

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS:**

**Determinación de parámetros óptimos para la remoción de  
Arsénico en un concentrado bulk de Molibdeno mediante  
lixiviación alcalina**

Para optar el título profesional de:  
**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR:  
**Bach. Yuliano Andre ROBLES BEDRILLANA**

ASESOR:  
**MSc. Luis Alberto COSSIO HERRERA**

COASESOR:  
**Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2025**

## **DEDICATORIA**

A mi madre, gracias a su esfuerzo, paciencia y dedicación, he podido llegar a esta etapa de mi vida. Su amor incondicional han sido la base en mi vida.

A mis hermanas, siempre me han motivado a avanzar, incluso en los momentos más difíciles.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi querida Alma Mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por darme la oportunidad de crecer y desarrollarme profesionalmente en un entorno académico. Mi apreciada Escuela Profesional de Ingeniería Química, por su compromiso con la formación de profesionales, agradezco a todos los docentes que, con su dedicación y tiempo, han sido fundamentales en mi desarrollo académico y profesional.

A mis queridas docentes la Mg. Gloria Inés Barboza Palomino y Dr. Tarcila Alcarraz Alfaro, por sus enseñanzas y su disposición constante en todos estos años en la Universidad, brindándome valiosos consejos, su dedicación y compromiso con mi formación académica.

Expreso mi sincero agradecimiento a los distintos profesionales que, con su conocimiento y experiencia, contribuyeron significativamente en mi formación profesional. Al Dr. Adolfo La Rosa, por brindarme la oportunidad de realizar una pasantía en la UNI, experiencia que marcó un paso importante en mi formación. Al Ing. Casiano Palomino, por su orientación y apoyo constante en mi formación como ingeniero químico. A mis mentores, el Ing. Jeffrey Cervantes y el Ing. Carlos Soto, por su valiosa guía en el sector de la metalurgia, así como por su acompañamiento que enriqueció tanto mi crecimiento profesional como personal. Al Ing. Pepe Quezada, por compartir sus conocimientos y especialmente por inculcarme valores y habilidades que han sido esenciales en mi desarrollo. Finalmente, un agradecimiento especial al Ing. Claudio Lazo a quien aprecio, respeto y admiro; por su orientación, guía y ejemplo profesional.

Mis agradecimientos a mi asesor, Mg. Luis Alberto Cossio Herrera por su contribución para el desarrollo de la tesis.

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito determinar los parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante la lixiviación alcalina. El nivel de investigación es explicativo y experimental, durante la investigación se realizó la cantidad de 09 experimentos con muestras representativas del concentrado bulk de molibdeno, se determinó la contribución de los factores como temperatura, concentración de agente lixivante, velocidad de agitación y tiempo de residencia en la remoción del arsénico presente, los experimentos se realizaron en el laboratorio de la UNSCH, mientras los análisis químicos se realizaron en el laboratorio acreditado de Suelos , Aguas y Folias del Instituto Nacional de Innovación Agraria.

Se realizaron pruebas de lixiviación alcalina para la remoción de arsénico en un concentrado bulk, empleando solo como agente lixivante el hidróxido de sodio (NaOH) a diferentes concentraciones desde 0,2 M; 0,6 M y 1,2 M. Se evalúa este proceso a 03 diferentes niveles de temperatura de 30°C, 45°C y 60°C, para periodos de 30, 45 y 60 minutos con velocidades de agitación de 100 RPM, 300 RPM y 500 RPM. Al tener 4 variables y 3 niveles se emplea el método Taguchi. Se logró remover 52,65 % de arsénico, con 1,2 M de NaOH a una temperatura de 60 °C, 300 RPM de velocidad de agitación y a un tiempo de residencia de 30 minutos. En los diferentes experimentos se observó que en ninguno se disuelve más del 5 % de molibdeno, demostrando su gran selectividad del Hidróxido de Sodio.

Se obtuvo 1061,56 % de rentabilidad por unidad de costo, siendo esta la mayor comparado al resto de los experimentos. Esto significa una ganancia de S/.176,8 por tonelada tratada de concentrado bulk de molibdeno; logrando comercializar concentrados de molibdeno que incumplían con los estándares de calidad antes del proceso de lixiviación alcalina.

Palabras claves: Remoción de arsénico, lixiviación alcalina, concentrado de molibdeno.

## ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the optimal parameters for arsenic removal from a bulk molybdenum concentrate using alkaline leaching. The research was explanatory and experimental. Nine experiments were conducted with representative samples of the bulk molybdenum concentrate. The contribution of factors such as temperature, leaching agent concentration, agitation speed, and residence time to arsenic removal was determined. The experiments were carried out in the UNSCH laboratory, while the chemical analyses were performed in the accredited Soils, Water, and Foliage Laboratory of the National Institute of Agricultural Innovation.

Alkaline leaching tests were performed for arsenic removal from a bulk concentrate, using only sodium hydroxide (NaOH) as the leaching agent at different concentrations, starting from 0.2 M, 0.6 M and 1.2 M. This process was evaluated at three different temperature levels: 30°C, 45°C, and 60°C, for periods of 30, 45, and 60 minutes, with stirring speeds of 100 RPM, 300 RPM, and 500 RPM. Given the four variables and three levels, the Taguchi method was employed. A 52.65% arsenic removal was achieved with 1.2 M NaOH at a temperature of 60°C, a stirring speed of 300 RPM, and a residence time of 30 minutes. In the different experiments, it was observed that no more than 5% of molybdenum dissolved in any of them, demonstrating the high selectivity of sodium hydroxide.

A 1061,56% return on investment per unit cost was obtained, the highest compared to the other experiments. This represents a profit of S/.176,8 per ton of molybdenum bulk concentrate treated, enabling the sale of molybdenum concentrates that did not meet quality standards before the alkaline leaching process.

Keywords: Arsenic removal, alkaline leaching, molybdenum concentrate.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I GENEREALIDADES .....	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	4
1.2.1. Problema General .....	4
1.2.2. Problemas Específicos .....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	4
1.3.1. Justificación Teórica .....	4
1.3.2. Justificación Técnica .....	5
1.3.3. Justificación Económica .....	5
1.3.4. Justificación Ambiental.....	5
1.4. OBJETIVO.....	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos .....	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
2.1.1. Antecedentes Internacionales .....	7
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	8
2.1.3. Antecedentes Locales .....	10
2.2. EL MOLIBDENO.....	10
2.2.1. Historia del Molibdeno .....	10
2.2.2. El molibdeno en la Naturaleza.....	12
2.2.3. Principales minerales de Molibdeno .....	14
2.2.4. Propiedades físicas del Molibdeno .....	17
2.2.5. Propiedades químicas del Molibdeno.....	18

2.3.	EXPLORACIÓN Y PROCESAMIENTO DEL MOLIBDENO .....	19
2.3.1.	Minado.....	19
2.3.2.	Conminución.....	21
2.3.3.	Flotación .....	23
2.3.4.	Filtrado.....	30
2.3.5.	Secado .....	31
2.4.	CONCENTRADO DE MOLIBDENO Y SU COMERCIALIZACIÓN .....	31
2.4.1.	Mercado del concentrado de molibdeno .....	31
2.4.2.	Concentrado de Molibdeno .....	35
2.4.3.	Especificaciones de la Calidad del Concentrado .....	36
2.4.4.	Penalizaciones.....	36
2.4.5.	El arsénico como contaminante .....	37
2.4.6.	Principales minerales que contienen arsénico .....	38
2.5.	LIXIVIACIÓN ALCALINA.....	43
2.5.1.	Influencia de las variables en la lixiviación alcalina.....	44
	CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS .....	49
3.1.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	49
3.1.1.	Tipo de Investigación.....	49
3.1.2.	Nivel de Investigación.....	49
3.1.3.	Diseño de la Investigación.....	49
3.1.4.	Diseño Experimental – Método Taguchi.....	50
3.2.	POBLACIÓN.....	51
3.3.	MUESTRA .....	51
3.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	51
3.4.1.	Técnica de recolección de datos .....	51
3.4.2.	Instrumentos de recolección de datos.....	52
3.4.3.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	52
	CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	53
4.1.	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS CONCENTRADOS DE MOLIBDENO .....	53

4.1.1. Parámetros Químicos.....	53
4.2. PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN ALCALINA.....	54
4.2.1. Diseños experimentales Método de Taguchi .....	54
4.2.2. Análisis estadístico de la lixiviación alcalina del arsénico .....	56
4.2.3. Ecuación de regresión para la lixiviación de arsénico.....	57
4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	59
4.3.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .....	59
4.3.2. Contrastación de los resultados con estudios similares.....	62
CONCLUSIONES.....	64
RECOMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS.....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades Físicas del Molibdeno. ....	12
Tabla 2 Clasificación y características de los depósitos de molibdeno .....	13
Tabla 3 Propiedades físicas del molibdeno. ....	18
Tabla 4 Propiedades químicas del molibdeno. ....	19
Tabla 5 Composición química de un concentrado de molibdeno. ....	36
Tabla 6 Experimentos del diseño ortogonal- Método de Taguchi.....	50
Tabla 7 Resultados de análisis de metales en los 2 concentrados .....	54
Tabla 8 Constantes de operación durante la lixiviación alcalina.....	55
Tabla 9 Resultados del diseño ortogonal- Método de Taguchi.....	55
Tabla 10 ANOVA de la remoción de Arsénico .....	56
Tabla 11 Resumen del modelo de lixiviación de Arsénico.....	58
Tabla 12 Resumen del beneficio en los diferentes experimentos.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Principales depósitos de molibdeno .....	13
Figura 2 Mineral de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ).....	14
Figura 3 Mineral de Powellita ( $\text{CaMoO}_4$ ).....	15
Figura 4 Mineral de ferrimolibdenita ( $\text{FeMoO}_4$ ).....	16
Figura 5 Mineral de wulfenita ( $\text{PbMoO}_4$ ).....	17
Figura 6 Principales factores que afectan el proceso de flotación.....	24
Figura 7 Fundamento de operación de una celda de flotación mecánica.....	27
Figura 8 Fundamento de operación de celdas neumáticas .....	28
Figura 9 Circuito de flotación recomendado para una mayor recuperación .....	30
Figura 10 Precio del concentrado de molibdeno.....	32
Figura 11 Producción global del concentrado de molibdeno .....	33
Figura 12 Proyección del mercado mundial del concentrado de molibdeno.....	34
Figura 13 Exportación de concentrado de molibdeno en el Perú. ....	35
Figura 14 Diagrama Pourbaix de las especies del arsénico. ....	38
Figura 15 Mineral de oropimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ).....	39
Figura 16 Mineral de enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ).....	40
Figura 17 Mineral de tennatita ( $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ ) .....	41
Figura 18 Mineral de rejalgar ( $\text{As}_4\text{S}_4$ ).....	42
Figura 19 Mineral de arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) .....	43
Figura 20 Diagrama de Pareto.....	57

## ÍNDICE DE ANEXO

ANEXO A: Costo de reproceso de concentrado de molibdeno. ....	71
ANEXO B: Procedimiento Experimental. ....	72
Figura B1: Limpieza de equipos de laboratorio a emplear.....	73
Figura B2: Esterilización de materiales de vidrio. ....	73
Figura B3: Preparación de muestra .....	74
Figura B4: Control de parámetros durante la experimentación. ....	75
Figura B5: Etapa de filtración.....	76
Figura B6: Secado a 150°C por 20 minutos.....	77
Figura B7: Sellado, empaquetado y rotulado.....	78
ANEXO C: Resultado de análisis químicos .....	79
Figura C1: Análisis químico de los concentrados de molibdeno, emitido por el laboratorio de suelos, aguas y foliares.....	79
Figura C2: Análisis químico de los diferentes ensayos de lixiviación alcalina de las muestras del concentrado bulk de molibdeno, emitido por el laboratorio de suelos, aguas y foliares. ....	80
ANEXO D: Ensayos realizados en el laboratorio .....	82
ANEXO D1: Preparación del hidróxido de sodio a 0,2 M; 0,6 M y 1,2 M.....	82
Figura D1: Fiolas con hidróxido de sodio a diferentes concentraciones. ....	83
ANEXO D2: Estandarización del hidróxido de sodio .....	83
Figura D1: Titulación del ftalato ácido de potasio con hidróxido de sodio 1,2 N.....	84
Figura D2: Titulación del ftalato ácido de potasio con hidróxido de sodio 0,6 N.....	85
ANEXO E: Costos de la lixiviación alcalina en los diferentes experimentos.....	86
ANEXO E6: Costos en la lixiviación alcalina en los diferentes experimentos.....	88
ANEXO F: Matriz de consistencia.....	89
ANEXO G: Operacionalización de Variables .....	90

## INTRODUCCIÓN

El molibdeno al ser un elemento metálico estratégico cuya demanda ha aumentado significativamente durante las últimas décadas, debido a su uso en la fabricación de aceros especiales, aleaciones y catalizadores en la industria petroquímica. Su elevada resistencia a la corrosión, punto de fusión y capacidad para mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones lo convierten en un recurso fundamental para sectores industriales de tecnología, energéticos y metalúrgicos (Grupta & Krishanmurthy,2019).

El concentrado de molibdeno es un producto intermedio en el procesamiento metalúrgico, durante la flotación del molibdeno se presentan desafíos debido a la presencia de impurezas, las cuales disminuyen su calidad perjudicando su venta, generando penalidades económicas durante su comercio. El arsénico representa una de las impurezas más críticas debido a su elevada toxicidad y su impacto negativo en los procesos de fundición y refinación (Wang et al, 2018)

Frente a esta problemática, diversas investigaciones han abordado la remoción del arsénico mediante tratamiento hidrometalúrgicos, entre los cuales la lixiviación alcalina han mostrado ser una alternativa eficiente, selectiva y ambientalmente favorable (Zhou et al.,2019). Este proceso permite transformar especies arsenicales en compuesto solubles como arsenitos y arseniatos de sodio; la eficiencia del proceso dependiente de las condiciones de operación tales como la concentración del agente lixivante, la temperatura, tiempo de contacto, velocidad de agitación y el tamaño de partícula del concentrado.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se centra en la determinación de los parámetros óptimos para la remoción de arsénico de un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina, analizando la influencia de variables a través de un enfoque experimental y mediante herramientas estadísticas, encontrar las condiciones más favorables para maximizar la remoción del arsénico, contribuyendo al desarrollo de tecnologías limpias , eficientes y rentables para el tratamiento de concentrados .

# **CAPÍTULO I**

## **GENEREALIDADES**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Existe un crecimiento mundial de molibdeno, se registra una expansión en la extracción de este mineral que va asociada al crecimiento de la demandad de cobre, si se toma en consideración que casi dos tercias partes de la producción de molibdeno a nivel global se obtienen como sub producto de la minería del cobre, la demanda propia del molibdeno para la elaboración del acero y otras aleaciones se vienen incrementado en Asia y Europa, esta mayor demanda significa nuevos retos para la producción del concentrado de molibdeno, especialmente en yacimientos con presencia de impurezas, siendo el arsénico uno de los elementos más críticos. La presencia de arsénico en concentrados de molibdeno representa no solo un problema técnico para su posterior procesamiento metalúrgico, sino también un obstáculo comercial, ya que reduce significativamente el valor de venta y puede incluso impedir su exportación por restricciones ambientales internacionales.

Padilla & Alfaro (2009) señalan que el concentrado de molibdeno al provenir de procesos de flotación colectica o selectiva, suelen arrastrar especies arsenicales como la arsenopirita, enargita, tennatita, oropimente, rejalgar o sulfosales asociadas, que no siempre pueden ser eliminadas mediante procesos convencionales. Debido a ello, se requiere aplicar técnicas específicas de purificación para reducir el contenido de

arsénico por debajo de los límites permitidos por la industria, sin afectar significativamente la recuperación de molibdeno.

Una alternativa que ha ganado atención en los últimos años es la lixiviación alcalina, la cual utiliza soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) para disolver selectivamente el arsénico contenido en fases solubles o reactivas. Este proceso se presenta como una alternativa debido a su menor toxicidad comparada con medios ácidos. La falta de conocimiento detallado sobre la interacción de los parámetros limita la aplicación industrial de esta técnica, ya que no se cuenta con una información clara sobre las condiciones óptimas que aseguran la máxima remoción de arsénico con mínimas pérdidas de molibdeno.

Es por ello que surge la incógnita de que la lixiviación no solo disuelve el arsénico, sino que también puede afectar a los elementos valiosos como la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ); generando pérdidas económicas. Por ello es que se plantea evaluar no solo la eficiencia en la remoción de arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno, sino también la selectividad del proceso; es decir su capacidad de disolver selectivamente las especies arsenicales.

A esto se suma la necesidad de considerar la viabilidad económica del proceso; ya que durante la lixiviación alcalina se necesita reactivos, equipos especializados y costos energéticos. Por tanto, es imprescindible analizar si el beneficio económico de obtener un concentrado más limpio sin grandes cantidades de arsénicos justifica dichos gastos.

Frente a esto, se plantea la necesidad de llevar a cabo una investigación que permita determinar los parámetros óptimos de operación en la lixiviación alcalina para la remoción de arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno, comprendiendo las interacciones que existe entre las variables; evaluando la selectividad del proceso sobre el molibdeno y finalmente analizando su viabilidad económica.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema General**

- ¿Cuáles serán los parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Qué interacción existe entre los parámetros operacionales tales como temperatura, concentración de agente lixivante NaOH, tiempo de contacto y agitación; que permita establecer una condición óptima para la remoción del arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina?
- ¿Será viable la lixiviación alcalina con NaOH para remover selectivamente el arsénico en un concentrado bulk de molibdeno sin disolver cantidades significativas de molibdeno?
- ¿Será rentable emplear la lixiviación alcalina para la remoción del arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno?

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La investigación aborda problemáticas en diferentes dimensiones que permiten comprender su relevancia desde los ámbitos científicos, tecnológicos, económicos, sociales y ambientales. La investigación busca aportar al conocimiento técnico de los procesos hidrometalúrgicos aplicados al tratamiento de concentrados de molibdeno con alto contenido de impurezas, contribuyendo al mismo tiempo con la mejora de la calidad de los concentrados y al desarrollo sostenible de la industria minera.

### **1.3.1. Justificación Teórica**

Esta investigación contribuirá al entendimiento de las variables que intervienen en la lixiviación alcalina del arsénico presente en los concentrados de molibdeno, proceso que hasta la actualidad continúa siendo objeto de estudio en la metalurgia extractiva moderna. A pesar que se dispone de información general sobre la disolución de especies arsenicales bajo condiciones alcalinas existen vacíos significativos en la comprensión de las variables que interactúan de manera simultánea para optimizar la remoción de arsénico sin afectar la recuperación de molibdeno. Este estudio se

sustenta en principios termodinámicos y cinéticos de la lixiviación, mediante la identificación de los parámetros se busca establecer modelos predictivos y criterios técnicos que puedan extrapolarse a escalas piloto o industriales. En consecuencia, la investigación fortalece el conocimiento teórico generando las bases científicas para que sirvan como referencia para futuras investigaciones enfocadas en la remoción selectiva de impurezas en concentrados.

### **1.3.2. Justificación Técnica**

En el ámbito técnico, la investigación responde a una necesidad concreta de la industria minera, la optimización del tratamiento de concentrados de molibdeno con un alto contenido de arsénico. La presencia de arsénico en concentrados constituye un desafío operacional y comercial, debido a que este elemento no solo deteriora la calidad, sino que también interfiere en las etapas posteriores de tostación y refinación generando residuos peligrosos y aumentando los costos de tratamiento. Por tal motivo es esencial el desarrollo de un proceso eficiente y selectivo, como la lixiviación alcalina que representa una alternativa viable.

### **1.3.3. Justificación Económica**

La remoción del arsénico de los concentrados de molibdeno mediante lixiviación alcalina representa una oportunidad para incrementar el valor comercial del producto final y reducir penalidades impuestas por compradores. Los contratos de comercialización establecen límites estrictos de impurezas (5000 ppm = 0,5 %), frente a cualquier exceso implica descuentos significativos por tonelada de concentrado. Siendo la lixiviación alcalina un proceso de bajo costo y alta selectividad, mejoraría la rentabilidad. Es de vital importancia optimizar los parámetros de operación ya que minimizamos el consumo de reactivos químicos y energía, reduciendo así los costos operativos. Este estudio busca comprobar que la remoción del arsénico empleando la lixiviación alcalina posee una viabilidad económica.

### **1.3.4. Justificación Ambiental**

El trabajo de investigación posee una justificación ambiental relevante, ya que la lixiviación alcalina constituye un proceso más amigable con el medio ambiente comparado con otros métodos tradicionales de purificación, como la tostación oxidante o el uso de ácidos fuertes. Al emplear el hidróxido de sodio (NaOH) como agente

lixiviante, se evita la generación de gases tóxicos reduciendo el riesgo de emisión de compuestos arsenicales volátiles. El control de condiciones de operación permite obtener soluciones residuales que pueden ser tratados de forma segura mediante neutralización o precipitación controlada, mitigando el impacto ambiental del proceso. En este sentido, el presente trabajo de investigación contribuye al desarrollo de una minería más sostenible, alineada con los principios de producción limpia y gestión responsable de residuos.

#### **1.4. OBJETIVO**

##### **1.4.1. Objetivo General**

- Determinar los parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Establecer la interacción entre los parámetros operacionales tales como temperatura, concentración de agente lixiviante NaOH, tiempo de contacto y agitación; que permita establecer una condición óptima para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina.
- Evaluar la viabilidad de la lixiviación alcalina con NaOH para remover selectivamente el arsénico de un concentrado bulk de molibdeno sin disolver cantidades significativas de molibdeno.
- Analizar la rentabilidad de emplear la lixiviación alcalina para la remoción del arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **2.1.1. Antecedentes Internacionales**

Zhi-xiong et al. (2018) en su artículo, “Eliminación de impurezas metálicas de concentrado de cobre de baja calidad en solución alcalina”, menciona:

Como objetivo evaluar las principales variables como las concentraciones de hidróxido de sodio y el peróxido de hidrogeno, el tiempo de lixiviación, la temperatura y la relación líquido-sólido. Se observó que durante las pruebas existe el inconveniente de que, a temperaturas mayores a 50 °C, el peróxido de hidrógeno pierde su carácter oxidante. Se concluyó que las variables más importantes son la temperatura y la concentración de los agentes lixiviantes como el hidróxido de sodio y el peróxido de hidrógeno. Se logró eliminar el 93,4 % de arsénico en las condiciones de operación de NaOH (1,5 M), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1,0 M), a una temperatura de 50 °C, relación liquido-sólido de 5mL/ g y tiempo de lixiviación de 5 horas.

