestras observaciones sobre la importancia de los cobres grises como fuente principal de arsénico en el concentrado.

Los resultados de la investigación muestran que la lixiviación a 95°C durante 6 horas logra una solubilización de arsénico del 90,01% y de antimonio del 58,41%. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Yang et al. (2022), que lograron altas tasas de lixiviación de arsénico (>95%) y cobre (>99%) a temperaturas y condiciones controladas. La eficiencia de lixiviación para arsénico es comparable a la obtenida por Yang et al. (2022), aunque el tiempo de proceso en su estudio fue mayor (36 horas), sugiriendo que la temperatura juega un papel crucial en la eficacia del proceso. Por otro lado, Wu et al. (2022) reportaron una eficiencia de extracción del 99,6% para arsénico usando lixiviación oxidativa alcalina a presión, lo que destaca la alta eficiencia de los métodos de lixiviación en comparación con las condiciones experimentales de este trabajo. Sin embargo, su método implica condiciones más severas (presión y concentración de hidróxido de sodio), mientras que esta investigación demuestra

una alta eficiencia con condiciones más moderadas, lo cual es una ventaja en términos de operabilidad y costos.

El diseño experimental factorial que se empleó para evaluar la influencia de la granulometría y la concentración de reactivos mostró que las condiciones óptimas para la disolución de arsénico y antimonio fueron 120 μ de P80, 40 g/t de NaOH y 40 g/t de Na₂S, logrando tasas de disolución de 98,76% para arsénico y 92,84% para antimonio. Estos resultados se alinean con los encontrados por Liu et al. (2022), quienes también observaron que la lixiviación alcalina es efectiva para la extracción de arsénico, aunque con diferentes concentraciones de reactivos y condiciones de operación. La comparación con su estudio indica que, a pesar de usar concentraciones más bajas, nuestra investigación logra resultados comparables en términos de eliminación de arsénico, destacando la eficiencia del método en condiciones optimizadas.

El modelo predictivo para la solubilidad de arsénico y antimonio en nuestra investigación mostró un alto coeficiente de correlación, indicando que el modelo es efectivo en predecir la solubilidad bajo las condiciones experimentales. Este enfoque es consistente con las técnicas empleadas por otros estudios, como el de Yang et al. (2022), que también utilizaron modelos estadísticos para optimizar y predecir la eficiencia de lixiviación. En comparación con el estudio de Shun et al. (2023), que exploró la lixiviación de arsénico en carbón con ácido cítrico y UV, los resultados de esta investigación sugieren que la combinación de NaOH y Na₂S también puede ser altamente efectiva, aunque el mecanismo de reacción y los factores involucrados son diferentes. La investigación de Shun et al. demostró que el ácido cítrico y la irradiación UV mejoran la lixiviación de

arsénico, mientras que este estudio utiliza una estrategia diferente pero igualmente eficaz.

CONCLUSIONES

La caracterización mineralógica del concentrado de flotación permitió identificar las principales especies presentes: calcopirita, cobres grises, covelita, bornita, sulfosales de plata, plata nativa, pirita, arsenopirita, pirrotita y gangas. Se determinó que los cobres grises representan el 35,16% del volumen del concentrado y son la principal fuente de cobre, arsénico y antimonio. Asimismo, se identificaron como fuentes adicionales de contaminantes las sulfosales de plata (2,58%) y la arsenopirita (2,10%). Estos datos son fundamentales para entender la distribución y liberación de las especies mineralógicas contaminantes.

Se logró reducir el arsénico presente en el concentrado de flotación mediante la lixiviación alcalina con NaOH y Na₂S. Las pruebas iniciales evaluaron las variables de temperatura y tiempo, obteniendo una solubilidad de arsénico del 90,01% y de antimonio del 58,41% a 95°C y 6 horas de lixiviación, con agitación de 500 rpm, un tamaño de partícula de -200 malla (62,58%), 60 Kg/t de Na₂S y 20 Kg/t de NaOH. Posteriormente, mediante un diseño experimental factorial de 2 niveles, 3 factores y 2 réplicas, se determinó que las mejores condiciones para la lixiviación son: granulometría de 120 µm de P80, 40 Kg/t de NaOH y 40 Kg/t de Na₂S. Bajo estas condiciones, se alcanzó una tasa de disolución de arsénico de 98,76% y de antimonio de 92,84%. El modelo predictivo para la solubilidad de arsénico, con un coeficiente de correlación del 82,41%, y para el antimonio, con un coeficiente de correlación del 96,28%, permitió describir el comportamiento de la lixiviación considerando las interacciones entre granulometría, concentración de NaOH y Na₂S. Estos resultados optimizan el proceso metalúrgico para concentrados con alto contenido de cobres grises.