Tengfei Li et al. (2018) en su artículo, “Lixiviación selectiva de arsénico a partir del concentrado de enargita mediante lixiviación alcalina en presencia de pirita”, menciona:

Como objetivo la lixiviación del concentrado de mineral proveniente de la enargita y la pirita con una solución alcalina únicamente de hidróxido de sodio, por motivo que no es necesario añadir otras especies de sulfuro como sulfuro de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) o hidrosulfuro de sodio ( $\text{NaSH}$ ) debido a que la pirita es una fuente de  $\text{S}^{2-}$ . Se concluyó que las variables que tienen un efectivo significativo son la concentración del  $\text{NaOH}$  y la temperatura; mientras el tiempo de lixiviación y la relación líquido- sólido tienen menor influencia en el porcentaje de disolución del arsénico. Se logró eliminar hasta un 99 % del arsénico en condiciones de hidróxido de sodio (5 M), temperatura de 190 °C, relación líquido-sólido 3mL/g y tiempo de lixiviación de 2 horas.

Yu Zhao et al. (2021) en su artículo, “Revisión sobre la eliminación de arsénico de minerales sulfurados: énfasis en la enargita y la arsenopirita”, menciona:

Como objetivo tiene la evaluación de las diferentes formas que existen para la eliminación del arsénico en diferentes tipos de minerales sulfurados mediante la disolución oxidativa en condiciones ácidas, alcalinas, oxidación a presión y biooxidación. En los diferentes procesos se puede observar que el sulfuro ( $\text{S}^{2-}$ ) tiene un efecto de activación significativo en condiciones hipóxicas (2 % de  $\text{O}_2$  y 98%  $\text{N}_2$ ) en comparación a condiciones óxicas (21 % de  $\text{O}_2$ ), donde se aprecia menor activación debido a que el periodo de reacción del sulfuro en condiciones óxicas es más corto, por la formación de costras de óxido de hierro en las superficies del concentrado. Bajo condiciones hipóxicas se elimina en un 80 % más de arsénico que en condiciones óxicas.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

LLerena (2017) en su tesis, “Eliminación de arsénico desde concentrados de cobre, en minera Nasca-Perú”, menciona:

Como objetivo eliminar el arsénico presente en el concentrado de cobre hasta un límite permisible de los compradores (0,5 % = 5 000 ppm); la alternativa que se plantea es una lixiviación con una solución alcalina de bisulfuro de sodio ( $\text{NaHS}$ ). Las pruebas se realizaron en condiciones de  $\text{pH}=12,5$ ; relación líquido/sólido de 3 mL/g, 50 g/L de  $\text{NaHS}$ , 200 g/L de  $\text{NaOH}$ , motor de la paleta de agitación de 0,5 HP, temperatura a 80 °C; respecto al tiempo de lixiviación se realiza una clasificación de acuerdo al contenido de arsénico donde para valores iniciales de hasta 4 % de

arsénico el tiempo de lixiviación es de hasta 3 horas , para valores iniciales de 10 % de arsénico el tiempo aumenta hasta 6 horas y por último para un contenido inicial de 12 % de arsénico el tiempo es de 10 horas. Se logró reducir a valores 0,2 % -0,5 % de arsénico final en los diferentes casos a distintas concentraciones iniciales de acuerdo al tiempo planteado para cada una de ellas. Se logró una eficiencia máxima de 95,83 %.

Landa (2018) en su tesis “Evaluación de la flotación del mineral de cobre para reducir el contenido de arsénico en concentrados de cobre en la compañía minera Casapalca - Unidad Americana - 2018”, menciona:

Como objetivo la reducción de agentes contaminante como el arsénico y antimonio empleando los reactivos de NaOH y Na<sub>2</sub>S, variando las concentraciones de los reactivos, las revoluciones por minutos de agitación y los tamaños de granulometrías. Se realizaron un total de 36 pruebas con rangos de concentración de NaOH de (1,0 M – 3,5 M) y Na<sub>2</sub>S de (0,5 M – 1,0 M), revoluciones por minutos de agitación de 100 RPM a 500 RPM y tamaños de partículas de 100 um a 37 um. Se uso un concentrado que contenía 3,3 As % donde se logró reducir hasta un 1,5 % en un tiempo de 20 minutos con parámetros de 500 RPM, granulometría de 74 micrones y concentración de reactivos de NaOH 2 M y Na<sub>2</sub>S 1 M. El inconveniente que se presentó es la gran cantidad de experimentos que se desarrollaron y donde no se pudo predecir la influencia de cada factor ni la obtención de una ecuación que nos permita determinar los valores de remoción del arsénico a diferentes parámetros de operación.

Mamani (2024) en su tesis “Análisis químico de concentrados de molibdeno en minera las bambas”, menciona:

La importancia del molibdeno proveniente principalmente de la molibdenita (MoS<sub>2</sub>) con su propiedad altamente hidrofóbica, siendo muy usada en la concentración por medio de la flotación. El uso de molibdeno radica en la fabricación de aleaciones de acero, en la producción de lubricantes y pigmentos; es aquí su importancia que el concentrado de molibdeno no presente contaminantes como arsénico, aceites, insolubles y cobre; después de la concentración prosigue la comercialización con plantas de refinación para obtener el producto final; es aquí donde los contaminantes

ocasionan dificultades en el proceso de fundición o refinación que serán penalizados de acuerdo a la cantidad que excede respectivamente.

### **2.1.3. Antecedentes Locales**

Carrasco (2023) en su artículo, “Empresa minera invertirá USD 42 millones en exploraciones greenfields para importantes proyectos en seis regiones del Perú”, menciona:

Que la empresa minera Minsur que tiene tres operaciones en Perú: mina San Rafael (tercer mayor productor de estaño a nivel mundial), Pucamarca (mina de oro) y por último la planta de fundición – refinación de Pisco. Actualmente dicha empresa minera realizó una inversión de 42 millones de dólares destinados a exploraciones en todo el Perú; entre ellas Ayacucho. Uno de los proyectos más relevantes es Pucaccasa distrito de Chiara - Provincia de Huamanga. Esta exploración está siendo desarrollada en conjunto con Newmont Perú, buscando identificar y evaluar la presencia de un pórfido de cobre y molibdeno, minerales estratégicos para la industria energética e industria tecnológica. Los trabajos que se realizaron fueron preliminares de exploración y análisis geológicos.

## **2.2. EL MOLIBDENO**

El molibdeno es un elemento metálico que pertenece al grupo de los metales de transición. Debido a sus propiedades físico-química, es considerado un metal estratégico para diversas aplicaciones en la industria, medicina y agricultura. Fue descubierto por Carl Wilhelm en 1778 y su forma pura fue obtenida en 1781 por Peter Jacob Hjelem. En la industria se emplea para fabricar aceros resistentes, catalizadores, lubricantes y aleaciones especiales; en la medicina es esencial para ciertas enzimas que facilitan el metabolismo y por último para la agricultura es un micronutriente vital para las plantas ayudando a la fijación de nitrógeno y absorción de nitrato (Mamani,2024).

### **2.2.1. Historia del Molibdeno**

El molibdeno es un metal que ha adquirido una creciente importancia en el ámbito industrial. Su historia se remonta a dos científicos, Carl Wilhelm Scheele y Peter Jacob Hjelm. En el año 1778, Scheele logró que la molibdenita ( $\text{MoO}_2$ )

reaccionara con ácido nítrico, lo que resultó en la obtención del óxido de molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ). Posteriormente, en 1781, Hjelmskiel aisló el metal calentando el óxido junto con carbón vegetal en aceite de linaza. Aunque el producto obtenido no era puro, ya que contenía carburo de Mo, fue en 1817 cuando Jons Jacob Berzelius logró separar el metal puro al reducirlo con hidrógeno el trióxido (Gutierrez,2019).

El material resultante se utilizó de forma experimental como un reemplazo del tungsteno en herramientas de acero. La primera vez que se documentó el uso del Mo como aditivo en acero fue en una placa de armadura en Francia. Más tarde, el químico francés Henri Moissan logró producir metal de 99,98 % de pureza a partir de la reducción carbotérmica de óxido en un horno eléctrico. A este químico se le atribuye la determinación de su peso atómico junto a otras cualidades físicas y químicas del Mo (Obregón & Peña ,2022).

La producción de Mo a nivel industrial comenzó en la mina Knaben, hacia finales del siglo XVIII. Debido al bajo valor comercial del metal en esa época, la producción de la mina fue mínima hasta alrededor de 1880. Hacia finales del siglo XIX, varios yacimientos de Mo en Australia y Estados Unidos comenzaron a ser explotados. La Primera Guerra Mundial incrementó la necesidad de Mo, ya que era un sustituto del tungsteno en aceros de alta velocidad y se utiliza como elemento aleante en aceros para armamento. La finalización de la guerra en 1918 impactó negativamente el mercado del Mo, debido a la reducción en la fabricación de armamentos y otros materiales bélicos (Gupta,1992).

Así, el periodo entre 1912 y 1920 fue una etapa de declive para la producción de Mo; no obstante, durante esos años se innovó en el proceso de la flotación para extraer la molibdenita y se emprendieron investigaciones intensivas sobre aplicaciones pacíficas del Mo. Estos esfuerzos facilitaron su uso en tiempos de paz, principalmente como aditivo aleante en aceros y hierro (Fe) fundido. Como resultado, la demanda aumentó y superó los niveles registrados durante los años de guerra.

Tras el conflicto bélico, surgieron nuevas aplicaciones tecnológicas para el Mo y sus aleaciones. Los avances en usos pacíficos representaron un fenómeno, y a partir de ahí el uso militar empezó a disminuir. Actualmente, el Mo es un elemento estratégico y significativo en la economía (Obregón & Peña ,2022).

**Tabla 1***Propiedades Físicas del Molibdeno.*

Propiedad	Valor	Unidad
Símbolo químico	Mo	
Número atómico	42	
Masa atómica	95,95	
Densidad	10,28	g/cm <sup>3</sup>
Punto de fusión	2623	°C
Punto de ebullición	4639	°C
Estructura cristalina	Cúbica centrada en el cuerpo	

*Nota.* Propiedades físicas del molibdeno. Adaptado de Química de los elementos (Greenwood & Earnshaw,2012)

### 2.2.2. El molibdeno en la Naturaleza

Los depósitos de molibdeno están muy relacionados con las actividades magmáticas y tectónicas. Por lo general, se forman en áreas donde se producen montañas y en los límites convergentes de las placas tectónicas, donde por los magmas ricos en sílice ayudan a desplazar y acular el Mo. Esta situación explica la fuerte relación del Mo con grandes cinturones de mineralización, como los de la Cordillera de los Andes, Montañas Rocosas en América del Norte y varias regiones en Asia Central (Seedorff et al.,2005).

En términos más amplios, los depósitos de molibdeno no son uniformes, sino que presentan diferentes composiciones geológicas, que abarcan grandes sistemas diseminados en formaciones rocosas intrusivas, cuerpos localizados en contacto metamórficos, estructuras de fisura y acumulaciones en secuencias sedimentarias. La presencia de estos entornos muestra la habilidad del molibdeno para acumularse bajo diversas condiciones geodinámicas, lo que lo convierte en un recurso global.

**Tabla 2***Clasificación y características de los depósitos de molibdeno*

<b>Tipo de deposito</b>	<b>Características geológicas principales</b>	<b>Minas representativas</b>
Pórfido de molibdeno	Asociada a intrusivos graníticos de alta sílice; mineralización hipogénica en stockworks de cuarzo.	Climax (EE. UU.) Henderson (EE. UU.)
Pórfido cuprífero con molibdeno	Grandes depósitos de cobre; con molibdeno de coproducto.	Chuquicamata (Chile) Toquepala (Perú)
Escarm de molibdeno	Contactos intrusivos con calizas; mineralización localizada.	Knaben (Noruega)
Pórfido disseminado	Molibdeno distribuido en disemanciones fian dentro de cuerpos in	Alta, Utah (EE. UU.)
Depósitos de contacto metamórfico	Asociados a intrusivos en rocas carbonatadas con metamorfismo de contacto.	México
Depósitos de vena - fisura	Mineralización en vetas hidrotermales, a menudo en zonas de fractura o cizalla	Colorado (EE. UU.)
Pegmatitas y diques de aplita	Molibdeno en cuerpos pegmáticos y filones de aplita asociados a intrusivos ácidos	Depósitos menores en Canadá y Rusia.
Depósitos en rocas sedimentarias	Molibdeno asociado a lutitas negras o estratos ricos en materia orgánica; a veces ligado a uranio o vanadio.	Colorado Plateau (EE. UU.)

*Nota.* Características geológicas de los principales depósitos del Molibdeno. Adaptado de Metalurgia extractiva del Molibdeno (Gupta,1992).

**Figura 1***Principales depósitos de molibdeno*

*Nota.* En la figura se aprecia los principales depósitos de molibdeno distribuidos en el mundo. Adaptado de Metalurgia extractiva del Molibdeno (Gupta,1992).

### 2.2.3. Principales minerales de Molibdeno

El molibdeno no se encuentra en forma pura en la naturaleza, ya que se encuentra químicamente junto a otros elementos. Su presencia es escasa en la corteza terrestre ya que por cada tonelada solo se encuentra entre 1 o 2 gramos de molibdeno. Se encuentra en la naturaleza junto a varios minerales, los cuales influyen de manera significativa en los métodos de extracción y su posterior tratamiento; entre los principales minerales se encuentran la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), la powellita ( $\text{CaMoO}_4$ ), la ferrimolibdenita ( $\text{FeMoS}_2$ ) y la wulfenita ( $\text{PbMoO}_4$ ), que son sulfuros y molibdatos de mayor interés económico.

#### 2.2.3.1. Molibdenita ( $\text{MoS}_2$ )

Es el principal y más abundante mineral de molibdeno. De naturaleza disulfuro, presenta una estructura laminar similar al grafito, lo que le confiere propiedades de lubricidad y facilita su liberación durante la molienda. Su relevancia radica en que más del 90 % del molibdeno mundial se obtiene a partir de este mineral (Gupta,1992). Desde el punto de vista de procesamiento, la molibdenita responde favorablemente a la flotación selectiva y constituye el punto de partida para la producción de trióxido de molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ).

#### Figura 2

*Mineral de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ )*



*Nota.* Se aprecia el mineral de molibdenita en su forma pura, se caracteriza por el color gris oscuro. Adaptado de Minerales globales (Minerales Globales,2023).

### 2.2.3.2. Powellita ( $\text{CaMoO}_4$ )

Se encuentra en menor cantidad, su principal característica es la presencia de calcio de la scheelita, encontrándose en ambientes hidrotermales y de contacto metamórfico. Este mineral es relevante por su carácter secundario y por ser indicador de condiciones específicas de oxidación en los sistemas mineralizados. Industrialmente, su aprovechamiento es limitado ya que se requiere técnicas de lixiviación y no responde con facilidad a la flotación convencional. Sin embargo, constituye una fase de interés en estudios geometalúrgicos para comprender el comportamiento del molibdeno en ambientes oxidados (Fang & Gu,2005).

#### Figura 3

*Mineral de Powellita ( $\text{CaMoO}_4$ )*



*Nota.* Se aprecia el mineral de powellita en su forma pura, se caracteriza por su gran parecido al cuarzo, pero más amarillento. Adaptado de Minerales globales (Minerales Globales,2023).

### 2.2.3.3. Ferrimolibdenita ( $\text{FeMoO}_4$ )

Es un mineral menos común, identificada en ambientes de alteración hidrotermal avanzada. Su importancia radica en la presencia simultánea de hierro y molibdeno, lo que genera retos en la separación y purificación del mineral. Para el procesamiento se requiere aplicar técnicas de beneficio específicas, ya que el hierro puede incorporarse como impureza indeseada en productos intermedios, comprometiendo la calidad del trióxido de molibdeno y del ferromolibdeno (Habashi,1997).

#### **Figura 4**

*Mineral de ferrimolibdenita ( $\text{FeMoO}_4$ )*



*Nota.* Se aprecia el mineral de ferrimolibdenita en su forma pura, se caracteriza por el color gris oscuro muy parecido a la molibdenita radica su diferencia en el color plomo en su interior debido al hierro. Adaptado de Minerales globales (Minerales Globales,2023).

#### **2.2.3.4. Wulfenita ( $\text{PbMoO}_4$ )**

Es un molibdato de plomo que se forma principalmente en la zona de oxidación de depósitos de plomo y molibdeno. Se reconoce por sus cristales tabulares de color amarillo anaranjado. Aunque no es una fuente primaria de molibdeno, su presencia es significativa en estudios mineralógicos e incluso son recolectadas como un mineral de interés para coleccionistas, además de ser indicador geoquímico de procesos de supergénesis (Mindat,2023).

**Figura 5**

*Mineral de wulfenita (PbMoO<sub>4</sub>)*



*Nota.* Se aprecia el mineral de wulfenita en su forma pura, se caracteriza por el color marrón oscuro debido a la presencia de plomo. Adaptado de *Minerales globales* (Minerales Globales,2023).

**2.2.4. Propiedades físicas del Molibdeno**

El número atómico del Molibdeno es 42, teniendo un peso atómico de 95,95 y se encuentra en el grupo seis de la tabla periódica, ubicado en la columna vertical entre el cromo y el tungsteno a la fila horizontal entre el niobio y el tecnecio.

En su forma pura, el molibdeno es un metal que se puede moldear y tiene un color gris brillante, lo que permite que sea pulido y triturado sin problemas. El molibdeno tiene una excelente conductividad térmica y un bajo calor específico, lo que le permite calentar o enfriar rápidamente, provocando menos tensiones térmicas en comparación con otros metales. Su conductividad eléctrica es bastante alta, alcanzando aproximadamente un tercio de la del cobre, lo que lo hace ideal para usos eléctricos. Posee un alto módulo de elasticidad elevado (Gupta,1992).

**Tabla 3***Propiedades físicas del molibdeno.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Masa atómica	95,94	uma
Punto de fusión	2890	K
Punto de ebullición	4485	K
Densidad	10220	Kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica	138,00	J/ms°C
Conductividad eléctrica	192,30	(mohm.cm) <sup>-1</sup>
Calor específico	254,98	J/kg°K
Calor de fusión	27,60	kJ/mol
Calor de vaporización	590,00	kJ/mol
Calo de atomización	658,00	kJ/mol
Radio atómico	1,39	Å
Radio covalente	1,29	Å
Radio iónico	Mo <sup>+3</sup> = 0,69	Å
	Mo <sup>+4</sup> = 0,64	Å
	Mo <sup>+6</sup> = 0,62	Å
<b>Volumen atómico</b>	9,4	cm <sup>3</sup> /mol
<b>Polarizabilidad</b>	12,8	Å

*Nota.* Principales propiedades físicas del molibdeno. Adaptado de Análisis químico de concentrados de molibdeno en minera las bambas (Mamani,2024).

### **2.2.5. Propiedades químicas del Molibdeno**

El molibdeno se mantiene estable en el aire a temperatura ambiente, pero una de sus limitaciones es que no resiste bien la oxidación a temperaturas elevadas. A partir de los 500 °C, se presenta una ligera oxidación, generando trióxido de molibdeno volátil (Peña,2007).

Siendo el molibdeno completamente inerte en entornos de hidrógeno, argón y helio. En atmosferas reducidas, el Molibdeno tiene buena resistencia a los sulfuros de hidrógeno en altas temperaturas, forman una capa fina de sulfuro sobre el metal. Sin embargo, en un entorno oxidante, los gases que contienen azufren corroen el metal de manera rápida (Obregón & Peña,2022).

**Tabla 4***Propiedades químicas del molibdeno.*

Propiedad	Valor	Unidad
Potencial normal de reducción	+0,11	V H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>   Mo solución ácida
Estados de oxidación	-2,-1, +1, +2, +3, +4, +5, +6	
1° energía de ionización	684,9	kJ/mol
2° energía de ionización	1588,2	kJ/mol
3° energía de ionización	2620,5	kJ/mol
Afinidad electrónica	72	kJ/mol
Electronegatividad	2,16	

*Nota.* Principales propiedades químicas del molibdeno. Adaptado de Análisis químico de concentrados de molibdeno en minera las bambas (Mamani,2024).

## **2.3. EXPLOTACIÓN Y PROCESAMIENTO DEL MOLIBDENO**

### **2.3.1. Minado**

El proceso de obtención del molibdeno inicia con la explotación minera del yacimiento, etapa fundamental para garantizar un suministro constante y homogéneo de mineral hacia la planta concentradora. En la minería del molibdeno, ya sea como mineral primario (molibdenita) o como subproducto de la explotación de pórfidos cúpricos requieren de técnicas de extracción altamente mecanizadas con el fin de asegurar volúmenes adecuados de producción, teniendo un control en las leyes y así obtener una estabilidad en el proceso metalúrgico (Bai et al., 2019).

En el minado se involucra unas secuencias de operaciones unitarias que permiten extraer y acondicionar el mineral para su posterior procesamiento metalúrgico, forman la base del “mine to mill” y comprenden las actividades de exploración, control de ley y la entrega de mineral a la planta de beneficio (perforación, tronadura, carguío, transporte, manejo de rom y almacenamiento). La calidad y el control en cada unidad impacta en la eficiencia del chancado, molienda y recuperación metalúrgica.

#### **2.3.1.1.Perforación**

La perforación constituye la etapa inicial para la explotación del molibdeno, su finalidad es crear espacios cilíndricos en la roca que permitan su posterior carga con explosivos.

Este proceso requiere el uso de equipos de alta complejidad, tales como perforadoras rotarias y rotopercutoras, seleccionadas de acuerdo a los requerimientos y características litológicas y la dureza del material rocoso. La eficiencia de la perforación se mide en función de los parámetros como el diámetro del taladro, la profundidad, el ángulo y la densidad de malla; las cuales determinan la calidad de la fragmentación en el proceso de la voladura (Chavez,2019).

#### **2.3.1.2.Voladura**

Es la operación destinada a la fractura del material rocoso mediante el uso controlado de explosivos, con el objetivo de reducir la roca a fragmentos de tamaño transportables. Se emplean emulsiones explosivas y agentes de voladura de alta energía, acompañados de sistemas de iniciación electrónica que permiten un control milimétrico del retardo. Este control es esencial, ya que la distribución granulométrica del material volado influye directamente en la eficiencia del chancado y molienda (Chiappetta,2019).