RECOMENDACIONES

Evaluar la contribución de las variables densidad de pulpa y velocidad de agitación en el proceso anteriormente descrito

Evaluar las alternativas de tratamientos de los licores de lixiviación con alto contenido de arsénico y antimonio.

Realizar un estudio de microscopia electrónica para determinar con más precisión que especies de cobres grises y sulfosales de platas aportan contaminantes, así como también otros minerales que puedan aportar dichos metales.

En base a los resultados obtenidos se propone el desarrollo del proceso de lixiviación alcalina a escala piloto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Abed, N., & Dreisinger, D. (2002). A fundamental study of the reductive leaching of chalcopryrite using metallic iron part I: kinetic analysis. *Hydrometallurgy*, 66(1-3), 37-57. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00079-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00079-8)
- Abuawad, A., Bozack, A., Saxena, R., & Gamble, M. (2021). Nutrition, one-carbon metabolism and arsenic methylation. *Toxicology*, 457(152803). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.152803>
- Awe, S., & Sandström, Å. (2014). Tratamiento hidro-electrometalúrgico de un concentrado de cobre con contenido de tetraedrita. *Minería*, 439. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/261992091_Tratamiento_hidro-electrometalurgicos_de_un_concentrado_de_cobre_con_contenido_de_tetraedrita
- Azañero, Á., Núñez, P. F., Fernández, S., Caballero, M., Chávez, X., & Valenzuela, A. (2004). Lixiviación de concentrado Pb/Ag con alto contenido de As/Sb. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7(14), 9-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v7i14.509>
- Baláz, P., & Achimovičová, M. (2006). Selective leaching of antimony and arsenic from mechanically activated tetrahedrite, jamesonite and enargite. *International Journal of Mineral Processing*, 81(1), 44-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.06.004>
- Bazan, V., Orozco, I., Brandaleze, E., & Ruarte, P. (2015). Eliminación de arsénico de concentrados de cobre. *Asociación Argentina de Materiales*, 3. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/70627/CONICET_Digital_Nro.5f4e500e-6cfc-48ff-a575-a2ab5e58b933_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- Cai, Y., Mi, Y., & Zhang, H. (2016). Kinetic modeling of antimony(III) oxidation and sorption in soils. *Journal of Hazardous Materials*, 316, 102-109.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.027>
- Canchanya, A., & Yance, N. (2019). *Selección del método de flotación separación cobre/plomo de acuerdo a la caracterización geometalúrgica del Concentrado Bulk en la Planta Concentradora Ana María Compañía Minera Brexia Goldplata Perú S.A.C.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Cañola, C., Gallego, A., & Bolívar, W. (2015). Caracterización mineralógica y mineralogía de procesos aplicada a la mina de veta "La Esperanza", ubicada en la Vereda Cedeño parte alta del municipio de Támesis, Antioquia. *Revista Colombiana de Materiales*(6), 54-68.
<https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.rcm.22874>
- Chirif, L. (2010). *Microscopía Óptica de Minerales*. INGEMMET, Lima.
- Curreli, L., Ghiani, M., Surracco, M., & Orrù, G. (2005). Beneficiation of a gold bearing enargite ore by flotation and As leaching with Na-hypochlorite. *Minerals Engineering*, 18(8), 849-854.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.023>
- Filippou, D., St-Germain, P., & Grammatikopoulos, T. (2007). Recovery of metal values from copper-arsenic minerals and other related resources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 28(4), 247-298.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/08827500601013009>
- Giron, L. (2007). *Yacimientos minerales de antimonio, geología, clasificación, estudio económico y aplicaciones*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