#### **2.3.1.3.Carguío**

Comprende la transferencia del material fragmentado (mena y ganga), hacia los equipos de transporte. Esta operación se ejecuta con palas hidráulicas, palas eléctricas de cable o cargadores frontales de alta capacidad. La selección del equipo de carguío depende de factores como la granulometría y la cantidad de material fragmentado. El objetivo es garantizar una tasa de alimentación continua y uniforme hacia los camiones de acarreo, minimizando los tiempos muertos y optimizando el factor de utilización de la flota minera (Chavez,2019).

#### **2.3.1.4.Acarreo**

Corresponde al transporte del material fragmentado desde el frente de minado hasta los puntos de descarga, ya sea en los botaderos de gangas o en las

chancadoras primarias. En el caso de yacimientos de molibdeno debido a su baja ley de mineral, se emplean camiones mineros de gran capacidad (400 Toneladas), cuya eficiencia depende de variables como la distancia de acarreo, pendientes de rampas, resistencia al rodado y ciclos de carguío – descarga. La optimización de esta operación se logra mediante sistemas de despacho asistidos por software, los cuales reducen los costos operativos y tiempos muertos (Samanta & Sarkar,2014).

### **2.3.2. Conminución**

La conminución es el conjunto de operaciones unitarias que reduce el tamaño del mineral desde la roca explotada hasta partículas lo suficientemente pequeñas para liberar los minerales de interés. En el caso del molibdeno esto implica etapas de chancado, molienda gruesa, cribado y remolienda del concentrado intermedio. Esta etapa es de especial atención ya que influye directamente en la liberación de la mena, generación de finos, consumo energético y eficiencia de recuperación (Wills & Finch, 2022).

#### **2.3.2.1.Chancado**

El chancado o trituración es la primera etapa de reducción de tamaño, se reduce bloques grandes de mineral a fragmentos más pequeños, adecuados para la alimentación de molinos y así minimizar costos energéticos, desgastes y fallas mecánicas, al mismo tiempo que se prepara el mineral para liberar parcialmente la molibdenita durante etapas posteriores (Gupta & Yan,2020).

Los mecanismos principales de chancado son por compresión, impacto, cizallamiento y en algunos equipos una combinación de estos. La elección del tipo de chancadora depende de la dureza de la roca, del tamaño máximo de bloque, granulometría requerida para la alimentación a molino, costo de capital y de la disponibilidad energética.

#### **2.3.2.2.Molienda**

Se encarga de reducir aún más el tamaño de las partículas que ya fueron chancadas previamente, hasta el tamaño necesario para liberar la particuladas deseadas, proporcionando superficie adecuada para la flotación y lograr la granulometría óptima para los reactivos de flotación. Los mecanismos son

principalmente impacto, abrasión, cizallamiento, desgaste entre partículas y medios de molienda (González et al.,2022).

Los principales tipos de molinos comunes son los molinos de barras, molinos de bolas, molinos semiautógenos (SAG), molinos autógenos (AG), molinos de rodillos, su selección depende de la granulometría deseada, dureza del mineral, requerimiento de finura, etc.

### **2.3.2.3. Clasificación**

El cribado tiene como objetivo separar partículas por tamaño después del chancado o molienda, se clasifica las partículas que ya son suficientemente finas de las que aún falta reducir su tamaño. Las partículas suficientemente finas se dirigen a las siguientes etapas que viene a ser de la flotación, en el caso de partículas más gruesas se devuelve al circuito para molerlas aún más. Esto permite controlar el tamaño del producto final, evitando la sobremolienda y mejorar la eficiencia de los reactivos en la flotación (Noble & Van de Meer,2020).

Las ventajas que se tienen por el uso de cribas tanto en chancado y en molienda radica en que incrementan la capacidad volumétrica de las chancadoras al remover los finos y dar espacio al material fresco aumentando el tonelaje a procesar, en el caso de los molinos controlan los finos que no tienen posibilidades de ser más molidos y evitar mayor desgaste de los medios de molienda.

### **2.3.2.4. Remolienda**

Es una operación unitaria que se aplica en etapas intermedias en el procesamiento de minerales, posteriormente a una concentración primaria. Se busca separar las partículas que permanecen atrapadas en matrices de ganga para obtener niveles de purezas superiores debido a la liberación mineralógica fina; se mejora la separación mediante la reducción controlada dentro de un rango óptimo para un adecuado funcionamiento de colectores y espumantes durante la flotación de limpieza (Rahman et al.,2021).

En la actualidad la remolienda constituye una etapa clave, cuyo propósito no es simplemente reducir tamaño, sino asegurar la liberación mineralógica necesaria para obtener un concentrado de alta pureza. El avance tecnológico empleando los molinos

verticales han permitido mejorar significativamente la eficiencia energética y la selectividad en la liberación, ninguna operación moderna podría alcanzar estándares comerciales sin un circuito de remolienda.

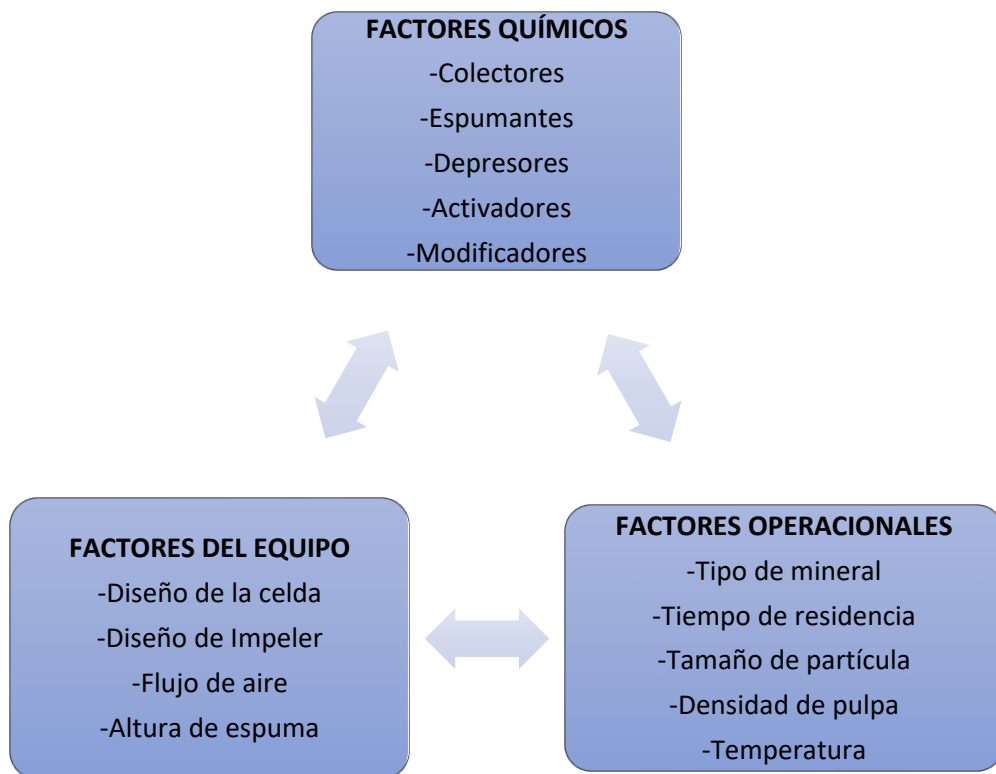
### **2.3.3. Flotación**

La flotación es un proceso industrial ampliamente utilizado en la separación selectiva o concentración físico- química de minerales valiosos con respecto a otros minerales de menor interés, depende principalmente de la diferencia en la hidrofobicidad de partículas minerales, para que una partícula sea flotada tiene que adherirse selectivamente a burbujas de aire, se forma burbuja-partícula asciende a través de una pulpa (Lobos, 2015).

La flotación es un proceso complejo que incluye interacciones físicas y químicas, por lo cual existe un gran número de variables que afectan la eficiencia; consideran que existen al menos 100 variables que afectan el proceso de flotación, en la actualidad se representa la flotación como un sistema triangular interactivo que incluye factores químicos, operacionales y referentes al equipo (Woods,2003).

**Figura 6**

*Principales factores que afectan el proceso de flotación*



*Nota.* Principales factores que afectan el proceso de flotación. Adaptado de Análisis estadístico y experimental de parámetros involucrados en la flotación selectiva de molibdeno en minería Los Pelambres (Ladrón de Guevara,2016).

En la naturaleza pocos minerales como: el talco, sulfuros, grafito, carbón y molibdenita, presentan una hidrofobicidad natural; por lo que puedan flotar directamente. Sin embargo, la mayoría de los minerales son hidrofílicos, de manera que es necesario añadir químicos para generar una superficie hidrofóbica. Dichos químicos llamados colectores.

### **2.3.3.1.Reactivos Químicos en la Flotación**

Los reactivos de flotación son sustancias químicas que promueven, modifican e intensifican las condiciones óptimas de este mecanismo físico-químico de la flotación y con lo cual llevan a cabo su mejor funcionamiento. Los reactivos más utilizados en la flotación son el colector, espumante, modificador, depresores y dispersantes.

### **a) Colector**

Son considerados los reactivos de mayor relevancia, ya que determinan el grado de hidrofobicidad de la superficie mineral. Su estructura se integra por un extremo polar y otro apolar, el extremo polar se adsorbe en las superficies de la partícula valiosa y el extremo apolar queda orientado hacia afuera de la partícula generando un recubrimiento hidrofóbico. Sin embargo, en la flotación del molibdeno se observa un fenómeno singular ya que la molibdenita posee una hidrofobicidad natural, lo que reduce la necesidad de colectores adicionales. Para mejorar su flotabilidad se adiciona colectores orgánicos resulta beneficioso (Herrera-Urbina,2022).

### **b) Espumante**

Los reactivos espumantes son agentes tensoactivos que tienen la función de mejorar la estabilidad de la espuma, lo que hace que puedan ser removidos antes que las burbujas coalezcan, reducen el tamaño de burbuja y con ello generan un aumento del área superficial. Por consecuencia a estas causas, se produce un menor tiempo de inducción (adhesión partícula-burbuja) (Arias,2019).

### **c) Depresores**

Cumplen la función de modificar la superficie de los minerales no deseados, volviéndolos hidrofílicos y así poder obtener un concentrado de alta pureza inhibiendo la flotación de sulfuros y solo permitiendo la flotación del mineral deseado, los mecanismos de depresión no solo dependen de los reactivos químicos sino también del potencial electroquímico y del pH, que condicionan la estabilidad de los complejos (Yang et al., 2021).

### **d) Dispersantes**

Son usados en menor proporción, también conocido como activadores pues incrementan la flotabilidad del mineral en superficies parcialmente oxidadas, ayudando a controlar la interacción entre partículas finas, reduciendo así los fenómenos de aglomeración o recubrimiento no deseado (Zhang et al,2023).

### **2.3.3.2.Celdas de Flotación**

Las celdas de flotación constituyen reactores hidrodinámicos en los cuales interactúan fases sólidas (minerales), líquidas (agua y reactivos disueltos) y gaseosa (aire). Cumplen la función de favorecer el contacto y adhesión selectiva de partículas hidrofóbicas a las burbujas de aire, mientras que las partículas hidrofílicas permanecen en la pulpa y se descartan como relaves (Wills & Finch,2022).

El desempeño de una celda depende de tres factores fundamentales:

- Generación y dispersión de burbujas.
- Contacto y colisión burbuja-partícula.
- Transporte de agregados burbuja-partícula a la espuma.

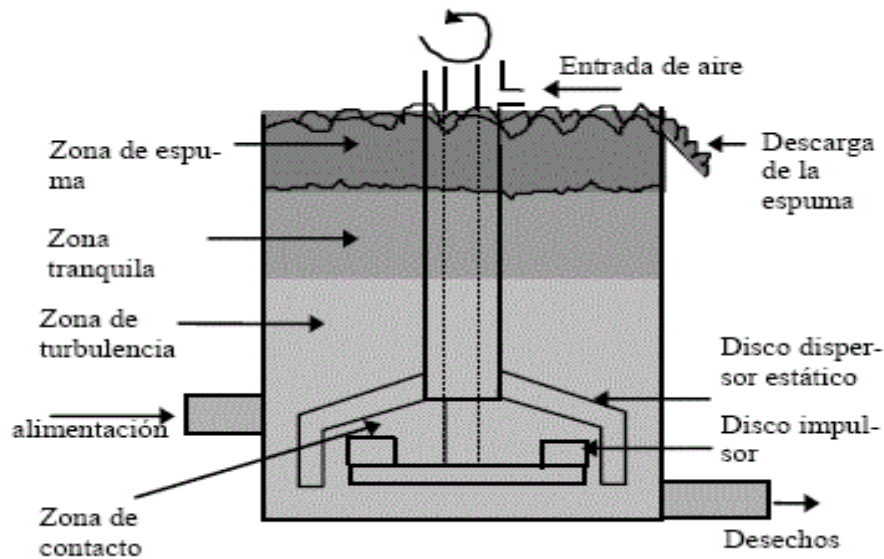
Las celdas de flotación, mediante sus diferentes configuraciones y principios de funcionamiento, permiten lograr este equilibrio entre recuperación y pureza. Existen dos grandes tipos de celdas de flotación, las celdas mecánicas y las celdas neumáticas.

#### **a) Celdas mecánicas**

Se caracterizan por ser un equipo agitado mecánicamente, en donde la generación de burbujas se produce por dispersión mecánica del aire que llega a la zona entre impulsor (rotor) y el estabilizador (difusor). En la mayoría de los equipos este aire llega a presión desde un compresor, pero en algunos casos existe un mecanismo de succión. El aire es alimentado por el eje del impulsor y se disgrega en burbujas en el fondo de la celda donde se produce colisión partícula-burbuja (Carvallo,2015).

**Figura 7**

*Fundamento de operación de una celda de flotación mecánica.*



*Nota.* Fundamento de operación de una celda de flotación mecánica. Adaptado de Desarrollo de dos nuevos prototipos de celdas de flotación en la universidad autónoma de San Luis Potosí-México (Pérez, J. & Gómez, M.,2004).

Esto tipo de celdas resultan especialmente útiles en las etapas iniciales de flotación donde el objetivo prioritario es maximizar la recuperación del mineral valioso, aún a costa de arrastrar ciertos contaminantes.

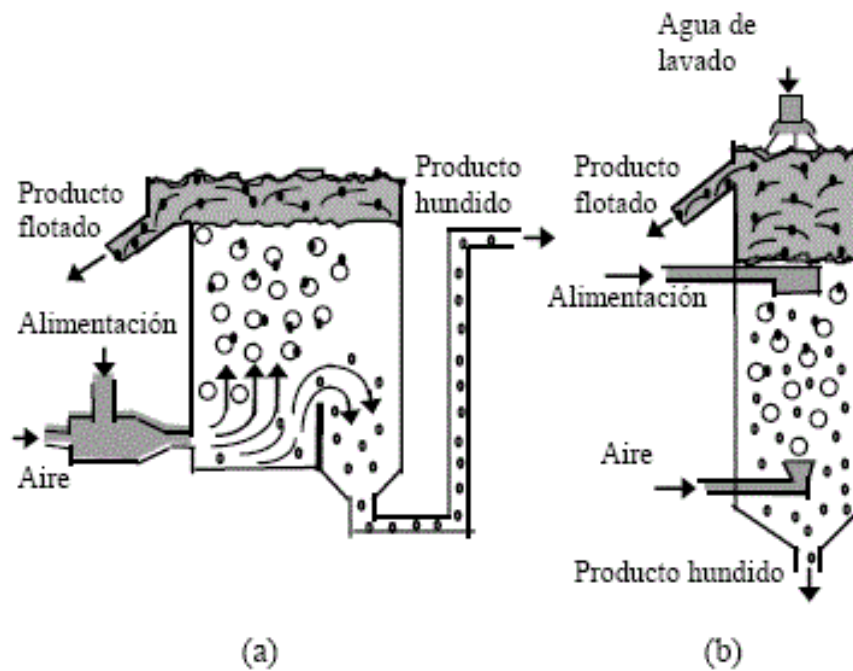
### **b) Celdas Columnas**

Las celdas columnas representan una innovación significativa dentro de la ingeniería de la flotación, ya que introducen un diseño radicalmente distinto al de las celdas mecánicas convencionales. Mientras que las celdas mecánicas se basan en la agitación forzada por un rotor- estator, las columnas operan bajo un principio de flujo de contra corriente que maximiza la probabilidad de interacción entre burbujas y partículas (Wang et al.,2021).

Una celda columna es un reactor vertical de gran altura, donde la pulpa alimentada se desplaza de manera ascendente con el aire inyectado en la base, permitiendo que las partículas hidrofóbicas tengan múltiples oportunidades de colisionar y adherirse a las burbujas, la presencia de agua de en la parte superior

arrastra y elimina partículas que pudieran haber quedado atrapadas en la espuma mejorando la selectividad (Castro & Gaete,2021).

**Figura 8**  
*Fundamento de operación de celdas neumáticas*



*Nota.* Fundamento de operación de las celdas neumáticas a) Celda Davera y b) Celda Columna. Adaptado de Desarrollo de dos nuevos prototipos de celdas de flotación en la universidad autónoma de San Luis Potosí-México (Pérez, J. & Gómez, M.,2004).

### 2.3.3.3.Circuitos de flotación

La flotación es un proceso altamente secuencial, en el cual cada etapa cumple un rol específico para lograr la eficiencia global del sistema. Se busca maximizar la recuperación del mineral valioso y a la vez alcanzar la selectividad requerida y así obtener un concentrado de alta pureza, esto se logra gracias a una red de operaciones interconectadas que recirculan las corrientes mediante circuitos de recuperación y limpieza (Feng et al.,2021).

El circuito Rougher se orienta a la recuperación masiva del mineral valioso. El circuito Cleaner se concentra en mejorar la pureza del concentrado, eliminando contaminantes y ganga arrastrada, mientras que el Scavenger cumple la función de

rescatar partículas del mineral valioso que permanecen en las colas, evitando pérdidas.

#### **a) Circuito Rougher**

Constituye la primera etapa crítica en la flotación, su propósito principal es capturar la mayor cantidad posible de partículas de la mena, si dar prioridad a la pureza del concentrado obtenido. Se busca la recuperación masiva del mineral valiosos dado que los concentrados serán sometidos posteriormente a procesos de limpieza y enriquecimiento (Wang et al.,2020).

En el circuito Rougher, la pulpa proveniente de la molienda se acondiciona con los reactivos (espumante y colector) para asegurar una adecuada adhesión de las partículas a las burbujas de aire; el único problema es que el concentrado Rougher suele contener impurezas significativas, sin embargo, en los siguientes circuitos se realizará la limpieza.

#### **b) Circuito Cleaner**

Representa la etapa central del proceso de flotación ya que tiene como objetivo la obtención de un concentrado de alta pureza. Esta etapa tiene una relevancia estratégica, ya que de ella depende la calidad final del producto comercial debe cumplir con especificaciones de pureza. El circuito Cleaner se orienta a la selectividad, es decir a la capacidad del proceso para diferenciar y separar con eficacia el mineral deseado (Feng at al., 2021).

Se busca la eliminación progresiva de impurezas mediante sucesivas etapas de flotación, actuando como un filtro selectivo en el que el concentrado inicial se depura progresivamente permitiendo así alcanzar la ley final deseada, suelen recircularse hacia Rougher los relaves que se obtienen del circuito cleaner y así evitar las pérdidas de ganga (Xie et al.,2021).

#### **c) Circuito Scavenger**

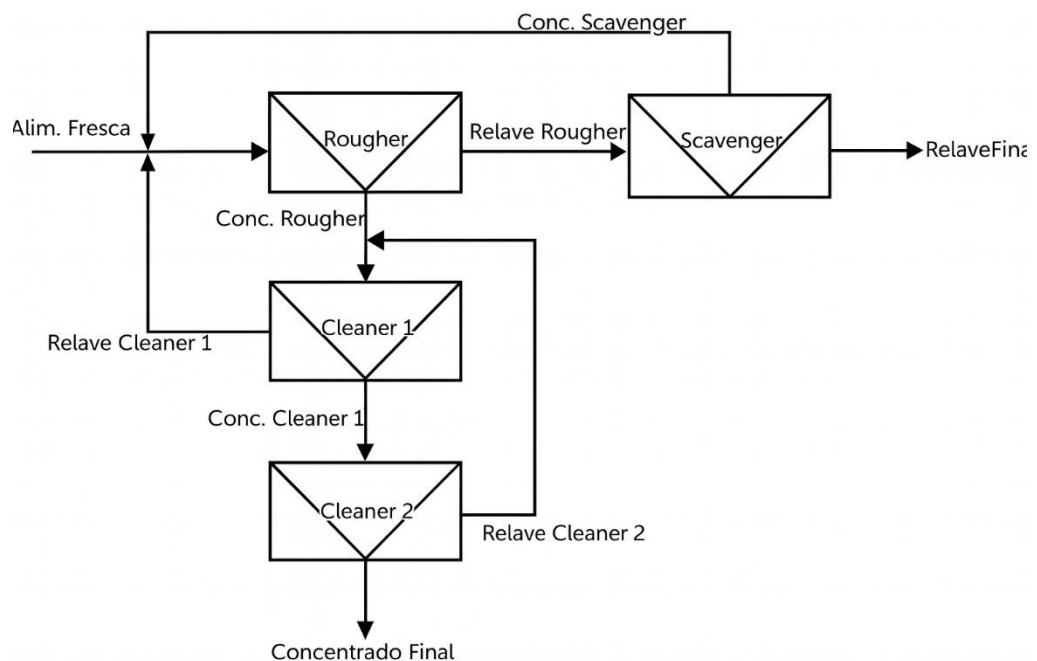
Constituye la etapa final dentro del esquema de flotación, el circuito Scavenger cumple el rol de recuperador del residual busca recuperar el mineral valioso de los relaves previamente obtenidos, ya que en esta etapa no presenta altos valores de

pureza cumple la función de reincorporar fracciones del mineral deseado que de otro modo se perderían. Es una recirculación que aumenta la eficiencia (Peng et al., 2022).

El circuito Scavenger recibe la alimentación de los relaves provenientes del circuito Rougher, estos relaves aun contienen pequeñas fracciones del mineral deseado, bien sea porque las partículas son demasiados finas o porque no tuvieron el contacto efectivo con las burbujas. Se enforca en aumentar la probabilidad de capturar estas partículas residuales bajo condiciones de operación que aumenten el número de colisiones y la eficiencia de adhesión partícula – burbuja (Xie et al.,2023).

**Figura 9**

*Circuito de flotación recomendado para una mayor recuperación*



*Nota.* Circuito de flotación recomendado para una mayor recuperación. Adaptado de Análisis estadístico y experimental de parámetros involucrados en la flotación selectiva de molibdeno en minería Los Pelambres (Ladrón de Guevara,2016).

### 2.3.4. Filtrado

La filtración es la principal etapa de deshidratación mecánica del concentrado previamente flotado que tienen como propósito extraer el máximo contenido de agua posible mediante las fuerzas de presión o vacío, obteniendo un “cake” con contenido de humedad de alrededor 7,0 %. Las tecnologías comunes incluyen filtros prensa,

filtros de tornillo, filtros de banda, filtros de tambor y filtros al vacío horizontales. La elección depende de la granulometría, naturaleza de las partículas, estabilidad del cake, requerimientos finales de humedad y criterios económicos (Chen et al.,2021).

### **2.3.5. Secado**

Tras el filtrado, el concentrado aún contiene humedad que normalmente se reduce a 3,0 % mediante procesos térmicos controlados. El secado tiene por objetivo disminuir el contenido de humedad a niveles compatibles con el transporte y almacenamiento, estabilizar el concentrado frente a las reacciones de oxidación y dar una continuidad a la cadena logística durante el transporte del concentrado. Las tecnologías incluyen secadores rotatorios, secadores de lecho fluidizado, cámaras de secado por aire caliente y secadores de tambor; cuya selección obedece a criterios de capacidad, costo energético y sensibilidad del material a la temperatura (Chen et al.,2021).

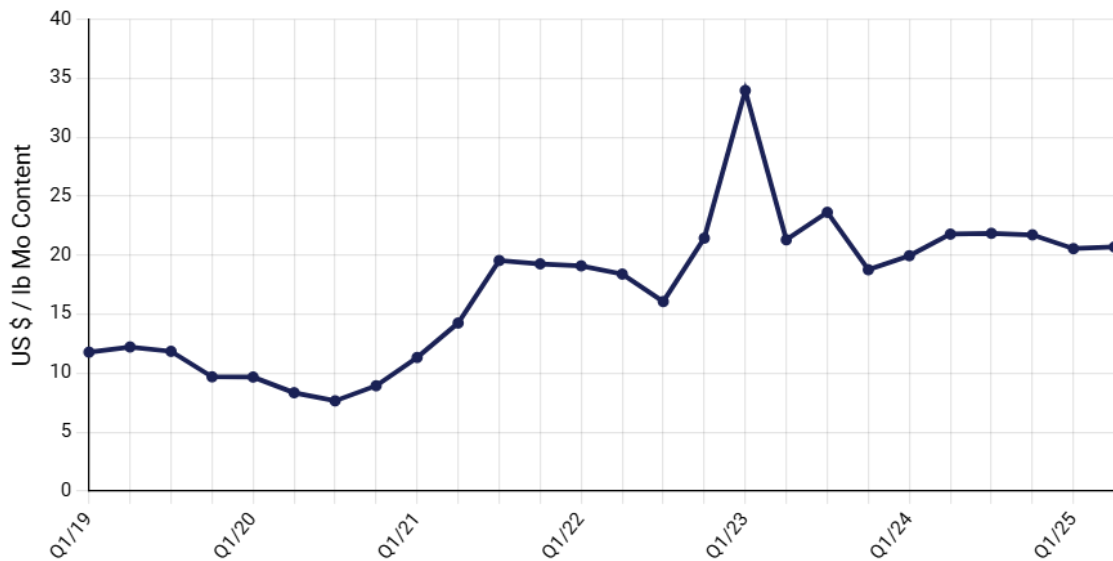
## **2.4. CONCENTRADO DE MOLIBDENO Y SU COMERCIALIZACIÓN**

### **2.4.1. Mercado del concentrado de molibdeno**

El molibdeno ha ganado crecientemente relevancia en el mercado global, tradicionalmente valorado por su resistencia en la fabricación de aceros especiales, pero hoy en día el molibdeno también es clave en el uso de motores y turbinas, además de usarse en las pantallas LCD y otros componentes esenciales de la electrónica moderna. Debido a los diferentes usos el molibdeno en el mercado internacional tiene un valor cercano a los US\$ 28,06 la libra, en comparación al cobre que se cotiza a US\$ 4,56 la libra (Portal Minero,2025).

**Figura 10**

*Precio del concentrado de molibdeno*



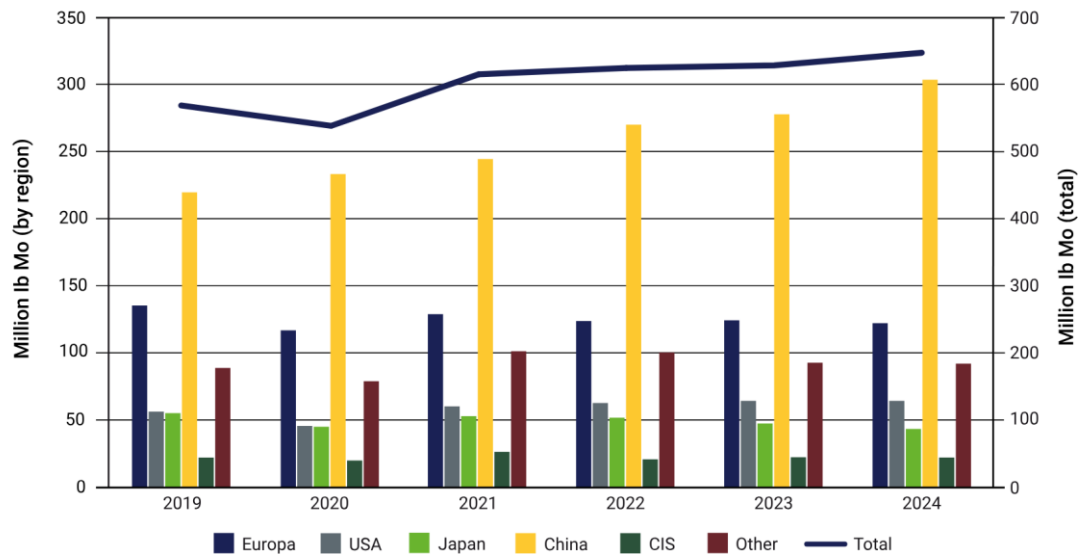
*Nota.* Precio del concentrado de molibdeno, en el año 2023 se aprecia un alza debido a una menor oferta en el mercado debido a la menor producción en Sudamérica. Adaptado de Información del mercado del molibdeno (IMOA,2025).

#### **2.4.1.1. Mercado Internacional**

El mercado del molibdeno atraviesa un periodo de expansión significativa, impulsado por la creciente demanda en industrias como la siderúrgica, la aeroespacial, la electrónica y la energética. Entre 2020 – 2024, se observó un crecimiento moderado en la producción del concentrado de molibdeno debido a la demanda constante del sector siderúrgico, ya que el molibdeno actúa como agente de aleación responsable del endurecimiento del acero; debido a la cadena de suministros global sufrió algunas interrupciones en el 2020 debido a la pandemia, lo que provocó la volatilidad en los precios y la disponibilidad (Teo Ngoma,2025).

**Figura 11**

*Producción global del concentrado de molibdeno*



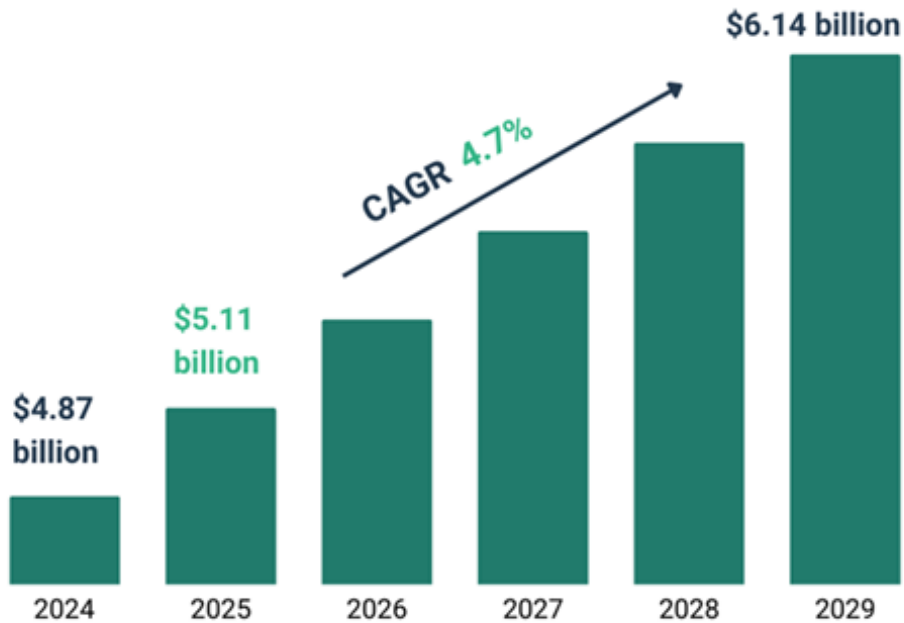
*Nota.* Producción del concentrado de molibdeno. Adaptado de Información del mercado del molibdeno (IMOA,2025).

Durante la próxima década, se prevé que la industria experimente cambios drásticos, la demanda de metales será cada vez más influenciada por las tecnologías verde, se prevé un aumento de la urbanización y el crecimiento de la infraestructura, junto a avances en el uso de vehículos eléctricos; lo que impulsará aún más la demanda del molibdeno (IMOA,2025).

El mercado del molibdeno ha experimentado un crecimiento constante en los últimos años. Se prevé que pase de 4870 millones de dólares en el 2024 a 5110 millones de dólares en el 2025, con una tasa de crecimiento anual compuesta de 4,9 % y así alcanzar los 61140 millones de dólares en el 2029 (Cruz et al.,2025).

**Figura 12**

*Proyección del mercado mundial del concentrado de molibdeno*



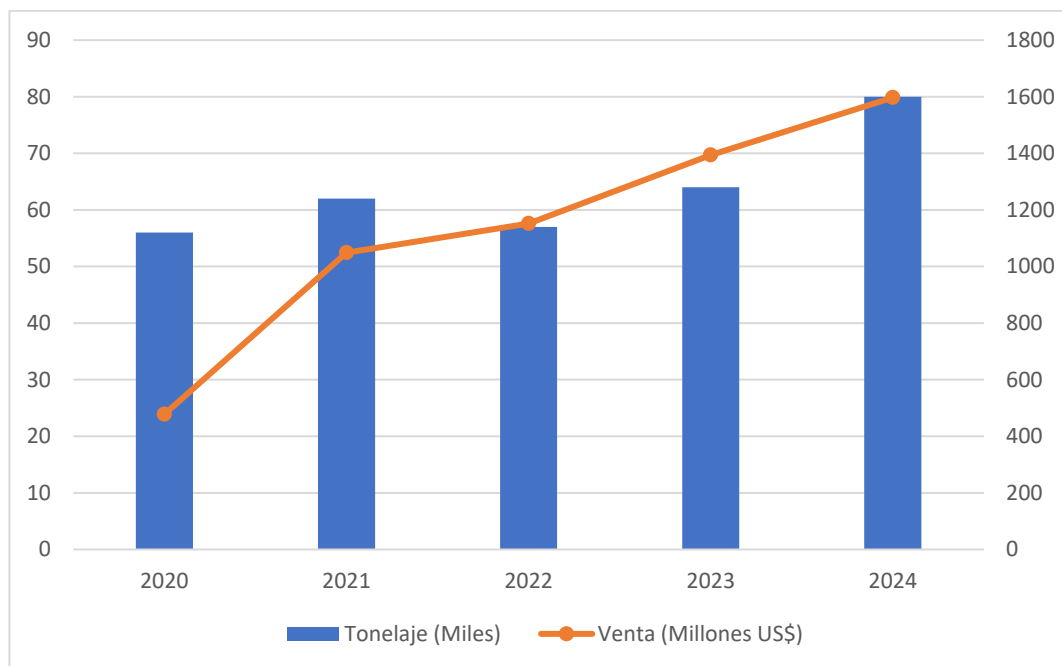
*Nota.* Proyección del mercado mundial del concentrado de molibdeno. Adaptado de Información del mercado mundial del molibdeno (Cruz et al.,2025).

#### **2.4.1.2.Mercado Nacional**

El Perú durante los últimos años se ha consolidado como uno de los principales productores de concentrado de molibdeno en el mundo gracias a sus operaciones de gran envergadura como son cerro verde, Antamina y Cuajones, que lo posicionan como un actor estratégico en el suministro de este concentrado, cada vez más demandado en la industria global. La producción nacional en el acumulado al cierre 2024, sumó un incremento de 25,3 % respecto al similar periodo del año 2023 (Gomez, 2025.)

**Figura 13**

*Exportación de concentrado de molibdeno en el Perú.*



*Nota.* Exportaciones de concentrado de molibdeno en el Perú. Adaptado de Exportaciones del Perú (Prom Perú,2025).

#### **2.4.2. Concentrado de Molibdeno**

El concentrado de molibdeno es el producto intermedio obtenido tras el procesamiento mineralúrgico de minerales que contienen molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ). Este concentrado resulta principalmente del proceso de flotación, donde la molibdenita se separa de otros sulfuros como la calcopirita, la piritita y la bornita y gangas silicatadas. Posteriormente este concentrado se convierte en la materia prima de los procesos de tostación y refinación, los cuales permiten generar óxidos de molibdeno (Araya et al.,2022).

El concentrado de molibdeno se define como un mineral deshidratado y secado parcialmente compuesta por un contenido metálico entre 50 y 60 % de molibdeno en forma de  $\text{MoS}_2$ , acompañada de fracciones menores de impurezas (arsénico, cobre, insolubles, aceite, entre otros) que deben mantenerse dentro de los límites de calidad. Si un concentrado excede de estos límites, se aplican penalidades económicas o incluso puede declararse en rechazo contractual (IMOA,2023).

### 2.4.3. Especificaciones de la Calidad del Concentrado

La calidad del concentrado de molibdeno está directamente asociada al contenido de molibdeno y a la presencia de impurezas que pueden afectar su comercialización, procesabilidad y su impacto en los procesos posteriores de fundición y refinación. Un concentrado de buena calidad debe ser adecuado para su posterior tostación o refinación química para producir óxidos o ferroaleaciones (Córdoba & Álvarez,2022).

Un concentrado altamente comerciable cumple con las siguientes características:

**Tabla 5**

*Composición química de un concentrado de molibdeno.*

<b>Elemento</b>	<b>Porcentaje en peso (%)</b>
Molibdeno	> 48,0
Aceites y grasas	< 13,0
Cobre	< 3,0
Insolubles	< 6,0
Arsénico	<0,2

*Nota.* Composición química de un concentrado de molibdeno adecuado para su comercialización. Adaptado del proceso de comercialización de concentrados de cobre: Una mirada a América Latina y el Cumplimiento fiscal (Reyes-Tagle, G. & Guajardo, J.,2024).

### 2.4.4. Penalidades

Las penalidades son deducciones aplicadas al precio pagado del concentrado de molibdeno que reflejan costos adicionales o riesgos que asume el comprador cuando el concentrado presenta impurezas, exceso de humedad, elementos nocivos u otros factores que afectan su procesamiento o calidad final.

La mayor parte de las funciones prefiere comprar concentrados limpios, relativamente libres de impurezas, salvo que se disponga de la capacidad de remover algunas de ellas. Se tienen en cuenta que cada fundición y productor negocia los términos de acuerdo a su particularidad del producto y la capacidad de tratamiento que posea. Cuando un productor cuyos concentrados estén por encima de los límites

permitidos para estos elementos deberá encontrar alternativas ya sea un post tratamiento o la de reprocesar el concentrado.

En el caso del arsénico cuando se supera el 0,2 %, la multa es de US\$ 5,0 por cada 0,1% sobre ese nivel hasta llevar a un máximo del 0,5 %. Cuando se supera el límite de 5000 ppm (0,5 %) se opta por reprocesar el concentrado generando un gasto de S/. 485,00 por tonelada de concentrado (ANEXO A).

#### **2.4.5. El arsénico como contaminante**

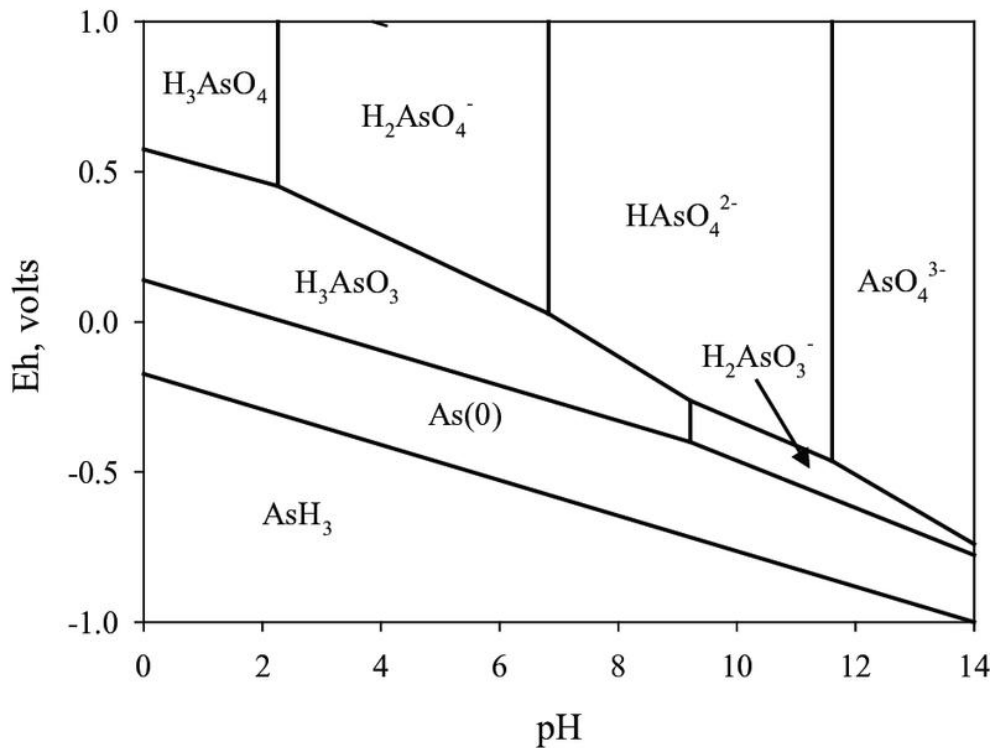
Los concentrados de molibdeno pueden presentar niveles significativos de contaminación por arsénico. Estas contaminaciones tienen implicancias importantes tanto económicas como operativas y ambientales en la comercialización del concentrado. Esto es debido a la asociación natural de minerales arsenicales con los depósitos de sulfuros. Esto quiere decir que la presencia de arsénico es que la mena de molibdeno no está limpia de minerales arsenicales, ya que está contaminada desde su exploración geológica (Li et al., 2025).

Las causas de la contaminación de arsénico en los concentrados de molibdeno son debido a:

- Cuando la molienda genera partículas muy finas (<20  $\mu\text{m}$ ), minerales arsenicales finos pueden permanecer adheridos en la espuma de la flotación o ser arrastrados hacia el concentrado. Esto es particularmente crítico porque las partículas ultrafinas no se separan bien por flotación y tienden a flotar.
- Muchas empresas al no tener circuitos de limpieza no reducen la incorporación del arsénico al concentrado principalmente se deben incluir etapas adicionales de limpieza, recirculaciones o incluso flotación de rechazo dedicada a minerales arsenicales.
- Un inadecuado control de potencial de la pulpa Eh y el pH; mediante el uso de reactivos de flotación, colectores, depresores. Perjudica la flotación debido a que los minerales arsenicales puede formar recubrimientos en partículas de molibdeno.

**Figura 14**

Diagrama Pourbaix de las especies del arsénico.



*Nota.* Se aprecia las diferentes especies del arsénico en un sistema  $AsO_2-H_2O$  a 25 °C y 1 bar de presión total. Adaptado de Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismo (Rangel et al. 2015).

#### 2.4.6. Principales minerales que contienen arsénico

En los depósitos de molibdeno es común la presencia de arsénico como elemento traza o como constituyente esencial de ciertos minerales. La coexistencia del arsénico con el molibdeno es debido a las condiciones geológicas y geoquímicas específicas como altas temperaturas, alto contenido de azufre y presencia de elementos como Cu, Fe, Sb y Bi; que favorecen la cristalización de sulfuros y sulfosales (Zhou et al.,2023).

En términos geoquímicos, el arsénico presenta un comportamiento anfótero y se incorpora fácilmente en estructuras sulfurosas bajo condiciones reductoras, sustituyendo parcialmente al azufre. Por ellos, en los sistemas donde se forma el

molibdeno, el arsénico suele encontrarse en equilibrio con fases de Cu y Fe, lo cual explica su presencia en menas de molibdeno (Miranda – Villagrán et al., 2025).

#### **2.4.6.1. Oropimente ( $As_2S_3$ )**

Es el trisulfuro de arsénico, siendo uno de los minerales de arsénico más representativos en ambientes de baja temperatura y alta sulfuración. Es asociado generalmente a zonas de oxidación de depósitos hidrotermales de oro, cobre y molibdeno (Li et al., 2025).

Su color amarillo dorado y su brillo resinoso le otorgan una apariencia distintiva y se encuentran en su estructura laminar constituida por capas de moleculares unidas por enlaces covalentes débiles, lo que le confiere una baja dureza (1,5 – 2,0 en la escala de Mohs), facilitando su descomposición térmica, bajo condiciones oxidantes a temperaturas superiores a 200 °C se puede transformarse en óxidos de arsénico liberando arsénico soluble en el proceso facilitando su remoción mediante el proceso de lixiviación alcalina (Miranda – Villagrán et al., 2025).

#### **Figura 15**

*Mineral de oropimente ( $As_2S_3$ )*



*Nota.* Se aprecia el mineral de oropimente en su forma pura, se caracteriza por el color amarillo dorado intenso a amarillo limón. Adaptado de Eliminación de arsénico desde concentrados de cobre, en minera Nasca - Perú (Llerana, 2017).