- Guiachetti, D. (2011). *Consumo de Ácido Sulfúrico y Cinética de Lixiviación de un Mineral Oxidado de Cobre*. Tesis de licenciatura, Universidad de Chile, Santiago.
- Jayasumana, C., Fonseka, S., Fernando, A. J., Amarasinghe, M., Siribaddna, S., Gunatilake, S., & Paranagama, P. (2015). Phosphate fertilizer is a main source of arsenic in areas affected with chronic kidney disease of unknown etiology in Sri Lanka. *SpringerPlus*, 4(90). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s40064-015-0868-z>
- Kapera, K., & Koleżyński, A. (2022). First-principles study of structural disorder, site preference, chemical bonding and transport properties of Mg-doped tetrahedrite. *Computational Materials Science*, 213(111681). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2022.111681>
- Lane, D., Cook, N., Grano, S., & Ehring, K. (2016). Selective leaching of penalty elements from copper concentrates: A review. *Minerals Engineering*, 98, 110-121. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.006>
- Li, J., Zheng, B., He, Y., Zhou, Y., Chen, Xiao: Ruan, S., Yang, Y., Dai, C., & Tang, L. (2018). Antimony contamination, consequences and removal techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 156, 125-134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.024>
- Lillo, J. (2010). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Documentos, Grupo de Estudios en Minería & Medioambiente, Almadén - La Serena - Madrid.
- Liu, W., Huang, C., Han, J., & Qin, W. (2021). Removal and reuse of arsenic from arsenic-bearing purified residue by alkaline pressure oxidative leaching and reduction of As (V). *Hydrometallurgy*, 199(105541). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105541>

- Mandal, B., & Suzuki, K. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 58(1), 201-235. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00268-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0)
- Meiner, K., Weigelt, A., Charitos, A., Schimpf, C., Stelter, M. W., Förster, K., Hammerschmidt, J., & Parra, R. (2021). Alkaline Sulfide Leaching and Partial Roasting for Treatment of As-rich Concentrates. *Proceedings of EMC 2021*.
- Podgorski, J., & Berg, M. (2020). Global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368(6493), 845-850. <https://doi.org/10.1126/science.aba1510>
- Puga, E. (2014). *Lixiviación alcalina de arsénico contenido en el mineral cobre gris presente en concentrados de cobre del Centro del Perú*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Callao, Lima.
- Rahaman, S., Mise, N., & Ichihara, S. (2022). Arsenic contamination in food chain in Bangladesh: A review on health hazards, socioeconomic impacts and implications. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 2(100004). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heha.2022.100004>
- Rahaman, S., Rahman, M., Mise, N., Sikder, T., Ichihara, G., Uddin, K., Kurasaki, M., & Ichihara, S. (2021). Environmental arsenic exposure and its contribution to human diseases, toxicity mechanism and management. *Environmental Pollution*, 289(117940). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117940>
- Rahman, A., Rahman, A., Kaiser, Z., & Renzaho, A. (2018). Human health risks and socio-economic perspectives of arsenic exposure in Bangladesh: a scoping review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 335-343. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.032>
- Ruiz, M., Bello, R., & Padilla, R. (2013). Remoción de arsénico desde concentrados de cobre que contienen enargita. *Revista Metalúrgica UTO*(33), 16-20.

http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932013000200003&lng=es&nrm=iso

Shaji, E., Santosh, M., Sarath, K., Prakash, P., Deepchand, V., & Divya, B. (2021). Arsenic contamination of groundwater: a global synopsis with focus on the Indian Peninsula. *Geoscience Frontiers*, 12(3).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.015>

Sharma, V., & Sohn, M. (2009). Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environment International*, 35(4), 743-759.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.01.005>

Shun, Q., Zhenzhen, L., Wenshou, S., Linlin, T., Jin, L., & Jintong, L. (2023). Citrate-enhanced leaching of arsenic from coal with simulated flue gas under UV irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 463(142188).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142188>

Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Singh, V., & Prasad, S. (2015). Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 247-270.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>

Smedley, P., & Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)

Tabares, L. (2020). *Caracterización mineralógica y química orientada a geometalurgia de los depósitos auríferos de un sector del Distrito Minero de La Llanada – Departamento de Nariño (Colombia)*. Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
<file:///C:/Users/ELIZA/Desktop/caracterizacion%20de%20oro.pdf>