#### 2.4.6.2. Enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ )

Es un sulfosal de cobre – arsénico que presenta una estructura basada en una estructura de tipo tetraédricos, donde se ha determinado que en su superficie se forma una capa oxidada enriquecida en As y Cu sobre exposición al aire, lo cual cambia la reactividad de la superficie generando así un comportamiento similar a la molibdenita, lo cual dificulta su separación (Miranda – Villagrán et al., 2025).

Presenta un aspecto negro, aunque también puede adoptar la forma de cristales alargados rayados.

#### Figura 16

*Mineral de enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ )*



*Nota.* Se aprecia el mineral de enargita en su forma pura, se caracteriza por el color gris plomo oscuro, negro azulado y gris pardo. Adaptado de Eliminación de arsénico desde concentrados de cobre, en minera Nasca - Perú (Llerana,2017).

#### 2.4.6.3. Tennantita ( $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ )

Es de estructura compleja donde el arsénico está incorporado de forma extensa en la red cristalina, lo que hace que la fase sea estable y durante tratamientos de oxidación se ha mostrado volatilización significativa del arsénico, pero a altas temperaturas de alrededor 1200 °C; lo que indica que el arsénico está fuertemente adherido dificultando la remoción por flotación debido a que muestran un comportamiento similar al de la molibdenita (Zhou et al.,2023). Es uno de los

minerales más estables químicamente dificultando su separación, en pequeñas proporciones de tennatita incrementan significativamente el contenido de arsénico, siendo uno de los minerales que no se pueden remover mediante tratamiento de lixiviación a bajas concentraciones.

**Figura 17**

*Mineral de tennatita ( $Cu_{12}As_4 S_{13}$ )*



*Nota.* Se aprecia el mineral de tennatita en su forma pura, se caracteriza por el color gris oscuro a negro con reflejos azulados o verdosos debido a alteraciones superficiales. Adaptado de Eliminación de arsénico desde concentrados de cobre, en minera Nasca - Perú (Llerana,2017).

#### **2.4.6.4.Rejalgar ( $As_4S_4$ )**

Es un sulfuro de arsénico que frecuentemente coexiste con el oropimente en zonas de baja temperatura, presenta un color rojo anaranjado formando granos y cristales bien moldeados con brillo resinoso. Se forma típicamente por reacciones de reemplazo hidrotermal o como producto de alteración de arsenopirita. El rejalgar es inestable y se descompone lentamente en oropimente y arsénico elemental influyendo en la movilidad del arsénico y su posible incorporación al concentrado durante la molienda fina (Li et al.,2025). Cabe señalar que es el mineral con mayor contenido en peso de arsénico en casi 70 %, siendo el mineral con mayor complicación en su tratamiento.

**Figura 18**

*Mineral de rejalgar ( $As_4 S_4$ )*



*Nota.* Se aprecia el mineral de rejalgar en su forma pura, se caracteriza por el color rojo intenso, rojo anaranjado. Adaptado de Eliminación de arsénico desde concentrados de cobre, en minera Nasca - Perú (Llerana,2017).

**2.4.6.5.Arsenopirita ( $FeAsS$ )**

Viene a ser el sulfuro de arsénico y hierro más común en sistema metalíferos, con enlaces covalentes presentando un fuerte carácter covalente, lo que limita la desintegración de este enlace durante la oxidación. Constituye una de las principales fuentes primarias de arsénico en la corteza terrestre, se presenta frecuentemente como inclusiones o intercrecimientos finos como molibdenita o pirita, lo que dificulta su separación por flotación (Li et al.,2025). Durante su procesamiento puede oxidarse y liberar arsénico en forma de arseniatos solubles generando problemas ambientales y metalúrgicos. Este mineral contiene un 46 % en peso de arsénico.

**Figura 19**

*Mineral de arsenopirita (FeAsS)*



*Nota.* Se aprecia el mineral de arsenopirita en su forma pura, se caracteriza por el color plateado acero o gris metálico y su característico brillo metálico fuerte. Adaptado de Eliminación de arsénico desde concentrados de cobre, en minera Nasca - Perú (Llerana,2017).

## **2.5. LIXIVIACIÓN ALCALINA**

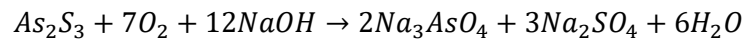
La lixiviación constituye una de las operaciones unitarias más representativas de la hidrometalurgia. Su objetivo fundamental es la disolución controlada de un componente sólido (usualmente un metal o metaloide) en una fase líquida, mediante la acción de un agente lixivante químicamente activo. Este proceso es la transferencia de masa de un soluto desde una matriz sólida hacia una solución líquida (Habashi,2021).

En la metalurgia se aplica tanto a minerales como a concentrados y relaves, se realiza con el fin de recuperar metales de valor o eliminar impurezas. La función es generar una reacción química heterogénea entre un sólido y una solución; en la cual se produce la disolución del mineral o metaloide deseado y la formación de una fase líquida enriquecida (Cordoba et al.,2021).

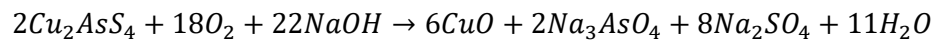
La lixiviación alcalina permite la oxidación controlada de las fases arsenicales, en medios de hidróxido de sodio (NaOH) (Li et al., 2022). La reacción global se rige por una combinación de procesos superficiales y fenómenos de transporte, donde las variables operacionales ejercen una influencia determinante sobre la velocidad global de lixiviación.

El concentrado de molibdeno siendo principalmente molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), las impurezas arsenicales suelen presentarse como minerales sulfurados como enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), tennanita ( $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ ), oropimineta ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), rejalgar ( $\text{As}_4\text{S}_4$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ). En presencia de  $\text{NaOH}$  y oxígeno; se generan reacciones que oxidan el arsénico (III) a arsénico (V), volviéndose solubles (Tongamp et al.,2010).

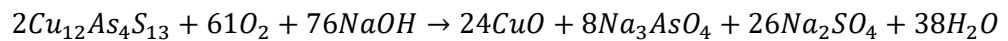
**Oropimente:**



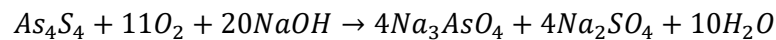
**Enargita:**



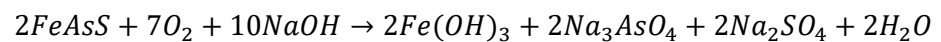
**Tennanita:**



**Rejalgar:**



**Arsenopirita:**



**2.5.1. Influencia de las variables en la lixiviación alcalina**

La comprensión de la influencia de estas variables no solo es esencial para optimizar la eficiencia de remoción del arsénico, sino para minimizar el consumo de reactivos, reducir la generación de residuos secundarios y mantener el contenido de molibdenita. La cinética de disolución depende de manera directa del tamaño de partícula, la temperatura, concentración de agente lixivante, relación sólido / líquido y velocidad de agitación (Zhou et al.,2021).

### 2.5.1.1. Influencia del tamaño de partícula

El tamaño de partícula es una de las variables de mayor impacto de lixiviación, ya que determina el área superficial para la interacción entre el sólido y la fase líquida. Según la teoría de la cinética de disolución heterogénea:

$$r = kAC^n$$

Donde:

- $r$  = velocidad de lixiviación ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $k$  = constante cinemática ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mol}^{-n}\cdot\text{m}^{3n}$ )
- $A$  = área específica ( $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ )
- $C$  = concentración del reactivo ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ )
- $n$  = orden de reacción (adimensional)

La reducción del tamaño de partícula aumenta el área específica, promoviendo una mayor velocidad de disolución. Sin embargo, cuando las partículas son excesivamente finas (menor de 20  $\mu\text{m}$ ), se generan problemas de aglomeración reduciendo la permeabilidad medio, por lo cual disminuye la eficiencia global de lixiviación (Zhang et al.,2020).

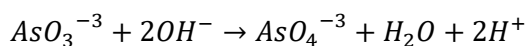
Para la lixiviación alcalina del concentrado de molibdeno, el tamaño de partícula influye tanto en la cinética de la disolución del arsénico como en la estabilidad de las especies de molibdenita. La granulometría promedio entre 30 y 60  $\mu\text{m}$  permite un equilibrio adecuado entre reactividad y control de oxidación no deseada de  $\text{MoS}_2$  (Liu et al.,2022).

### 2.5.1.2. Efecto del pH y la alcalinidad

El pH y la alcalinidad determinan la estabilidad química de las especies presentes en la disolución, así como la forma iónica en la que el arsénico se solubiliza. En sistemas alcalinos, el NaOH no solo actúa como disolvente, sino como controlador en el potencial redox del sistema y estabiliza las especies oxoaniónicas de arsénico (Zhang et al.,2022).

Con el control de pH se evita la formación de compuestos coloidales o precipitados que limitan la disolución del arsénico. A pH mayores a 12, la oxidación del

As (III) a As(V) incrementando la eficiencia de remoción (Liu et al.,2021). La reacción principal se representa como:



En sistemas con concentraciones moderadas de NaOH (0,5 M – 1,5 M), se logra una oxidación completa del arsénico sin disolver de forma significativa la molibdenita (Qin et al.,2022).

### 2.5.1.3.Efecto de la temperatura

La temperatura constituye uno de los factores más determinantes en la velocidad de las reacciones de lixiviación. Desde el punto de vista termodinámica, un incremento en la temperatura favorece la velocidad de disolución al incrementar la energía cinética de las moléculas mejorando la difusión de los reactivos y reducir la viscosidad del medio (Habshi,2021).

De acuerdo con la ecuación de Arrhenius, la constante de velocidad k se relaciona con la temperatura T de la siguiente manera:

$$k = Ae^{-Ea/RT}$$

Donde:

- k= constante cinemática (m.s<sup>-1</sup>.mol<sup>-n</sup>.m<sup>3n</sup>)
- A= factor de frecuencia (m.s<sup>-1</sup>.mol<sup>-n</sup>.m<sup>3n</sup>)
- e= base de logaritmo natural
- Ea= energía de activación (J.mol<sup>-1</sup>)
- R= constante universal de los gases (8,314 J.mol<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>)
- T= temperatura (K)

La lixiviación alcalina del concentrado de molibdeno, la temperatura influye tanto en la oxidación del arsénico como en la estabilidad de la molibdenita. El rango óptimo de temperatura se sitúa entre 50 °C y 80 °C, donde la oxidación de As (III) a As(V) es eficiente, pero la disolución de MoS<sub>2</sub> permanece controlada (Zhou et al.,2024).

#### 2.5.1.4. Tiempo de residencia o contacto

Define la duración de la interacción entre el sólido y el lixiviante, el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio depende de la naturaleza mineralógica del concentrado, el tamaño de partícula y las condiciones de agitación (Sun et al.,2021).

Durante la lixiviación alcalina, la oxidación de las fases arsenicales suele ser rápidas en los primeros minutos, pero la conversión total requiere de tiempo más prolongados debido a la difusión a través de capas de productos insolubles o zonas pasivas (Zho et al.,2023).

Los tiempos de residencia de 30 a 90 minutos son usuales en procesos alcalinos, aunque la optimización depende de las variables simultáneas de temperatura y concentración de oxidante (Li et al.,2024). Tiempos excesivos pueden inducir a la reoxidación de especies secundarias y el consumo innecesario de reactivos (Cai et al., 2023).

#### 2.5.1.5. Velocidad de agitación y transferencia de masa

La agitación del sistema de lixiviación constituye un parámetro operativo que incluye directamente sobre la transferencia de masa entre la fase líquida y el sólido. En términos hidrodinámicos, una mayor velocidad de agitación reduce el espesor de la capa límite líquida que rodea a las partículas sólidas, mejorando el transporte de los reactivos hacia la superficie reactiva y facilitando la difusión (Zhao et al.,2021).

En la lixiviación alcalina del concentrado de molibdeno presenta características particulares debido a la naturaleza laminar del  $\text{MoS}_2$  y la presencia de compuestos arsenicales de baja solubilidad. La agitación eficiente promueve una dispersión homogénea de las partículas y evita la formación de gradientes de concentración localizados. Según la teoría de la película difusional, la velocidad de lixiviación puede expresarse:

$$r = k_L A (C^* - C)$$

Donde:

- $r$  = velocidad de transferencia de masa ( $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $k_L$  = coeficiente de transferencia de masa ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

- $A$  = área superficial efectiva ( $m^2$ )
- $C^*$  = concentración en la interfaz ( $mol.m^{-3}$ )
- $C$  = concentración del reactivo en el seno de la solución ( $mol.m^{-3}$ )

El incremento de la agitación intensifica el coeficiente de transferencia de masa, pero un exceso puede inducir turbulencias que generan abrasión de las partículas y rotura en la estructura laminar de la molibdenita. Este fenómeno incrementa la exposición del  $MoS_2$  al medio oxidante y la posterior disolución parcial del molibdeno, reduciendo así la selectividad del proceso (Li et al., 2023).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. DISEÑO METODOLÓGICO**

##### **3.1.1. Tipo de Investigación**

El tipo de investigación es experimental.

##### **3.1.2. Nivel de Investigación**

La investigación es explicativa.

##### **3.1.3. Diseño de la Investigación**

La metodología de la investigación adoptó un enfoque cuantitativo, donde se evaluó la remoción de arsénico aplicando el proceso de lixiviación alcalina a un concentrado bulk de molibdeno. Inicialmente fueron sometidas al proceso de tamizado para la obtención del concentrado bulk de molibdeno de tamaño de partícula de 75  $\mu\text{m}$ , se homogenizó el concentrado bulk de molibdeno para obtener un total de 10 muestras (09 muestras que se emplearán para las pruebas y una adicional para contrastar con los resultados; haciendo un total de 10 muestras). Con las que se realizará las pruebas para determinar la temperatura, concentración de agente lixivante (NaOH), velocidad de agitación y tiempo de contacto para la remoción óptima del arsénico presente en el concentrado bulk de molibdeno; siendo esta remoción la

variable dependiente. Los ensayos se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia. Las muestras para determinación de parámetros químicos, fueron enviados al laboratorio de suelos, aguas y foliares del Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA.

### 3.1.4. Diseño Experimental – Método Taguchi

El método de Taguchi es una metodología estadística de diseño orientada a la mejora de la calidad y la robustez de productos y procesos, cuyo objetivo principal es minimizar la variabilidad causada por factores no controlables (factores de ruido), aun cuando el proceso opere bajo condiciones reales de uso. Este método se basa en el uso de arreglos ortogonales que permiten evaluar simultáneamente múltiples factores de control con un número reducido de experimentos, optimizando así los recursos, tiempo y costos experimentales (Taguchi et al.,2005).

En el ámbito de la ingeniería y la metalurgia de procesos, el método Taguchi es ampliamente usado para la optimización de variables operativas; permitiendo mejorar la eficiencia del proceso y la reproductibilidad de los resultados experimentales con un enfoque sistemático y estadísticamente fundamentado (Montgomery,2017).

**Tabla 6**

*Experimentos del diseño ortogonal- Método de Taguchi.*

Experimento	Temperatura (°C)	Concentración de agente lixiviante NaOH (mol/L)	Velocidad de agitación (RPM)	Tiempo de Contacto (min)
1	30	0,2	100	30
2	30	0,6	300	45
3	30	1,2	500	60
4	45	0,2	300	60
5	45	0,6	500	30
6	45	1,2	100	45
7	60	0,2	500	45
8	60	0,6	100	60
9	60	1,2	300	30

*Nota.* Se optaron los parámetros de acuerdo a la revisión bibliográfica previa. Fuente Elaboración propia.

### **3.2. POBLACIÓN**

La población es de 5,0 Kg de un concentrado bulk de molibdeno que se obtiene de una mezcla de diferentes tipos de concentrados de molibdeno, el concentrado bulk que se obtienen vienen a ser una mezcla homogénea con un alto contenido de arsénico que nos permitió cuantificar la remoción del arsénico presentes en las muestras de los diferentes ensayos.

### **3.3. MUESTRA**

Se usó 250 gramos de concentrado bulk de molibdeno con un tamaño de partícula de 75 um, para cada prueba. Cada muestra se evaluó a diferentes condiciones (4 variables y 3 niveles); haciendo un total de 9 experimentos con sus respectivos testigos.

### **3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.4.1. Técnica de recolección de datos**

- Se revisó fuentes bibliográficas confiables, tales como revistas científicas, publicaciones especializadas, libros y tesis. Se pone especial atención a la información relacionada con los procesos de lixiviación alcalina en concentrados de molibdeno.
- Se llevó a cabo entrevistas con operadores, ingenieros y otros profesionales de la metalurgia para obtener información detallada sobre los procesos de extracción y tratamiento de minerales, especialmente en lo que respecta a la eliminación del arsénico.
- Se empleó el formato de resultado de ensayos en laboratorio de lixiviación alcalina de un concentrado bulk de molibdeno, variando los parámetros de temperatura, concentración del agente lixivante, velocidad de agitación y tiempo de contacto.
- Se empleó el informe del laboratorio de suelos, aguas y foliares del Instituto Nacional de Innovación Agraria donde nos brinda la información de la concentración del molibdeno y arsénicos en las muestras de los experimentos antes y después del proceso de lixiviación (El método de análisis fue EPA Method 3050B.Revisión 2. 1996// EPA 6010 D. Revisión 5.2018).

### **3.4.2. Instrumentos de recolección de datos**

Se emplearon los siguientes instrumentos:

- Termómetro de mercurio.
- Agitador magnético.
- Cronómetro.
- Balanza analítica.

### **3.4.3. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Los datos obtenidos se procesaron mediante el programa Microsoft Office Excel y para el análisis estadístico se utilizó el programa Minitab Statistical Software 22. Mediante el uso de ambos programas se logró interpretar los datos y se tomaron decisiones para continuar con el desarrollo de la tesis. Fue posible determinar un conjunto óptimo de parámetros operacionales para la remoción de arsénico, establecer la interacción entre la temperatura, concentración de agente lixivante, tiempo de contacto y la velocidad de agitación durante remoción del arsénico, demostrar la selectividad del agente lixivante comprobando que no afecta en 5,0 % el contenido de molibdeno y por último nos sirvió para determinar la rentabilidad el proceso.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

#### **4.1. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS CONCENTRADOS DE MOLIBDENO**

Previamente al contar con 02 diferentes tipos de concentrado de molibdeno, el primer paso que es de conocer su composición química de ambas. Se tamizó en una malla # 200 ASTM (75  $\mu$ m); se envió una muestra representativa de 250 gramos de cada concentrado para determinar las leyes de los principales metales:

##### **4.1.1. Parámetros Químicos**

En la tabla 6 tenemos los resultados del análisis de metales en suelos por MP-AES, proporcionados por el laboratorio de suelos, aguas y foliares del Instituto Nacional de Innovación Agraria:

**Tabla 7***Resultados de análisis de metales en los 2 concentrados*

<b>Elemento</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Concentrado A</b>	<b>Concentrado B</b>
Cadmio	Cd	mg/Kg	0,01	0,01
Fierro	Fe	mg/Kg	32073,18	38762,76
Manganeso	Mn	mg/Kg	57,45	260,06
Plomo	Pb	mg/Kg	287,58	607,52
Zinc	Zn	mg/Kg	382,72	528,06
Níquel	Ni	mg/Kg	52,34	83,00
Aluminio	Al	mg/Kg	1478,25	3295,53
Arsénico	As	mg/Kg	5509,26	8456,36
Cobre	Cu	mg/Kg	10247,54	17874,94
Bario	Ba	mg/Kg	32,57	47,40
Cobalto	Co	mg/Kg	0,01	0,01
Molibdeno	Mo	mg/Kg	493785,22	367823,30
Estroncio	Sr	mg/Kg	35,23	68,23

*Nota.* Resultados de análisis de metales en los concentrados, se aprecia que ambos concentrados no son comercializable ya que superan el límite de 5000 ppm de Arsénico. Fuente Elaboración propia.

## **4.2. PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN ALCALINA**

Las pruebas de lixiviación alcalina se diseñaron bajo el Método Taguchi, diseño experimental con una estrategia sistemática que nos permita optimizar procesos mejorando la calidad y disminuyendo la variabilidad frente a factores externos, basado en matrices ortogonales. Estas pruebas se realizaron en diferentes condiciones para evaluar los diversos factores del proceso.

### **4.2.1. Diseños experimentales Método de Taguchi**

Se elaboró y desarrolló un diseño experimental factorial de 4 variables y 3 niveles, con lo cual se determinó el nivel de contribución de las variables como la

temperatura, concentración de agente lixivante, velocidad de agitación y tiempo de residencia para la remoción de arsénico.

**Tabla 8**

*Constantes de operación durante la lixiviación alcalina.*

Parámetro	Valor	Unidad
Peso de concentrado	0,25	Kg
pH	12	
Relación L/S	3	L/Kg
Temperatura ambiente	22	°C
Granulometría	75	um

*Nota.* Constantes de operación durante los diferentes ensayos realizados para un adecuado procesamiento de datos y análisis estadístico.

Exploramos las 4 variables basándonos en el método Taguchi:

**Tabla 9**

*Resultados del diseño ortogonal- Método de Taguchi.*

Experimento	Temperatura (°C)	Concentración de agente lixivante NaOH (mol/L)	Velocidad de agitación (RPM)	Tiempo de Contacto (min)	% Remoción de Arsénico
1	30	0,2	100	30	38,94
2	30	0,6	300	45	45,65
3	30	1,2	500	60	47,74
4	45	0,2	300	60	42,42
5	45	0,6	500	30	47,67
6	45	1,2	100	45	49,14
7	60	0,2	500	45	46,93
8	60	0,6	100	60	52,02
9	60	1,2	300	30	52,65

*Nota.* Resultados calculados del arsénico, leído antes y después del proceso de lixiviación, los valores fueron proporcionados por el análisis de metales por el laboratorio de suelos, agua y foliares del Instituto Nacional de Innovación Agraria. Fuente Elaboración propia.

#### 4.2.2. Análisis estadístico de la lixiviación alcalina del arsénico

Al contar con una sola variable dependiente se aplica el análisis ANOVA MULTIFACTORIAL.

**Tabla 10**  
ANOVA de la remoción de Arsénico

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución (%)	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	241,97	97,41	241,97	30,25	41,59	0,00
Temperatura	2	95,42	38,45	95,42	47,71	65,58	0,00
Concentración de agente lixivante	2	121,36	48,18	121,36	60,68	83,44	0,00
Velocidad de agitación	2	7,31	2,90	7,31	3,65	5,02	0,048
Tiempo de residencia	2	17,88	7,11	17,88	8,94	12,30	0,015
Error	4	6,49	2,59	6,49	1,62	-	-
Total	12	248,46	100,00	-	-	-	-

*Nota.* Resultados obtenidos del análisis estadístico empleando el programa de Minitab Statistical Software 22. Fuente Elaboración propia

Estos valores estadísticos representan:

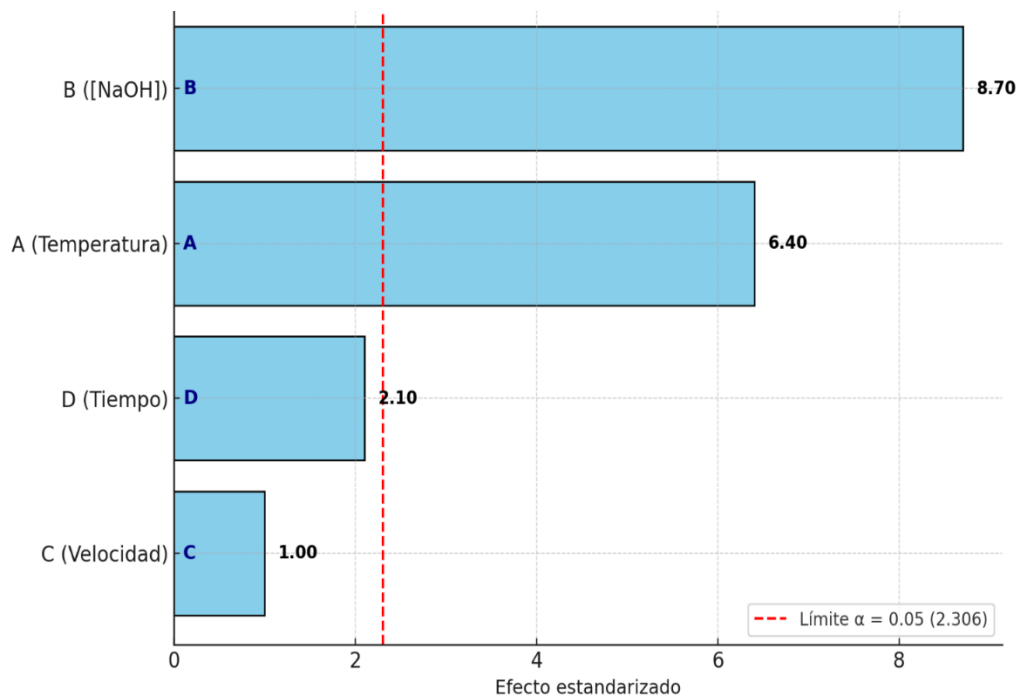
- Grados de Libertad (GL): Representa la cantidad de información que se usa para estimar la varianza asociada a la fuente, grados de libertad pequeños estiman menos confiabilidad por eso se recomienda que sea mayor o igual a 2.
- Suma de cuadrados secuencial (SC Sec.): Es la adición al modelo en el orden en que aparecen, muestra el aporte de cada factor.
- Contribución (% Contribución): Es el porcentaje de la variabilidad total que se atribuye a cada variable indicando que proporción de la variación respuesta explica cada factor.
- Suma de cuadrados ajustada (SC Ajust.): Evalúa cada término teniendo en cuenta los demás términos del modelo, esta porción de varianza del factor que no está explicada por los otros factores en el modelo.
- Media de cuadrados ajustada (MC Ajust.): Es una estimación de la varianza explicada por unidad de grados de libertad del factor;
- Estadístico F (Valor F): Compara la varianza explicada por el factor con la varianza no explicada (MC del error), mide si el efecto del factor es mayor de lo

esperado por azar. Al tener un valor mayor a 1 el efecto de los factores es grande en relación con la variabilidad residual evidenciando de que el factor influye en la respuesta.

- Estadístico P (Valor P): Es la probabilidad bajo la hipótesis nula (el factor no tiene efecto). En el caso de temperatura y concentración de agente lixiviante al ser ambos menores de 0,05; los factores tienen efecto.

**Figura 20**

*Diagrama de Pareto*



*Nota.* Los factores de concentración de agente lixiviante y temperatura son estadísticamente significativos y por tanto los más influyentes en la remoción del arsénico.

#### 4.2.3. Ecuación de regresión para la lixiviación de arsénico

Se presenta un modelo matemático para la lixiviación alcalina en función a la temperatura, concentración de agente lixiviante, velocidad de agitación y tiempo de contacto, la cual se describe en la tabla, con un coeficiente de correlación de 97,41 % lo que demuestra la confiabilidad del modelo.

El modelo que se obtiene para la remoción del arsénico empleando la lixiviación alcalina:

$$\text{Remoción de As (\%)} = 30,89 + 0,214 * T + 6,705 * [\text{NaOH}] + 0,002 * [\text{RPM}] + 0,032 * [t]$$

Donde:

- T= Temperatura en °C.
- [NaOH]= concentración de NaOH en mol/L
- [RPM]= velocidad de agitación en revoluciones por minuto.
- [t]= tiempo de contacto en minutos.

Podemos concluir que la variable con mayor efecto, dominante de la cinética química es la de concentración lixivante que al aumento de 1 mol/L de NaOH incrementa la remoción en 6,705, % reflejando que un medio más alcalino disuelve más compuestos arsenicales, facilitando su remoción. El segundo factor con mayor efecto es la temperatura ya que al incrementar en 1°C incrementa la remoción en 0,214 % reflejando que al subir la temperatura acelera la cinética de lixiviación del arsénico.

Respecto a las dos últimas variables la velocidad de agitación cada aumento de 100 RPM incrementa la remoción en 2,00 %; el tiempo de contacto cada 1 minuto aumenta la remoción en 0,032 % la remoción, tenemos que tener en cuenta el tiempo disponible que se tiene para la reacción.

**Tabla 11**

*Resumen del modelo de lixiviación de Arsénico.*

<b>Desv. Estándar (S)</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad, ajustado</b>	<b>PRESS</b>	<b>R-cuad.(pred)</b>	<b>AICc</b>	<b>BIC</b>
0,76	97,41 %	91,75 %	8,24	92,49 %	73,32	50,28

*Nota.* El modelo de la ecuación presenta valores aceptables y concisos todos menores al 3% en error. Elaboración propia

Estos valores estadísticos representan:

- Desviación estándar (S): Representa el error promedio en unidades de la variable respuesta, es decir el promedio de cuanto se desvían los valores predichos de los observados. El valor de 0,76 indica una alta precisión del modelo.

- Coeficiente de determinación (R-cuadrado): Mide la proporción de la variabilidad total de la remoción de Arsénico. El valor de 97,41 % se explica por los efectos combinados de temperatura, concentración de agente lixiviante, velocidad de agitación y tiempo de residencia. Solo el 2,59 % se debe a factores aleatorios no incluidos.
- Coeficiente de determinación ajustado (R-cuadrado ajustado): Se ajusta en función al número de predictores y del tamaño de muestra. Se usa para evitar una falsa mejora de  $R^2$  al agregar varias variables poco relevantes. Al obtener el valor de 91,75 % esto confirma que las variables incluidas son pertinentes y no redundantes.
- Suma de cuadrados del error residual predicho (PRESS): El valor de 8,24 es muy pequeño indicando alta capacidad predictiva y baja sensibilidad a datos individuales volviendo estable el modelo.
- Criterio de información de Akaike corregido (AOC): Es un indicador de la eficiencia del modelo basado en la verosimilitud y penalizado por el número de parámetros, se usa para comparar modelos alternativos, el de menor AICc se considera el más eficiente; el valor de 73,32 se considera bajo y eficiente.
- Criterio de información Bayesiano (BIC): Es un indicador con una penalización mayor para modelos con muchos parámetros, el valor de 50,28 es un valor bajo respaldando que el modelo no está sobre ajustado indicando simplicidad y alto poder explicativo.

### 4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.3.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

##### 4.3.1.1. Contrastación de hipótesis general

En esta investigación se tuvo como hipótesis general:

***“Existe un conjunto óptimo de parámetros operacionales para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina”.***

Se evaluó el porcentaje de remoción del arsénico de un concentrado bulk de molibdeno, el concentrado bulk inicialmente tenía 8161,87 ppm en la prueba número 09 se llegó a tener una remoción de 52,65 % siendo esta la máxima, bajo las

condiciones de temperatura de 60 °C, concentración de agente lixiviante de 1,2 M, velocidad de agitación de 300 RPM y tiempo de contacto de 30 minutos. Se obtuvo un modelo predictivo para la remoción de arsénico con un coeficiente de correlación del 97,41 % indicando una alta precisión en la predicción basada en las variables operativas.

Dado que los resultados experimentales indican una remoción de arsénico del concentrado bulk de molibdeno, se acepta la hipótesis general. Esto confirma que la lixiviación alcalina es efectiva para la eliminación de arsénico de los concentrados de molibdeno con alto contenido de arsénico.

#### **4.3.1.2. Contratación de hipótesis específica 1**

Se tiene como hipótesis específica 1:

**“La interacción entre la temperatura, concentración de agente lixiviante, tiempo de contacto y la velocidad de agitación influyen significativamente en la eficiencia de la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno”**

Empleando el análisis ANOVA pudimos cuantificar la contribución de los diferentes parámetros en la remoción de arsénico mediante la lixiviación alcalina; donde se obtuvo que la variable de concentración de agente lixiviante contribuye en un 48,18 % en la remoción de arsénico siendo la variable más influyente, en el caso de temperatura contribuye en un 38,45 % en la remoción; siendo estas dos variables las más influyentes. En caso de las dos restantes variables, el tiempo contribuye con un 7,11 % siendo una influencia baja y por último en el caso de la variable velocidad de agitación solo contribuye con un 2,90 % siendo casi nula su influencia.

Dado los resultados obtenidos indican que en el caso de las variables de tiempo de contacto y velocidad de agitación su influencia es casi nula, no se acepta la hipótesis específica 1. En el caso de las variables de temperatura y concentración de agente lixiviante influyen casi en su totalidad con la remoción de arsénico presente en el concentrado bulk de molibdeno.

#### **4.3.1.3. Contratación de hipótesis específica 2**

La hipótesis específica 2 es:

**“La lixiviación alcalina con NaOH para remover selectivamente el arsénico de un concentrado bulk de molibdeno, sin disolver o afectar en 5 % el contenido de molibdeno presente en el concentrado”**

En los diferentes ensayos que se realizaron el molibdeno inicial fue de 389419,49 ppm y en el ensayo número 8 con los parámetros de temperatura a 60 °C, concentración de agente lixivante de 0,6 M, velocidad de agitación 100 RPM y tiempo de contacto de 60 minutos, se tuvo la menor cantidad de molibdeno posterior a la lixiviación de 370467,63 ppm, teniendo una disolución de 4,87 % de molibdeno. Siendo esta menor a la planteada, se acepta la hipótesis específica 2.

#### **4.3.1.4. Contrastación de hipótesis específica 3**

La hipótesis específica 3 nos menciona:

**“Es rentable emplear la lixiviación alcalina para la remoción del arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno”**

En los diferentes experimentos que se realizaron en 250 gramos de concentrado bulk de molibdeno y 750 mL de soda, los cuales generaron estos costos como por cada 0,2 M de soda genera un costo de S/.0,0612, el costo de electricidad por cada 10°C de incremento costando S/ 0,0002 y con costo de penalidad del concentrado bulk de molibdeno de S/. 0,0150 por cada 3000 ppm de arsénico por encima del límite. En el experimento número 7 ([NaOH]= 0,2 M; Temperatura = 60 °C; RPM=500 y tiempo = 45 minutos) se obtuvo un 46,93 % de remoción del arsénico generando un ahorro de reproceso de S/.0,1213 y un gasto total de S/0,0770 dando por consiguiente un beneficio de S/. 0,0442 por cada 250 gramos de concentrado de molibdeno (ganancia de S/.176,8 por tonelada tratada de concentrado bulk de molibdeno).

**Tabla 12***Resumen del beneficio en los diferentes experimentos.*

<b>Experimento</b>	<b>% Remoción</b>	<b>Ahorro por Reproceso</b>	<b>Costo Total</b>	<b>Beneficio</b>	<b>Rentabilidad / unidad de costo</b>
<b>1</b>	38,94	0,1213	0,0764	0,0448	868,78
<b>2</b>	45,65	0,1213	0,1989	-0,0776	-588,06
<b>3</b>	47,74	0,1213	0,3826	-0,2613	- 182,70
<b>4</b>	42,42	0,1213	0,0767	0,0445	953,03
<b>5</b>	47,67	0,1213	0,1992	-0,0779	- 611,73
<b>6</b>	49,14	0,1213	0,3829	-0,2616	- 187,85
<b>7</b>	46,93	0,1213	0,0770	0,0442	1061,56
<b>8</b>	52,02	0,1213	0,1945	-0,0732	- 710,26
<b>9</b>	52,65	0,1213	0,3782	-0,2569	- 204,93

*Nota.* Se aprecia los diferentes beneficios obtenidos de los experimentos, se calcula el valor de rentabilidad / unidad de costo, para poder comparar de manera apropiada los diferentes experimentos y así obtener el más rentables. Elaboración propia

Se escoge el experimento número 7 por motivo que genera un 1061,56 % de rentabilidad por unidad de costo, siendo esta la mayor comparado al resto de los experimentos.

#### **4.3.2. Contrastación de los resultados con estudios similares**

Los resultados de la investigación muestran que la lixiviación alcalina logra en promedio remover un 47,01 % de arsénico de un concentrado bulk de molibdeno que inicialmente contenía 8161,87 ppm de arsénico bajo condiciones como la concentración de agente lixivante a 0,2 M; 0,6 M y 1,2 M. A 03 diferentes niveles de temperatura de 30°C, 45°C y 60°C, para periodos de 30, 45 y 60 minutos con velocidades de agitación de 100 RPM, 300 RPM y 500 RPM. Estos resultados son consistentes con los hallados por Tengfei Li et al., en su artículo “Lixiviación selectiva de arsénico a partir del concentrado de enargita mediante lixiviación alcalina en presencia de pirita”, que lograron altas tasas de lixiviación debido a que la

concentración del agente lixivante fue 30 veces más que nuestra óptima (5,0 Molar), respecto a la temperatura fue mayor en 130 °C.; respecto a nuestra óptima de 60 °C.

Por otro lado, a nivel nacional es la primera tesis que solo emplea el hidróxido de sodio como único agente lixivante para la remoción de arsénico, respecto al trabajo de Landa en su tesis “Evaluación de la flotación del mineral de cobre para reducir el contenido de arsénico en concentrados de cobre en la compañía minera Casapalca – Unidad Americana - 2018”, se aprecia que concuerda con los tiempos del presente trabajo, ya que Landa propone como tiempo óptimo de lixiviación 20 minutos pero con una mayor concentración de hidróxido de sodio de 2 M y sulfuro de sodio a 1M ; tenemos que tener en cuenta que Landa removió de 33000 ppm a 15000 ppm de arsénico , donde logró remover 18000 ppm consumiendo una mayor cantidad de insumos y mayor temperatura el inconveniente resulta en que al solo reducir a 15000 ppm de arsénico este concentrado aun no es comerciables ya que supera los 5000 ppm de arsénico permitido .

## CONCLUSIONES

Se determinó que los parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante la lixiviación alcalina debe ser con el agente lixivante (NaOH) a una concentración de 1,2 molar, temperatura de 60 °C, velocidad de agitación de 300 RPM y tiempo de contacto de 30 minutos; se logra una remoción máxima de 52,65 %.

Se estableció la interacción entre los parámetros operacionales cuantificando su contribución de cada variable en la remoción del arsénico presente en el concentrado bulk de molibdeno; en el caso de la concentración del agente lixivante (NaOH) contribuye con un 48,18 %, en el caso de la temperatura contribuye con un 38,45 % siendo estas variables las más influyente. Mientras que el tiempo contribuye con un 7,11 % siendo una influencia baja y por último la variable velocidad de agitación solo contribuye con un 2,90% siendo casi nula su influencia.

Se logró demostrar que la lixiviación alcalina empleado NaOH como agente lixivante es altamente selectivo, ya que en las diferentes pruebas como promedio se apreció un cambio máximo de 4,58 % de disminución en la concentración de molibdeno y en el caso del arsénico se apreció una remoción de 47,01 % en promedio, en las diferentes pruebas realizadas.

Se analizó la rentabilidad de emplear la lixiviación alcalina para la remoción del arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno, se cuantifico el costo de emplear 0,2 M de soda genera un costo de S/.0,0612, el costo de electricidad por cada 10°C de incremento costando S/ 0,0002 y con costo de penalidad del concentrado bulk de molibdeno de S/. 0,0150 por cada 3000 ppm de arsénico por encima del límite. Se obtuvo un beneficio máximo de S/. 0,0442 por cada 250 gramos de concentrado de molibdeno (ganancia de S/.176,8 por tonelada tratada de concentrado bulk de molibdeno); bajo condiciones de arsénico inicial de 8161,87 ppm y disminuyéndolo a 4331,50 ppm después del proceso de lixiviación alcalina.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda evaluar un estudio de los diferentes tipos de mineral que contribuyen con el contenido de arsénico y su comportamiento frente a la lixiviación alcalina.

Se recomienda un estudio para su recuperación del arsénico que se extrae del proceso de lixiviación alcalina y su factibilidad en su comercialización.

Al ser un proceso rentable se propone el desarrollo e implementación de lixiviación alcalina en plantas concentrados que no cumpla con los parámetros de comercialización.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arapa, A. (2021). *Operación de planta concentradora de molibdeno y filtros*. [Tesis de título de profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa] Repositorio Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ac53c7ac-2ebe-489f-9747-5e3ae9817a96/content>
- Cai, Y., Liu, Z., Wang, H., & Zhang, Y. (2023). *Kinetic modeling and optimization of selective arsenic leaching from molybdenum concentrates under alkaline conditions*. *Hydrometallurgy*, 221, 106932. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106932>
- Campos, J. (2024). *Eliminación de arsénico mediante el proceso de lixiviación alcalina con NaOH y Na<sub>2</sub>S en concentrado con alto contenido de cobre grises, Ancash*. [Tesis de título de profesional, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión] Repositorio Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. [http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/5264/4/T026\\_73669327\\_T.pdf#page=58.18](http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/5264/4/T026_73669327_T.pdf#page=58.18)
- Canazas, F., & Salas, J. (2024). *Estandarización, validación e implementación del método gravimétrico para la determinación de molibdeno en minerales concentrados de molibdeno en el laboratorio Central de la SUNAT*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional De San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional Cybertesis UNSA. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/55f57686-6ff4-4ae8-bd30-3b945c0fd09a/content#page=23.10>
- Chen, Y., Zhou, L., & Xu, Z. (2021). *Surface chemistry and flotation behavior of molybdenite: A critical review*. *Minerals Engineering*, 164, 106806. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106806>
- Ecf.gov. (2025). *Specifications for packagings (Part 178)*. U.S. Government. <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-178>
- Flores, M., Rodríguez, P., & Yáñez, J. (2022). *Procesos hidrometalúrgicos aplicados a concentrados de molibdeno con alto contenido de impurezas*. *Revista de Metalurgia*, 58(2), 115–129. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2022.015>
- Gao, Y., Wang, J., & Liu, Q. (2020). *Influence of seawater constituents on molybdenite flotation: A review*. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121073. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121073>

- González, L., Pérez, J., & Torres, M. (2022). *Mineral processing strategies for molybdenite flotation*. *Minerals Engineering*, 188, 107925. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107925>
- Heo, J. (2024). *Optimizing rotary kiln operations for molybdenite roasting*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666821124000590>
- Herrera-Urbina, R. (2022). *Surface chemistry of molybdenite flotation: A critical review*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 640, 128474. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128474>
- Kong, L., Sun, Y., & Zhao, W. (2023). *Influence of pH and oxidant concentration on arsenic dissolution behavior in molybdenum concentrate leaching*. *Minerals Engineering*, 202, 108123. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108123>
- Li, Q., Zhou, T., & Zhang, P. (2022). *Alkaline oxidative leaching of arsenic-bearing molybdenum concentrates with hydrogen peroxide*. *Metals*, 12(11), 1928. <https://doi.org/10.3390/met12111928>
- Li, Q., Zhao, Y., & Sun, Z. (2024). *Effect of operational variables on arsenic removal kinetics during alkaline leaching of Mo concentrates*. *Hydrometallurgy*, 226, 107001. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.107001>
- Liu, W., Zhang, H., & Chen, T. (2021). *Optimization of alkaline leaching parameters for impurity removal from molybdenum concentrate*. *Hydrometallurgy Journal*, 202, 105611. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105611>
- Liu, X., Wang, T., & Cai, J. (2022). *Optimization of MoS<sub>2</sub> stability during alkaline leaching of arsenic impurities*. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132754. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132754>
- Liu, X., Zhang, W., Song, S., & otros. (2024). *Enhanced molybdenum extraction and purification from molybdenite concentrate / Sintering behavior of molybdenite concentrate during oxidation roasting*. *Molecules*, 29(21), 5183. <https://doi.org/10.3390/molecules29215183>
- Liu, Y., Zhang, L., & Zhao, C. (2023). *Thermodynamic and kinetic assessment of arsenic leaching from molybdenum concentrates under alkaline conditions*. *Metals*, 13(2), 287. <https://doi.org/10.3390/met13020287>
- Llerena, J. (2017). *Eliminación de arsénico desde concentrados de cobre, en minera Nasca-Perú*. [Tesis de título de profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa] Repositorio Universidad Nacional San Agustín de

- Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/4db5bcd8-608a-4728-b631-2beef7601afc/content>
- López, L. & Villalobos, J. (2021). *Análisis comparativo de los métodos hidrometalúrgicos empleados para la limpieza de concentrados de cobre que contienen arsénico*. [Tesis de título de profesional, Universidad Privada del Norte] Repositorio Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/28247/Lopez%20Sayavrede%2C%20Luis%20Miguel%20-%20Villalobos%20Mejia%2C%20Jorge%20Dalton.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mamani, W. (2024). *Análisis químicos de concentrados de molibdeno en minera las bambas*. [Tesis de título de profesional, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann] Repositorio Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/server/api/core/bitstreams>
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Anuario minero 2023*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/minem>
- Montes, G. (2016). *Análisis estadístico y experimental de parámetros involucrados en la flotación selectiva de molibdeno en minera Los Pelambres*. [Tesis de título de profesional, Universidad de Chile] Repositorio Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/140574/Analisis-estadistico-y-experimental-de-parametros-involucrados-en-la-flotacion-selectiva-de-molibdeno-en-Minera-los-Pelambres.pdf?sequence=4>
- Noble, A., & van der Meer, F. (2020). *Advances in screening technology for mineral processing*. *Minerals*, 10(6), 524. <https://doi.org/10.3390/min10060524>
- Obregón, E., & Peña, X. (2022). *Evaluación de la temperatura que influye en la recuperación de molibdeno en el proceso de flotación para un concentrado bulk del distrito de Ilabaya* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional Cybertesis UNMSM. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/9777260a-afe3-4ad5-a45e-89e829f89475/content>
- Portal Minero (2025). *Molibdeno: El "oro gris" chileno que impulsa la alta tecnología global*. Portal Minero. <https://www.portalminero.com/wp/molibdeno-el-oro-gris-chileno-que-impulsa-la-alta-tecnologia-global/>
- Rangel Montoya, E. A., Montañez Hernández, L. E., Luévanos Escareño, M. P., & Balagurusamy, N. (2015). *Impacto del arsénico en el ambiente y su*

- transformación por microorganismos*. Terra Latinoamericana, 33(2).  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792015000200103&utm\\_source=chatgpt.com](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792015000200103&utm_source=chatgpt.com)
- Rahman, M., Asad, M., & Hussain, S. (2021). *Energy-efficient fine grinding technologies in mineral processing*. Powder Technology, 383, 637–648.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.056>
- Reyes- Tagle, G., & Guajardo, J. (2023). *El proceso de comercialización de concentrados de cobre: Una mirada a América Latina y el cumplimiento fiscal*.  
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/El-proceso-de-comercializacion-de-concentrados-de-cobre-una-mirada-a-America-Latina-y-el-cumplimiento-fiscal.pdf>
- Samanta, B., & Sarkar, B. (2014). *Dispatching of trucks for open-pit mines using expert systems*. International Journal of Mining Science and Technology, 24(1), 39–43.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.12.006>
- Santiago, J. (2022). *Recuperación de molibdeno y cobre del mineral de pórfido mediante flotación empleando el criterio de iso-flotabilidad empleando el criterio de iso-flotabilidad en minera Chinalco-Toromocho* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UPN.  
<https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/72b4e1fe-f0b9-41c1-99c3-fd80b601d1bb/content>
- Seedorff, E., Dilles, J. H., Proffett, J. M., Einaudi, M. T., Zurcher, L., Stavast, W. J. A., Johnson, D. A., & Barton, M. D. (2005). *Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features*. Economic Geology, 100(5), 251–298.  
<https://doi.org/10.5382/AV100.18>
- Song, X., Wang, L., & Zhang, Y. (2021). *Recent developments in comminution circuits for large-scale mines*. International Journal of Mineral Processing, 210, 106534.  
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2021.106534>
- Soto, L., García, M., & Pérez, E. (2020). *Impacto de las penalidades comerciales en concentrados de molibdeno con alto contenido de arsénico*. Boletín Minero Chileno, 57(1), 45–59.
- Sun, Y., Li, J., & Kong, L. (2021). *Effect of particle size and liquid–solid ratio on arsenic leaching efficiency in alkaline systems*. Hydrometallurgy, 205, 105724.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105724>

- Takahashi, K., Itoh, S., & Matsuda, T. (2020). *Removal of arsenic from molybdenite concentrate by alkaline leaching*. *Minerals Engineering*, 152, 106377. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106377>
- Wang, H., Zhao, X., & Zhou, T. (2022). *Selective alkaline leaching of arsenic from molybdenum sulfide concentrates: Experimental study and modeling*. *Minerals Engineering*, 191, 107676. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107676>
- Wang, X., Li, Y., & Zhang, J. (2018). *Influence of arsenic on the quality of molybdenum concentrates and its removal methods*. *International Journal of Mineral Processing*, 172, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.11.003>
- Yang, B., Liu, Q., & Xu, Z. (2021). *Depression mechanisms in Cu–Mo separation flotation: Recent advances and future perspectives*. *Powder Technology*, 387, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.012>
- Zapata, M., & Zapata, J. (2004). *Desarrollo de dos nuevos prototipos de celdas de flotación en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí-México*. [http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2078-55932004000100004&lng=pt&nrm=iso&tlng=es](http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932004000100004&lng=pt&nrm=iso&tlng=es)
- Zhang, Y., Li, M., & Song, S. (2023). *Novel reagents in molybdenite flotation: Trends and future directions*. *Separation and Purification Technology*, 312, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123456>
- Zhou, T., Wang, H., & Zhao, Y. (2024). *Advances in selective oxidation and arsenic removal from molybdenum concentrates under alkaline conditions*. *Minerals*, 14(3), 354. <https://doi.org/10.3390/min14030354>
- Zhou, Y., Chen, J., & Li, P. (2019). *Alkaline leaching of arsenic from molybdenum sulfide concentrate: Mechanisms and kinetics*. *Hydrometallurgy*, 187, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.002>

## ANEXOS

### ANEXO A: Costo de reproceso de concentrado de molibdeno.

**Tabla A1**

*Costo de reproceso de concentrado de molibdeno- embolsado*

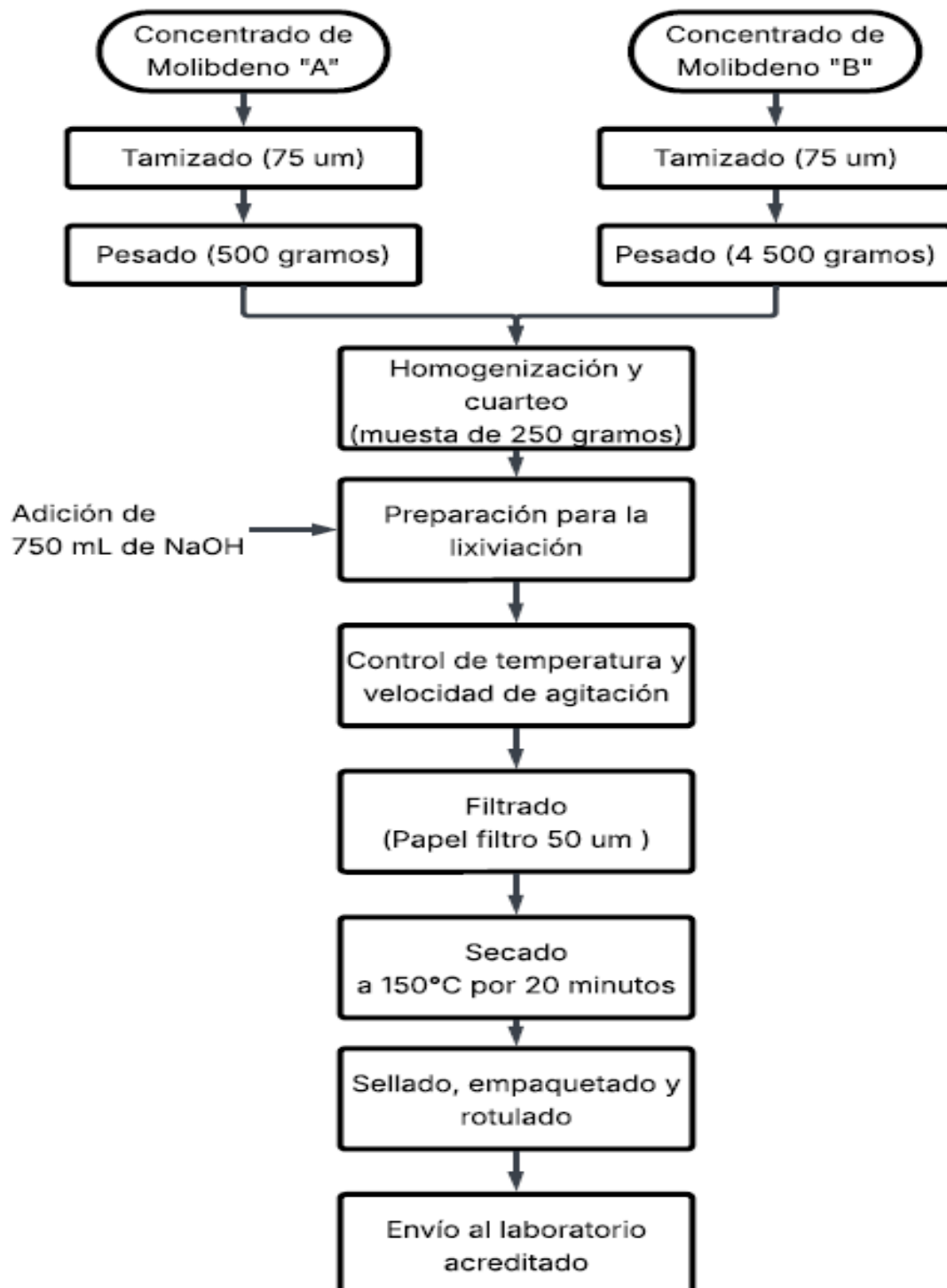
<b>Reproceso de bolsas de concentrado de molibdeno</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Personal/Equipo</b>	<b>Tiempo (horas)</b>	<b>Costo(S/.)</b>
Tiempo de búsqueda de bolsa a reprocesar	Técnico y Montacarga	0,10	3,02
Montacarga y operador para traslado a reprocesar	Técnico y Montacarga	0,10	3,02
Operación de bombas para el reproceso	Energía y desgaste de componentes	1,00	30,00
Operador para manguereo de material	Técnico	5,00	150,80
Operación de etapa de filtrado del concentrado	Equipo de filtrado y envasado	0,50	132,60
Costo de material para ensacado	Bolsa + parihuela	-	157,78
Retiro de bolsas	Técnico y Montacarga	0,25	7,54
Total		6,95	484,75

**Figura A2**

*Costo de mano de obra y materiales*

<b>Requerimiento</b>	<b>Soles/hora</b>
Técnico/Operador	30,16
Parihuela	96,94
Bolsa	60,84

## ANEXO B: Procedimiento Experimental.



Nota: Se realizaron las diferentes etapas siempre usando los EPPS correspondientes.

**Figura B1: Limpieza de equipos de laboratorio a emplear.**



**Figura B2: Esterilización de materiales de vidrio.**



Figura B3: Preparación de muestra



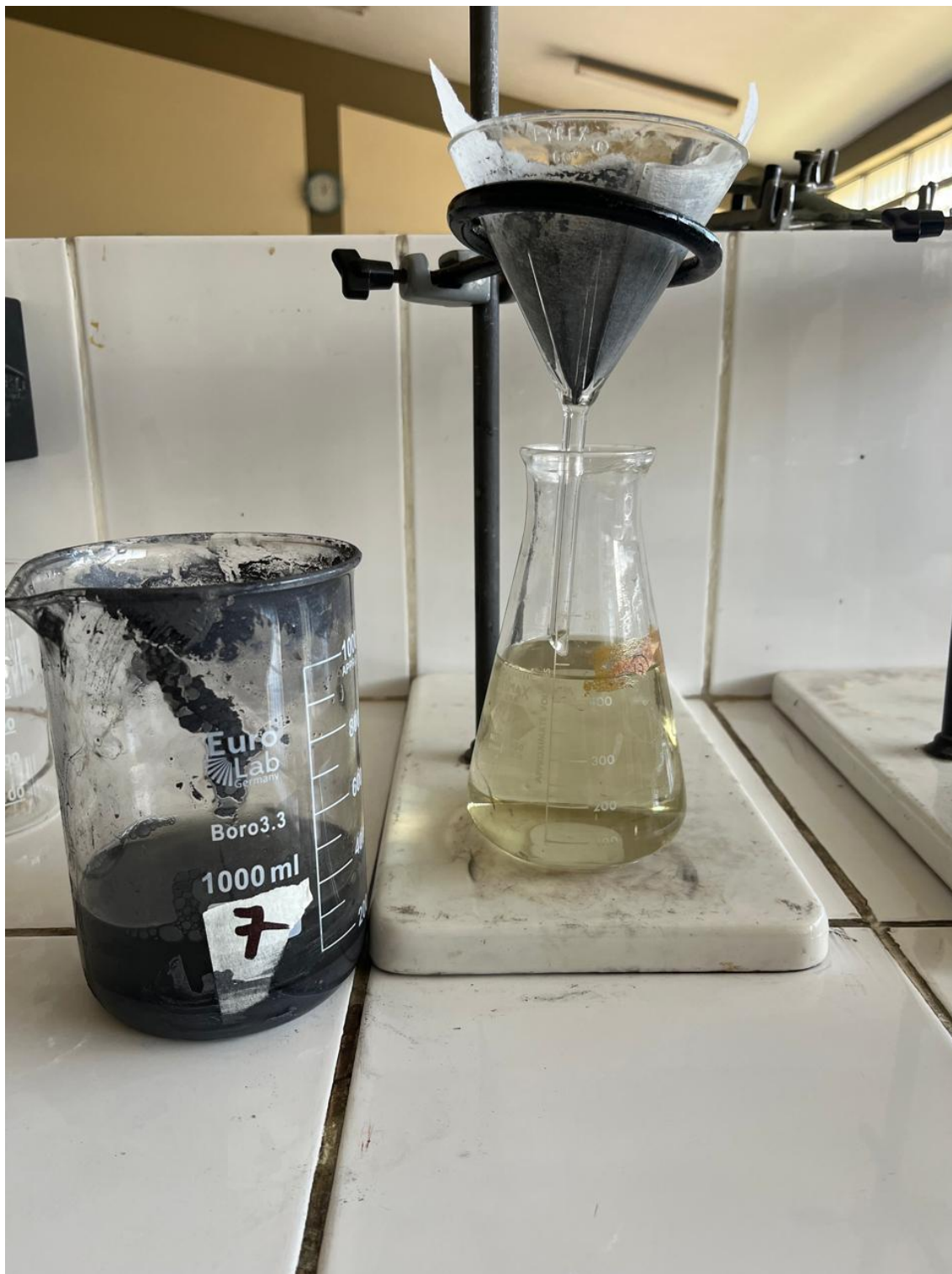
Nota: Se optó por pesar 25,0 gramos del concentrado A y 225,0 gramos del concentrado B; para cada experimento y 750 mL de NaOH como agente lixiviante.

Figura B4: Control de parámetros durante la experimentación.



Nota: Se tomó como dato de temperatura del sistema, la medición en el punto medio del vaso precipitado.

Figura B5: Etapa de filtración



Nota: Se logra apreciar que mientras se aumenta la temperatura y la concentración del agente lixiviante, el filtrado que se obtiene su coloración va en aumento a un color amarillo.

Figura B6: Secado a 150°C por 20 minutos.



Nota: Se seco el concentrado previamente lixiviado a una temperatura de 80 °C por un tiempo de 20 minutos.


**Figura B7: Sellado, empaquetado y rotulado.**



Nota: Se retiró con mucho cuidado el concentrado, se empaquetó para su envío al laboratorio de Suelos, Aguas y Foliare de la INIA.

## ANEXO C: Resultado de análisis químicos

Figura C1: Análisis químico de los concentrados de molibdeno, emitido por el laboratorio de suelos, aguas y foliares.



**INIA**  
Instituto Nacional de Innovación Agraria

---

### INFORME DE ENSAYO

#### LABSAF CANAAN

#### N° 083061-25NA / SU / CA

---




**I. INFORMACIÓN GENERAL**

Cliente	: Yuliano Andre Robles Bedrñana
Propietario / Productor	: Yuliano Andre Robles Bedrñana
Dirección del cliente	: Ayacucho
Solicitado por	: Yuliano Andre Robles Bedrñana
Muestreado por	: Yuliano Andre Robles Bedrñana
Referencia del muestreo	: Reservado por el Cliente
Procedencia de muestra(s) (***)	: Ayacucho-Huamanga-Ayacucho
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2025-05-07
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-08-08
Lugar de ensayo	: LABSAF CANAAN
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-08-08 al 2025-08-09:
Cotización del servicio	: 104-25-CA
Fecha de emisión	: 2025-08-21

---

**II. RESULTADO DE ANÁLISIS**

ITEM	A	B	-	-	-	-
Código de Laboratorio	SU-372-CA-25	SU-773-CA-25	-	-	-	-
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)	2025-05-07	2025-05-07	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	10.00	10.00	-	-	-	-
Código de identificación de la Muestra por el Cliente (***)	-	-	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
Cadmio (Cd)	mg/Kg	-	<0,01	<0,01	-	-
Fierro (Fe)	mg/Kg	-	32073,18	38762,76	-	-
Manganeso (Mn)	mg/Kg	-	57,45	260,06	-	-
Plomo (Pb)	mg/Kg	-	287,58	607,52	-	-
Zinc ( Zn)	mg/Kg	-	382,72	526,06	-	-
Niquel (Ni)	mg/Kg	-	52,34	83,00	-	-
Aluminio (Al)	mg/Kg	-	478,25	3295,53	-	-
Antimonio (As)	mg/Kg	-	5509,26	8456,36	-	-
Cobre (Cu)	mg/Kg	-	10247,54	17874,94	-	-
Bario (Ba)	mg/Kg	-	32,57	47,40	-	-
Cobalto (Co)	mg/Kg	-	<0,01	<0,01	-	-
Molibdeno (Mo)	mg/Kg	-	493785,22	367823,30	-	-
Estroncio (Sr)	mg/Kg	-	35,23	68,23	-	-

Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliares  
Acreditado con la Norma  
NTP-ISO/IEC 17025:2017  
LABSAF Canaán  
Dirección: Av. Abancay N° 299  
Email: labsoftcanaan@inia.gob.pe

F. 48 / Ver. 04  
www.inia.gob.pe

Página 2 de 3

Figura C2: Análisis químico de los diferentes ensayos de lixiviación alcalina de las muestras del concentrado bulk de molibdeno, emitido por el laboratorio de suelos, aguas y foliares.



Instituto Nacional de Innovación Agraria

**INFORME DE ENSAYO**  
**LABSAF CANAAN**  
**N° 093567-25NA / SU / CA**

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

Cliente : Yuliano Andre Robles Bedrillana  
 Propietario / Productor : Yuliano Andre Robles Bedrillana  
 Dirección del cliente : Ayacucho  
 Solicitado por : Yuliano Andre Robles Bedrillana  
 Muestreado por : Yuliano Andre Robles Bedrillana  
 Referencia del muestreo : Reservado por el Cliente  
 Procedencia de muestra(s) (\*\*\*) : Ayacucho-Huamanga-Ayacucho  
 Fecha(s) de muestreo (\*\*\*) : 2025-08-28  
 Fecha de recepción de muestra(s) : 2025-08-29  
 Lugar de ensayo : LABSAF CANAAN  
 Fecha(s) de análisis : Del 2025-09-03 al 2025-09-05  
 Cotización del servicio : 144-25-CA  
 Fecha de emisión : 2025-09-08

**II. RESULTADO DE ANÁLISIS**

ITEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	SU2145-CA-25	SU2146-CA-25	SU2147-CA-25	SU2148-CA-25	SU2149-CA-25	SU2150-CA-25
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de Muestreo (***)	2025-08-28	2025-08-28	2025-08-28	2025-08-28	1900-01-00	1900-01-00
Hora de Inicio de Muestreo (h) (**)	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
Código/identificación de la Muestra por el Cliente (***)	1	2	3	4	5	6
<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>LC</b>	<b>Resultados</b>			
Cadmio (Cd)	mg/Kg	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Hierro (Fe)	mg/Kg	-	39600,64	43186,73	41977,63	41793,85
Manganeso (Mn)	mg/Kg	-	255,59	299,88	287,65	307,63
Plomo (Pb)	mg/Kg	-	619,01	743,70	558,33	731,12
Zinc (Zn)	mg/Kg	-	555,11	687,72	579,30	659,21
Níquel (Ni)	mg/Kg	-	83,87	71,97	71,91	59,93
Aluminio (Al)	mg/Kg	-	2416,13	2303,08	2744,71	2592,89
Arsénico (As)	mg/Kg	-	4983,64	4435,98	4265*39	4699*60
Cobre (Cu)	mg/Kg	-	18278,75	18744,50	18310,03	18210,15
Bario (Ba)	mg/Kg	-	43,93	35,99	51,94	7,99
Cobalto (Co)	mg/Kg	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Molibdeno (Mo)	mg/Kg	-	371753,19	372598,96	370695,17	372924*45
Estroncio (Sr)	mg/Kg	-	47,92	39,98	35,96	47,94
						43,95
						43,91



Redde Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliares  
 Acreditado con la Norma  
 NTP-ISO/IEC 17025:2017  
 LABSAF Canaan

Dirección: Av. Abanca y N° 299  
 Email: labsafcanaan@inia.gob.pe

F-46 / Vw. 06  
 www.inia.gob.pe

**INFORME DE ENSAYO**  
**LABSAF CANAAN**  
**N° 093567-25NA / SU / CA**

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

Cliente : Yuliano Andre Robles Bedrillana  
 Propietario / Productor : Yuliano Andre Robles Bedrillana  
 Dirección del cliente : Ayacucho  
 Solicitado por : Yuliano Andre Robles Bedrillana  
 Muestreado por : Yuliano Andre Robles Bedrillana  
 Referencia del muestreo : Reservado por el Cliente  
 Procedencia de muestra(s) (\*\*\*\*) : Ayacucho-Huamanga-Ayacucho  
 Fecha(s) de muestreo (\*\*\*\*) : 2025-08-28  
 Fecha de recepción de muestra(s) : 2025-08-29  
 Lugar de ensayo : LABSAF CANAAN  
 Fecha(s) de análisis : Del 2025-09-03 al 2025-09-05  
 Cotización del servicio : 144-25-CA  
 Fecha de emisión : 2025-09-08

**II. RESULTADO DE ANÁLISIS**

ITEM	7	8	9	10	-	-
Código de Laboratorio	SU2151-CA-25	SU2152-CA-25	SU2153-CA-25	SU2154-CA-25	-	-
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	-	-
Fecha de Muestreo (****)	2025-08-28	2025-08-28	2025-08-28	2025-08-28	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (****)	18.00	16.00	16.00	16.00	-	-
Código/identificación de la Muestra por el Cliente (****)	7	8	9	10	-	-
	Ensayo	Unidad	LC	Resultados		
Cadmio (Cd)	mg/Kg	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Hierro (Fe)	mg/Kg	-	39013,18	40355,72	39200,84	37993,80
Manganeso (Mn)	mg/Kg	-	267,68	303,76	259,79	239,80
Plomo (Pb)	mg/Kg	-	723,13	643,49	507,59	575,53
Zinc (Zn)	mg/Kg	-	587,32	575,54	467,63	513,59
Níquel (Ni)	mg/Kg	-	75,91	79,94	75,94	79,93
Aluminio (Al)	mg/Kg	-	2900,52	2498,00	2637,89	3013,80
Arsénico (As)	mg/Kg	-	4331,50	3916,07	3864,65	8161,87
Cobre (Cu)	mg/Kg	-	17279,26	18105,52	17242,21	17112,20
Bario (Ba)	mg/Kg	-	43,95	47,96	43,96	45,96
Cobalto (Co)	mg/Kg	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Molibdeno (Mo)	mg/Kg	-	371965,84	370467,63	370863,31	389419,49
Estroncio (Sr)	mg/Kg	-	55,93	43,96	47,96	57,96

## ANEXO D: Ensayos realizados en el laboratorio

### ANEXO D1: Preparación del hidróxido de sodio a 0,2 M; 0,6 M y 1,2 M.

De la fórmula de molaridad, se calcula la masa requerida de NaOH para la preparación de 1 Litro con una molaridad de 1,2 M.

$$M = \frac{m/PM}{V}$$

$$m_{NaOH} = M * PM * V$$

$$m_{NaOH} = 1,2 \frac{mol}{Litro} * 40 \frac{gramos}{mol} * 1Litro$$

$$m_{NaOH} = 60 \text{ gramos}$$

Debido a que el hidróxido de sodio es higroscópico, esto quiere decir que absorbe el agua se realizó con mucho cuidado ya que el hidróxido de sodio es corrosivo y puede causar quemaduras químicas.