- Tian, S., Pan, Y., & Wang. (2016). Size-resolved source apportionment of particulate matter in urban Beijing during haze and non-haze episodes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(1), 1-19. [https://doi.org/https://doi.org/10.5194/acp-16-1-2016](https://doi.org/10.5194/acp-16-1-2016)
- Torrisi, C. (2001). Leaching of fluorine bearing minerals from lead and zinc concentrates. *Minerals Engineering*, 14(12), 1637-1648. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00182-0](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00182-0)
- Vahter, M. (2008). Health Effects of Early Life Exposure to Arsenic. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, 102(2), 204-211. [https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2007.00168.x](https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2007.00168.x)
- Wai, K., Wu, S., Li, X., Jaffe, D., & Perry, K. (2016). Global Atmospheric Transport and Source-Receptor Relationships for Arsenic. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3714-3720. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05549>
- Williams, P., Price, A., Raab, A., Hossain, S., Feldmann, J., & Meharg, A. (2005). Variation in arsenic speciation and concentration in paddy rice related to dietary exposure. *Environmental Science & Technology*, 39, 5531-5540. [https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es0502324](https://doi.org/10.1021/es0502324)
- Wu, F., Zheng, J., Pan, X., Li, W., D. Q., Mo, C., Zhu, J., Li, B., Shao, S., & J., G. (2008). Prospect on biogeochemical cycle and environmental effect of antimony. *Advances in Earth Science*, 23(4), 350-356. <https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2008.04.0350>
- Wu, X., Zeng, L., Wu, S., Qing, J., Li, Q., Cao, Z., Wang, M., Zhang, G., & Guan, W. (2023). Eco-friendly extraction of arsenic and tungsten from hazardous tungsten residue waste by pressure oxidation leaching in alkaline solutions: Mechanism

and kinetic model. *Journal of Environmental Management*, 325(116586).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116586>

Yang, W., Qian, L., Jin, B., Feng, Q., Li, L., He, K., & Yang, J. (2022). Leaching behaviors of copper and arsenic from high-arsenic copper sulfide concentrates by oxygen-rich sulfuric acid leaching at atmospheric pressure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107358>

Zhang, L., Shao, J., Lu, X., Zhao, Y., Hu, Y., Henze, D., Liao, H., Gong, S., & Zhang, Q. (2016). Sources and Processes Affecting Fine Particulate Matter Pollution over North China: An Adjoint Analysis of the Beijing APEC Period. *Environmental Science & Technology*, 50(16), 8731-8740.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03010>

Zinke, L. (2020). Groundwater arsenic. *Nature reviews earth & environment*, 1(558).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s43017-020-00110-2>

ANEXOS

Instrumentos de Recolección de datos

Anexo 1

Análisis químico del concentrado de flotación



H&F LABORATORIOS SAC
DESDE 1999

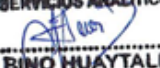
*Análisis químico de minerales, concentrados, aleaciones,
agua y aire. Control ambiental.
Fabricación y venta, de reactivos químicos y equipos.*

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : JORGE CAMPOS
Tipo de Muestra : CONCENTRADO
Procedencia :
Fecha de Recepción : 12 de agosto del 2023
Referencia : H&F 224 /2023

DENOMINACIÓN DE MUESTRA:	RESULTADOS DE ANÁLISIS
	Concentrado de flotación bulk
Cobre Cu (%)	23.47 %
Plata Ag (Oz/TC)	81.69 Oz/TC
Oro Au (Oz/TC)	0.1 Oz/TC
Arsénico As (%)	6.44 %
Antimonio Sb (%)	6.13 %
Bismuto Bi (%)	0.88 %

Lima, 18 de agosto del 2023

H&F LABORATORIOS SAC
SERVICIOS ANALÍTICOS

ALBINO HUAYTALLA M.
GERENTE GENERAL

Anexo 2

Análisis químico del concentrado de lixiviación



H&F LABORATORIOS SAC
DESDE 1999

Análisis químico de minerales, concentrados, aleaciones,
agua y aire. Control ambiental.
Fabricación y venta, de reactivos químicos y equipos.

REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICO

Solicitante : JORGE CAMPOS
Tipo de Muestra : CONCENTRADO
Procedencia :
Fecha de Recepción : 10 de setiembre del 2023
Referencia : H&F 224 /2023

DENOMINACIÓN DE MUESTRA:	RESULTADOS DE ANÁLISIS
	Concentrado de lixiviación
Cobre Cu (%)	22.25 %
Plata Ag (Oz/TC)	80.27 Oz/TC
Oro Au (Oz/TC)	0.1 Oz/TC
Arsénico As (%)	0.13 %
Antimonio Sb (%)	0.49 %
Bismuto Bi (%)	0.55 %

Lima, 20 de setiembre del 2023

H&F LABORATORIOS SAC
SERVICIOS ANALITICOS

ALBINO HUAYTALLA M.
GERENTE GENERAL

Anexo 3

Fotografías de las pruebas metalúrgicas