De igual forma se realiza el cálculo para la preparación a las molaridades de 0,2 M y 0,6 M:

- Para 1 Litro de NaOH a 0,2 Molar:

$$M = \frac{m/PM}{V}$$

$$m_{NaOH} = M * PM * V$$

$$m_{NaOH} = 0,2 \frac{mol}{Litro} * 40 \frac{gramos}{mol} * 1Litro$$

$$m_{NaOH} = 8 \text{ gramos}$$

- Para 1 Litro de NaOH a 0,6 Molar:

$$M = \frac{m/PM}{V}$$

$$m_{NaOH} = M * PM * V$$

$$m_{NaOH} = 0,6 \frac{mol}{Litro} * 40 \frac{gramos}{mol} * 1 Litro$$

$$m_{NaOH} = 24 \text{ gramos}$$

**Figura D1: Fiolas con hidróxido de sodio a diferentes concentraciones.**



### **ANEXO D2: Estandarización del hidróxido de sodio**

- Se enjuagó la bureta con la solución de NaOH, luego se cargó la bureta con el NaOH asegurándose de no dejar burbujas en la punta de la bureta.
- Se pesó una porción del ftalato ácido de potasio (KHC<sub>8</sub>H<sub>4</sub>O<sub>4</sub>), se transfirió y disolvió en un Erlenmeyer de 250 mL con agua destilada. Se añadió 4 – 5 gotas de fenolftaleína.
- Se tituló con NaOH agitando con rotación hasta observar el color rosa pálido.

Se reemplaza en la siguiente formula los valores obtenidos:

$$Molaridad_{NaOH} = \frac{gramos_{KHP}}{Peso Molecular_{KHP} * Volumen_{NaOH}}$$

Se obtuvo los siguientes datos:

**Tabla D2**

*Estandarización del hidróxido de sodio*

Estandarización del NaOH				
Molaridad aproximada del NaOH	Peso del ftalato ácido de potasio (gramos)	Volumen Gastado (L)	Molaridad calculada del NaOH	Molaridad promedio calculada del NaOH
1,2	1,3929	0,0057	1,196	1,199
	1,3773	0,0056	1,204	
	1,453	0,0055	1,198	
0,6	0,8745	0,0071	0,603	0,605
	0,8589	0,0069	0,609	
	0,8498	0,0069	0,603	
0,2	0,2075	0,0049	0,207	0,208
	0,2107	0,0049	0,210	
	0,2061	0,0049	0,206	

**Figura D1: Titulación del ftalato ácido de potasio con hidróxido de sodio 1,2 N**



Figura D2: Titulación del ftalato ácido de potasio con hidróxido de sodio 0,6 N



## ANEXO E: Costos de la lixiviación alcalina en los diferentes experimentos

Se toma como ejemplo el experimento N°1:

### ANEXO E1: Costo del hidróxido de sodio 0,2 N

- En el experimento se usa una relación líquido/ sólido de 3 mL/g.
- Se toma un nivel de pureza del hidróxido de sodio de 98 %.
- El precio de 1 Kg de hidróxido de sodio es de S/.10.
- Se emplea en cada experimento 0,75 L y 0,25 gramos de concentrado bulk de molibdeno.
- El costo de la soda es de S/. 10 por cada Kilogramo.

$$Costo_{NaOH} = 0,2 \frac{mol}{L} * \frac{0,75 L}{1} * \frac{40 gramos}{1 mol} * \frac{100\%}{98\%} * \frac{S/.10}{1000 gramos}$$

$$Costo_{NaOH} = S/. 0,0612$$

### ANEXO E2: Costo de la electricidad empleada elevada a 30 °C

- Capacidad calorífica del concentrado bulk de molibdeno es de 65,64 J/kg\*°C
- La temperatura inicial del concentrado bulk de molibdeno fue de 20°C.
- El precio de kWh de electricidad es de S/. 0,80.
- La energía eléctrica tiene una eficiencia de 40%.

$$Costo_{Elect.} = 1 Kg * \frac{65,64 J}{Kg * °C} * \frac{1 KJ}{1000 J} * \frac{1 Kh - h}{3600 KJ} * \frac{S/.0,8}{1 Kh - h} * (30 - 20) °C * 1,4$$

$$Costo_{Elect.} = S/. 0,0002$$

### ANEXO E3: Costo de la penalidad

- Inicialmente el concentrado bulk de molibdeno tiene 81661,87 ppm de arsénico.
- En el experimento N°1 se logra disminuir el contenido de arsénico hasta 4983,64 ppm de arsénico; esto quiere decir que un concentrado no comercializable lo vuelve comerciable ya que el contenido de arsénico es menor a los 5000 ppm.

- De acuerdo a los contratos por cada 0,1 % de arsénico que supere el 0,2 % se paga una multa de US\$ 5,0. En soles sería S/. 20.

$$Costo_{Penalidad} = 0,25 \text{ Kg} * [As_{final}] - 2000 \text{ ppm}] * \frac{S/.20}{1000 \text{ ppm} * 1TM} * \frac{1TM}{1000 \text{ Kg}}$$

$$Costo_{Penalidad} = 0,25 \text{ Kg} * [4983,64 - 2000] \text{ ppm} * \frac{S/.20}{1000 \text{ ppm} * 1TM} * \frac{1TM}{1000 \text{ Kg}}$$

$$Costo_{Penalidad} = 2983,64 \text{ ppm} * \frac{S/.20}{1000 \text{ ppm} * 1TM} * \frac{1TM}{1000 \text{ Kg}}$$

$$Costo_{Penalidad} = S/.0,015$$

#### **ANEXO E4: Ganancia de no reproceso el concentrado bulk de molibdeno**

- Debido a que no se va a reprocesar el concentrado bulk de molibdeno se genera una ganancia de S/. 485 por 1 tonelada; eso quiere decir que por los 0,250 gramos de muestra se genera una ganancia de S/0.1213.

$$Ganancia_{No \text{ reproceso}} = 0,25 \text{ Kg} * \frac{S/. 485}{1 \text{ TM}} * \frac{1 \text{ TM}}{1000 \text{ Kg}}$$

$$Ganancia_{No \text{ reproceso}} = S/.0,1213$$

#### **ANEXO E5: Beneficio total del experimento N°1**

Se tiene como ganancia del no reproceso un valor de S/.0,1213.

Se suman todos los costos:

- Costo de hidróxido de sodio = S/. 0,0612
- Costo de electricidad = S/. 0,0002
- Costo de penalidad = S/. 0,015

$$\mathbf{Beneficio = Ganancia - Costos}$$

$$\mathbf{Beneficio = 0,1213 - (0,0612 + 0,0002 + 0,0015)}$$

$$\mathbf{Beneficio = S/.0,0449}$$

**ANEXO E6: Costos en la lixiviación alcalina en los diferentes experimentos**

<b>Experimento</b>	<b>% Remoción</b>	<b>Ahorro por Reproceso</b>	<b>Costo de Soda</b>	<b>Costo de Electricidad</b>	<b>Costo de penalidad</b>	<b>Costo Total</b>	<b>Beneficio</b>	<b>Rentabilidad / unidad de costo</b>
<b>1</b>	38,94	0,1213	0,0612	0,0002	0,0150	0,0764	0,0449	868,78
<b>2</b>	45,65	0,1213	0,1837	0,0002	0,0150	0,1989	-0,0776	-588,06
<b>3</b>	47,74	0,1213	0,3673	0,0002	0,0150	0,3826	-0,2613	- 182,70
<b>4</b>	42,42	0,1213	0,0612	0,0005	0,0150	0,0767	0,0445	953,03
<b>5</b>	47,67	0,1213	0,1837	0,0005	0,0150	0,1992	-0,0779	- 611,73
<b>6</b>	49,14	0,1213	0,3673	0,0005	0,0150	0,3829	-0,2616	- 187,85
<b>7</b>	46,93	0,1213	0,0612	0,0008	0,0150	0,0770	0,0442	1061,56
<b>8</b>	52,02	0,1213	0,1837	0,0008	0,0100	0,1945	-0,0732	- 710,26
<b>9</b>	52,65	0,1213	0,3673	0,0008	0,0100	0,3782	-0,2569	- 204,93

## ANEXO F: Matriz de consistencia.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLE E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>PROBLEMA GENERAL</b> ¿Cuáles serán los parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina?</p> <p><b>Problemas Específicos</b> - ¿Qué interacción existe entre los parámetros operacionales tales como temperatura, dosificación de NaOH, tiempo de contacto y agitación; que permita establecer una condición óptima para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina? - ¿Será viable la lixiviación alcalina con NaOH para remover selectivamente el arsénico en un concentrado bulk de molibdeno sin disolver cantidades significativas de molibdeno? - ¿Será rentable emplear la lixiviación alcalina para la remoción del arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b> Determinar los parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b> - Establecer la interacción entre los parámetros operacionales tales como temperatura, dosificación de NaOH, tiempo de contacto y agitación; que permita establecer una condición óptima para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina. - Evaluar la viabilidad de la lixiviación alcalina con NaOH para remover selectivamente el arsénico de un concentrado bulk de molibdeno sin disolver cantidades significativas de molibdeno. - Analizar la rentabilidad de emplear la lixiviación alcalina para la remoción del arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno.</p>	<p><b>HIPÓTESIS GENERAL</b> Existe un conjunto óptimo de parámetros operacionales para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina.</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b> - La interacción entre la temperatura, dosificación de NaOH, tiempo de contacto y la agitación influyen significativamente en la eficiencia de la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno. - Es viable la lixiviación alcalina con NaOH para remover selectivamente el arsénico de un concentrado bulk de molibdeno, sin disolver o afectar en 5% el contenido de molibdeno presente en el concentrado. - Es rentable emplear la lixiviación alcalina para la remoción del arsénico presente en un concentrado bulk de molibdeno.</p>	<p><b>Variable Independiente</b> - Temperatura. - Concentración de agente lixivante (NaOH). - Velocidad de agitación. - Tiempo de contacto.</p> <p><b>Indicador</b> - Temperatura del sistema (°C). - Molaridad de agente lixivante (mol/L). - Revoluciones por minuto (RPM). - Tiempo de contacto (minutos).</p> <p><b>Variable Dependiente</b> Remoción de arsénico.</p> <p><b>Indicador:</b> - Concentración del arsénico antes y después del tratamiento</p> <p><b>Variables de control</b> - Concentrado de molibdeno homogenizado. - Tipo de agente lixivante. - Relación líquido/sólido.</p>	<p><b>Tipo de Investigación:</b> Experimental</p> <p><b>Nivel de Investigación:</b> Explicativo</p> <p><b>Muestra:</b> 9 muestras de 500 gramos de concentrado un concentrado bulk de 2molibdeno</p> <p><b>Técnicas de recolección de datos</b> - Formato de resultados de pruebas fisicoquímicas (%humedad, color, densidad, entre otros) del concentrado de molibdeno. - Formatos de resultado de ensayos en laboratorio de lixiviación alcalina, variando los parámetros de temperatura, concentración del agente lixivante, velocidad de agitación y tiempo de contacto. - Informe del laboratorio del análisis de molibdeno y arsénico del concentrado bulk de molibdeno en las muestras (antes y después del proceso de lixiviación alcalina).</p> <p><b>Instrumentos de recolección de datos</b> - Termómetro digital o sensor de temperatura. - Agitador magnético o mecánico con tacómetro. - Balanza analítica.</p> <p><b>Técnica de procesamiento</b> - Observación y análisis de los resultados de la prueba de lixiviación alcalina. - Se empleará la prueba estadística de análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existen interacciones significativas - Se emplearán herramientas computacionales como Excel, SPSS, para analizar los resultados obtenidos.</p>

## ANEXO G: Operacionalización de Variables

Variable	Tipo de Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de Medición
<b>Temperatura.</b>	Independiente	Grado de calor aplicado durante la lixiviación.	Nivel térmico.	Temperatura del sistema (°C).	Termómetro digital o sensor de temperatura. (Formato de Ensayos)
<b>Concentración de agente lixivante (NaOH)</b>	Independiente	Cantidad de NaOH presente en la solución lixivante. Frecuencia con la que se mezcla la solución para aumentar el área de contacto.	Concentración química.	Molaridad del NaOH (mol/L)	Bureta, balanza analítica, vaso aforado. (Formato de Ensayos)
<b>Velocidad de agitación.</b>	Independiente	Tiempo durante el cual el cual se realiza la lixiviación.	Movimiento mecánico.	Revoluciones por minuto (rpm)	Agitador magnético o mecánico con tacómetro. (Formato de Ensayos)
<b>Tiempo de contacto.</b>	Independiente	Reducción de la concentración de arsénico en el concentrado bulk después de la lixiviación alcalina.	Duración del proceso.	Tiempo total de reacción (min)	Cronómetro. (Formato de Ensayos)
<b>Remoción de arsénico.</b>	Dependiente		Eficiencia de remoción	Concentración del arsénico antes y después (mg/L)	Espectrofotómetro de adsorción atómica (AAS) o ICP-MS. (Informe de laboratorio)

**ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:**

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

**Determinación de parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina**

**Expositor: Yuliano Andre Robles Bedrillana**  
**Bachiller en Ingeniería Química**

Expediente N° 2567373 Resolución Decanal N° 184-2025-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 02-12-2025

En la Sala de Conferencia "Pedro Villena Hidalgo" de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, ubicada en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (H-121), siendo las diez de la mañana con cinco minutos del día jueves cuatro de diciembre del año dos mil veinticinco, se reunieron el Bachiller en Ingeniería Química **Yuliano Andre Robles Bedrillana**, los Docentes Miembros del Jurado de Sustentación Ingenieros: Mg. Aníbal Pablo GARCIA BENDEZU, Mg. Alfredo TORRES GARAY (Miembros) y Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA (Miembro-Asesor), bajo la Presidencia del Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA (Decano de la FIQM), el Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE (Secretario-Docente).

Acto seguido, el Presidente del Jurado de Sustentación dispuso que el Secretario Docente dé lectura a los antecedentes tramitados para el presente Acto Público de Sustentación de la Tesis: **Determinación de parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina**, presentado por el Bachiller **Yuliano Andre Robles Bedrillana**. A continuación, el Secretario-Docente procedió a dar lectura a la Resolución Decanal N° 184-2025-UNSCH-FIQM/D.

Luego, el Presidente del Jurado invitó al Bachiller **Yuliano Andre Robles Bedrillana**, a pasar al estrado y exponer su trabajo de Tesis en un tiempo máximo de treinta y cinco minutos.

Finalizado la exposición del Bachiller, el presidente invitó a los Señores Miembros del Jurado de Sustentación a que formulen sus preguntas y señalen sus observaciones, en el siguiente orden: Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA (Miembro-Asesor), Mg. Alfredo TORRES GARAY y Mg. Aníbal Pablo GARCIA BENDEZU (Miembros).

A continuación, el presidente del jurado invito al sustentante y al público para que se sirva abandonar la sala de conferencia con la finalidad de permitir al jurado de sustentación deliberar sobre la evaluación a otorgar. Se alcanzó el siguiente resultado. **APROBADO POR UNANIMIDAD PROMEDIO QUINCE (15)**.



UNSCH

FACULTAD DE INGENIERÍA  
QUÍMICA Y  
METALURGIA

## ACTA DE SUSTENCIÓN DE LA TESIS:

(Reglamento de grados y títulos, aprobado con RCU N° 3403-2024-UNSCH-CU)

### Determinación de parámetros óptimos para la remoción de arsénico en un concentrado bulk de molibdeno mediante lixiviación alcalina

Expositor: Yuliano Andre Robles Bedrillana  
Bachiller en Ingeniería Química

Expediente N° 2567373


Resolución Decanal N° 184-2025-UNSCH-FIQM/D

Fecha: 02-12-2025

Finalmente, el Presidente del Jurado dispuso que se invite al Sustentante y al público asistente a que se sirvan ingresar a la sala de conferencias y anunció que, el Bachiller **Yuliano Andre Robles Bedrillana**, ha resultado **APROBADO POR UNANIMIDAD**, y por lo tanto a partir de la fecha la Universidad y la Facultad cuenta con un flamante **INGENIERO QUIMICO** y le augura éxitos en su desempeño profesional.

Siendo las once de la mañana con cincuenta minutos se dio por finalizado este acto académico de Sustentación de Tesis. En fe de lo cual firmamos:

  
.....  
Dr. Agustín Julián PORTUGUEZ MAURTUA  
Presidente

  
.....  
Mg. Aníbal Pablo GARCIA BENDEZU  
Miembro

  
.....  
Mg. Alfredo TORRES GARAY  
Miembro

  
.....  
Mg. Luis Alberto COSSIO HERRERA  
(Miembro-Asesor)

  
.....  
Mg. Fredy Rober PARIONA ESCALANTE  
(Secretario Docente)



**UNSCH**

FACULTAD DE  
INGENIERÍA QUÍMICA Y  
METALURGIA

ESCUELA PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA QUÍMICA

**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 012-2025-UNSCH-FIQM/EPIQ**

El que suscribe, Director de la **Escuela Profesional de Ingeniería Química** de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, emite la siguiente:

**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD**

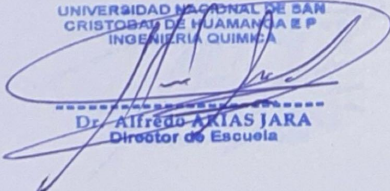
Que, habiendo recibido el requerimiento de Constancia de Originalidad por parte del Bachiller **Yuliano Andre ROBLES BEDRILLANA**, se procedió a la evaluación y regularización de originalidad del archivo adjunto con el **TURNITIN - UNSCH**, de acuerdo a los criterios establecidos en el **Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la UNSCH**, aprobado con Resolución del Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU; cuyos resultados son:

**Determinación de parámetros óptimos para la remoción de Arsénico en un concentrado bulk de Molibdeno mediante lixiviación alcalina.**

**Autor Bach. : Yuliano Andre ROBLES BEDRILLANA**  
**Identificado : 2849736258**  
**Fecha : 19 de diciembre de 2025**  
**Archivo : Tesis**

Se expide la presente constancia de originalidad, con reporte del **12 (doce) % de ÍNDICE DE SIMILITUD** realizado con **Depósito de trabajos estándar**, a fin de proseguir con los trámites pertinentes; cabe señalar que, los documentos del procedimiento se archivan en el repositorio documental de la Escuela.

**Ayacucho, 22 de diciembre de 2025**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN  
CRISTÓBAL DE HUAMANGA E P  
INGENIERÍA QUÍMICA  
  
-----  
**Dr. Alfredo ARIAS JARA**  
Director de Escuela

Adjunto Reporte de Índice de Similitud  
cc. archivo

ESCUELA PROFESIONAL DE  
INGENIERÍA QUÍMICA  
Av. Independencia S/N - Ayacucho  
Telf. 066-312510 Anexo. 152  
Correo:  
ep.quimica@unsch.edu.pe

# Determinación de parámetros óptimos para la remoción de Arsénico en un concentrado bulk de Molibdeno mediante lixiviación alcalina

*por* Yuliano Andre ROBLES BEDRILLANA

---

**Fecha de entrega:** 19-dic-2025 09:18p. m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2849736258

**Nombre del archivo:** s\_para\_la\_remoci\_n\_de\_Ars\_nico\_en\_un\_concentrado\_bulk\_de\_Mol.pdf (26.76M)

**Total de palabras:** 15711

**Total de caracteres:** 85316

# Determinación de parámetros óptimos para la remoción de Arsénico en un concentrado bulk de Molibdeno mediante lixiviación alcalina

## INFORME DE ORIGINALIDAD

<b>12%</b>	<b>12%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>cybertesis.unmsm.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>2</b>	<b>repositorio.undac.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>3</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>2%</b>
<b>4</b>	<b>repositorio.udec.cl</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>5</b>	<b>docplayer.es</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>6</b>	<b>publications.iadb.org</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>7</b>	<b>opac.pucv.cl</b> Fuente de Internet	<b>1%</b>
<b>8</b>	<b>primordial.cl</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>9</b>	<b>www.dipromin.com</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1%</b>
<b>10</b>	<b>Submitted to Universidad Católica de Santa María</b> Trabajo del estudiante	<b>&lt;1%</b>

11	<a href="http://vdocuments.mx">vdocuments.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://repositorio.unac.edu.pe">repositorio.unac.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://ninive.uaslp.mx">ninive.uaslp.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://repositorio.unjfsc.edu.pe">repositorio.unjfsc.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://worldwidescience.org">worldwidescience.org</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo