



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTOS OPERATIVOS EN EL
PROCESO DE FLOTACIÓN DE CASITERITA MEDIANTE LA
MODIFICACIÓN DE LA FORMULACIÓN DEL REACTIVO PL-
200**

TESIS

PRESENTADA POR:

BACH. ALAHIN FRANCO QUISPE QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALÚRGISTA

PUNO – PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTOS OPERATIVOS EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN DE CASITERITA MEDIANTE LA MODIFICACION

AUTOR

ALAHIN FRANCO QUISPE QUISPE

RECuento DE PALABRAS

20830 Words

RECuento DE CARACTERES

111709 Characters

RECuento DE PÁGINAS

103 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

1.8MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 19, 2024 12:12 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 19, 2024 12:13 PM GMT-5

● **2% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 1% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)


J. ALBERTO MAQUERA GIL
INGENIERO METALURGISTA
CIP. 23909



Dr. Hipólito Córdova Gutiérrez
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA

Resumen



DEDICATORIA

A mi padre, Mario Jose Quispe Quispe, por ser mi fuente de inspiración y fortaleza. Su esfuerzo, dedicación y amor incondicional me han guiado a lo largo de este camino. Esta tesis es un reflejo de los valores y enseñanzas que me ha inculcado. Gracias por siempre creer en mí y por ser mi ejemplo a seguir.

A mi madre, Luz Marina Quispe Quispe, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios interminables. Gracias por ser mi mayor fuente de inspiración y por enseñarme la importancia de la perseverancia y el amor. Esta tesis es un reflejo de todo lo que me has dado y de los valores que me has inculcado.

Con todo mi amor y gratitud,

Alahin Franco Quispe Quispe



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano Puno por brindarme la oportunidad de crecer tanto académica como personalmente. Agradezco a la Facultad de Ingeniería Metalúrgica y Geológica por su excelente formación y apoyo constante durante mi trayectoria académica.

Un agradecimiento especial a mi asesor, Alberto Maquera Gil, por su invaluable guía, paciencia y dedicación en la elaboración de esta tesis. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Alahin Franco Quispe Quispe



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1.1. Problema general.....	17
1.1.2. Problemas específicos.....	17
1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
1.3.1. Hipótesis general.....	18
1.3.2. Hipótesis específicas.....	18
1.4. OBJETIVOS.....	19
1.4.1. Objetivo principal.....	19
1.4.2. Objetivos específicos.....	19

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA



2.1.	ANTECEDENTES.....	20
2.2.	MARCO TEÓRICO	21
2.2.1.	Introducción a la minería del estaño	21
2.2.2.	Importancia económica del estaño	23
2.2.3.	Principales yacimientos y producción global.....	24
2.3.	CASITERITA: CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES	25
2.3.1.	Composición química y estructura cristalina	28
2.3.2.	Propiedades físicas relevantes para el proceso de flotación.....	29
2.4.	PROCESO DE FLOTACIÓN DE MINERALES.....	30
2.4.1.	Principios básicos de la flotación	30
2.4.2.	Factores que afectan la eficiencia de la flotación	32
2.5.	FLOTACIÓN DE CASITERITA	33
2.5.1.	Desafíos específicos en la flotación de casiterita	33
2.6.	REACTIVOS EN LA FLOTACIÓN DE CASITERITA	34
2.6.1.	Tipos de reactivos utilizados	35
2.6.2.	Función y mecanismo de acción del reactivo PL-200.....	36
2.6.2.1.	Aero Promoter – 845N	37
2.6.2.2.	Florrea	38
2.6.2.3.	Hidróxido de Sodio	39
2.6.3.	Rol del hidróxido de sodio (NaOH) en la formulación de reactivos	40
2.6.4.	Importancia del ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) en el proceso	42
2.7.	OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN PROCESOS DE FLOTACIÓN	44
2.7.1.	Estrategias generales para la reducción de costos operativos	44
2.7.2.	Estudios previos sobre optimización de reactivos en flotación.....	45



2.8. MÉTODOS DE DISEÑO EXPERIMENTAL EN METALURGIA	
EXTRACTIVA.....	46
2.8.1. Diseños factoriales y sus aplicaciones	46
2.8.2. Aplicaciones Prácticas en la Minería de Casiterita	47
2.8.3. Diseño hexagonal: principios y ventajas	48
2.8.3.1. Principios del Diseño Hexagonal	48
2.8.3.2. Ventajas del Diseño Hexagonal	49
2.8.3.3. Aplicaciones Prácticas.....	51
2.9. ANÁLISIS ECONÓMICO EN LA INDUSTRIA MINERA.....	52
2.9.1. Métodos de evaluación económica de procesos mineros.....	52
2.9.2. Impacto de la optimización de reactivos en la rentabilidad	53
2.10. TENDENCIAS ACTUALES Y FUTURAS EN LA FLOTACIÓN DE	
CASITERITA.....	54
2.10.1. Innovaciones tecnológicas recientes	54
2.10.2. Perspectivas de sostenibilidad y eficiencia energética	55
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. MATERIAL DE LABORATORIO:.....	56
3.1.1. Equipos.....	56
3.1.2. Reactivos	57
3.1.3. Software	57
3.2. MÉTODOS	58
3.2.1. Determinación del porcentaje óptimo de NaOH en la formulación del reactivo PL-200:.....	58



3.2.2. Evaluación del efecto del porcentaje de reactivo PL-200 por tonelada de mineral:.....	58
3.2.3. Comparación de resultados:	58
3.2.4. Análisis del impacto de la variación en la dosificación de silicato	59
3.2.5. Análisis comparativo de costos.....	59
3.2.3.1. Análisis Estadístico	59
3.3. PROCEDIMIENTO.....	60

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS.....	65
4.1.1. Primeras consideraciones de las pruebas	65
4.1.2. Resultados de las 7 pruebas de frotación	70
4.1.3. Análisis del impacto de la variación en el consumo de H ₂ SO ₄	76
4.2. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL PORCENTAJE DE REACTIVO PL-200 POR TONELADA DE SILICATO Y DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE NAOH.....	80
4.3. DIAGRAMA DE PARETO PARA LA FLOTACIÓN.....	84
4.4. DISEÑO HEXAGONAL PARA COMPARACIÓN DE CONSUMO DE REACTIVO	85
4.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS.....	90
V. CONCLUSIONES.....	95
VI. RECOMENDACIONES.....	96
ANEXOS.....	100

Área : METALURGIA EXTRACTIVA.

Tema : FLOTACIÓN.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 de septiembre del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Análisis cualitativo del relave procedente de la gravimetría	27
Tabla 2 Propiedades físicas de Aero Promoter - 845N.....	38
Tabla 3 Propiedades físicas de Florrea.....	39
Tabla 4 Propiedades físicas del Hidróxido de Sodio	40
Tabla 5 Parámetros del proceso	67
Tabla 6 Cuadro metalúrgico.....	67
Tabla 7 Consumo y dosificación de reactivos en las 7 pruebas	69
Tabla 8 Resultados con las diferentes pruebas y teniendo en cuenta diferentes aspectos	73
Tabla 9 Consumo de H ₂ SO	76
Tabla 10 Diseño Hexagonal.....	87
Tabla 11 Tabla de ajustes estadísticos	88
Tabla 12 Análisis de varianza	88
Tabla 13 ANOVA.....	88
Tabla 14 Comparación del consumo de NaOH con los datos de planta.....	90



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Lingotes de estaño	22
Figura 2 Efecto de la concentración del ácido sulfúrico con respecto a la recuperación de un mineral	43
Figura 3 Flowsheet del proceso metalúrgico	66
Figura 4 Porcentaje de recuperación en las diferentes pruebas.....	75
Figura 5 Silicato en función del consumo de H ₂ SO ₄	78
Figura 6 NaOH en función del consumo H ₂ SO ₄	79
Figura 7 Grafica de efectos para el porcentaje de recuperación por el silicato y NaOH	80
Figura 8 Grafica de superficie de %Rec. Sn en función del NaOH y el silicato	81
Figura 9 Grafica de contornos de comparación de recuperación del NaOH, y el Silicato	82
Figura 10 Porcentaje máximo de recuperación de teniendo en cuenta el silicato y el NaOH.....	83
Figura 11 Diagrama de Pareto de efecto estandarizados	85
Figura 12 Concentración de NaOH en función del consumo de H ₂ SO ₄	92



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 Hoja de seguridad de Silifluoruro sodio	100
ANEXO 2 Hoja de seguridad de Acido oxálico	101
ANEXO 3 Hoja de seguridad de xantato isopropílico de sodio	102
ANEXO 4 Hoja de seguridad de Ácido sulfúrico	103
ANEXO 5 Hoja de seguridad de Silicato de sodio.....	104
ANEXO 6 Hoja de seguridad de Hexafluorosilicato de sodio	105
ANEXO 7 Hoja de seguridad de hidróxido de sodio	106



ACRÓNIMOS

ANOVA:	Análisis de Varianza
As:	Arsénico
Bi:	Bismuto
C.E.:	Conductividad Eléctrica
CCD:	Diseño Central Compuesto (Central Composite Design)
CI:	Intervalo de Confianza (Confidence Interval)
Cu:	Intervalo de Confianza (Confidence Interval)
Cu:	Cobre
DOE:	Diseño de Experimentos (Design of Experiments)
DO:	Demanda de Oxígeno
Excel:	Software de hoja de cálculo
F:	Valor crítico de F en ANOVA
Fe:	Hierro
g/ton:	Gramos por Tonelada
g:	Gramo
G.e:	Gravedad específica
H ₂ SO ₄ :	Ácido Sulfúrico
IC:	Inyección de Carbono
L:	Litro
M:	Molaridad
Min:	Minuto
Minitab:	Software de análisis estadístico
MIBC:	Metil Isobutil Carbinol
ml:	Mililitro



NaOH:	Hidróxido de Sodio
Pb:	Plomo
P:	Valor de probabilidad en ANOVA
pH:	Potencial de Hidrógeno, medida de acidez o alcalinidad
PL-200:	Reactivo específico utilizado en el proceso de flotación
%:	Porcentaje
% Peso:	Porcentaje en Peso
% Rec. Sn:	Porcentaje de Recuperación de Estaño
% S:	Porcentaje de Azufre
R ² :	Coefficiente de Determinación
RPM:	Revoluciones por Minuto
s:	Segundo
Sn:	Símbolo químico del Estaño
SS:	Suma de los Cuadrados (Sum of Squares)
T:	Temperatura
TDS:	Total de Sólidos Disueltos
TS:	Total de Sólidos
Zn:	Zinc
Z-11:	Colector Z-11 utilizado en la flotación
μL:	Microlitro



RESUMEN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal optimizar el proceso de flotación de casiterita mediante la formulación y ajuste de reactivos, específicamente NaOH y silicato, para mejorar la eficiencia de recuperación y reducir los costos operativos sin necesidad de alterar significativamente las condiciones de disolución de los reactivos. Para lograr este objetivo, se plantean cuatro objetivos específicos: primero, determinar el porcentaje óptimo de NaOH en la preparación del reactivo PL-200 para garantizar la eficiencia en la recuperación de casiterita sin necesidad de alterar la temperatura de disolución de los reactivos; segundo, definir la dosificación adecuada de silicato para optimizar la preparación del reactivo PL-200, asegurando una saturación adecuada en el medio de flotación y logrando el grado de recuperación esperado; tercero, contrastar el consumo de NaOH y silicato en plantas convencionales mediante un diseño experimental hexagonal para realizar una comparación de los costos operativos en el proceso de flotación de casiterita; y cuarto, evaluar cómo la modificación en las concentraciones de casiterita, H_2SO_4 y NaOH influye en la eficiencia de recuperación y en los costos operativos del proceso de flotación. En esta tesis se investigarán dos variables clave: NaOH y silicato. Este estudio no solo busca reducir los costos operativos en la flotación de casiterita, sino también contribuir al desarrollo sostenible de la industria minera al proponer métodos más eficientes y económicos para la recuperación de minerales valiosos.

Palabras clave: Flotación, Casiterita, Costos operativos, Reactivo PL-200, Minería.



ABSTRACT

The main objective of this thesis is to optimize the cassiterite flotation process by formulating and adjusting reagents, specifically NaOH and silicate, to improve recovery efficiency and reduce operating costs without significantly altering the reagent dissolution conditions. To achieve this objective, four specific objectives are proposed: first, to determine the optimum percentage of NaOH in the preparation of PL-200 reagent to guarantee cassiterite recovery efficiency without the need to alter the reagent dissolution temperature; second, to define the appropriate dosage of silicate to optimize the preparation of PL-200 reagent, ensuring adequate saturation in the flotation medium and achieving the expected degree of recovery; third, to contrast the consumption of NaOH and silicate in conventional plants by means of a hexagonal experimental design to make a comparison of operating costs in the cassiterite flotation process; and fourth, to evaluate the impact of modifying the percentage of cassiterite, H_2SO_4 and NaOH on the recovery efficiency and operating costs of the flotation process. The two variables to be varied in this thesis will be NaOH and silicate. This study not only seeks to reduce operating costs in cassiterite flotation, but also to contribute to the sustainable development of the mining industry by proposing more efficient and economical methods for the recovery of valuable minerals.

Keywords: Flotation, Cassiterite, Operating costs, Reagent PL-200, Mining.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La casiterita es uno de los minerales de estaño más importantes y su recuperación eficiente es crucial para la industria minera. Sin embargo, el proceso de flotación de casiterita es conocido por ser costoso debido a la necesidad de utilizar reactivos químicos específicos en la preparación del reactivo PL-200. Los costos operativos elevados han llevado a la necesidad de explorar alternativas que permitan mantener la eficiencia del proceso mientras se reducen los costos asociados.

En el proceso tradicional, la preparación del reactivo PL-200 implica el uso de hidróxido de sodio (NaOH) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), los cuales son reactivos costosos y presentan desafíos logísticos y de manejo. Además, la dependencia de estos reactivos incrementa los costos operativos, afectando la rentabilidad de la operación minera. Ante esta situación, surge la necesidad de investigar métodos alternativos que puedan disminuir los costos sin comprometer la recuperación del mineral.

Diversos estudios han demostrado que la eficiencia del proceso de flotación puede mantenerse o incluso mejorarse mediante la optimización de las condiciones de operación y la modificación de los porcentajes de los reactivos utilizados. En este contexto, nuestra investigación se centra en evaluar la viabilidad de un procedimiento alternativo para la preparación de la mezcla de reactivos PL-200, específicamente mediante la modificación de los porcentajes de NaOH y silicato utilizados.

Esta investigación no solo pretende aportar una solución práctica a la reducción de costos operativos en la flotación de casiterita, sino también contribuir al desarrollo



sostenible de la industria minera al proponer métodos más eficientes y económicos para la recuperación de minerales valiosos.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de flotación de casiterita en la minería enfrenta desafíos en términos de eficiencia de recuperación y costos operativos. Es crucial formular y ajustar los reactivos, especialmente NaOH, silicato y H_2SO_4 , sin alterar significativamente las condiciones de disolución de los reactivos.

1.1.1. Problema general

¿Cómo influye el ajuste en las concentraciones de reactivos, específicamente NaOH, silicato y H_2SO_4 , en la eficiencia de recuperación y en la reducción de costos operativos del proceso de flotación de casiterita, sin necesidad de alterar significativamente las condiciones de disolución de los reactivos?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la concentración óptima de NaOH en la preparación del reactivo PL-200 para mejorar la eficiencia de recuperación?
- ¿Cuál es la dosificación adecuada de silicato para optimizar la preparación del reactivo PL-200?
- ¿Cómo comparar el consumo de NaOH y silicato en plantas convencionales mediante un diseño experimental hexagonal?
- ¿Cuál es el impacto de ajustar las concentraciones de casiterita y las dosificaciones de los aditivos químicos H_2SO_4 y NaOH en la eficiencia de recuperación de mineral y en los costos operativos del proceso de flotación?



1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación es necesaria para mejorar la eficiencia del proceso de flotación de casiterita, lo que puede llevar a una reducción significativa en los costos operativos y un incremento en la recuperación del mineral, beneficiando económicamente a la industria minera.

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

El ajuste preciso de las concentraciones de NaOH, silicato y H_2SO_4 en el proceso de flotación de casiterita incrementa significativamente la eficiencia de recuperación y reduce los costos operativos sin necesidad de alterar las condiciones de disolución de los reactivos.

1.3.2. Hipótesis específicas

- El ajuste del porcentaje de NaOH en la preparación del reactivo PL-200 incrementará la eficiencia en la recuperación de casiterita.
- La dosificación adecuada de silicato optimizará la preparación del reactivo PL-200 y mejorará la recuperación del mineral.
- Comparar el consumo de NaOH y silicato en plantas convencionales permitirá identificar oportunidades para reducir costos operativos.
- El ajuste en las concentraciones de casiterita y las dosificaciones de H_2SO_4 y NaOH influirá de manera significativa tanto en la eficiencia de recuperación del mineral como en la reducción o incremento de los costos operativos del proceso de flotación.



1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo principal

Es optimizar el proceso de flotación de casiterita mediante la formulación y ajuste de reactivos, específicamente NaOH, silicato y H₂SO₄, con el fin de mejorar la eficiencia de recuperación y reducir los costos operativos sin necesidad de alterar significativamente las condiciones de disolución de los reactivos

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la concentración óptima de NaOH en la preparación del reactivo PL-200 para garantizar la eficiencia en la recuperación de casiterita sin necesidad de alterar la temperatura de disolución de los reactivos.
- Definir la dosificación adecuada de silicato para optimizar la preparación del reactivo PL-200, asegurando una saturación adecuada en el medio de flotación y logrando el grado de recuperación esperado.
- Contrastar el consumo de NaOH y silicato en plantas convencionales mediante un diseño experimental hexagonal para realizar una comparación de los costos operativos en el proceso de flotación de casiterita.
- Evaluar el impacto de la variación en las concentraciones de aditivos químicos (H₂SO₄ y NaOH) y en el porcentaje de casiterita sobre la eficiencia de recuperación y los costos operativos en el proceso de flotación



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

La investigación de Apaza (2018) se enfoca en la evaluación del circuito de conminución y flotación de la planta concentradora de la empresa minera Minsur S.A. Los resultados obtenidos en la evaluación del circuito de conminución y flotación de la planta concentradora incluyen la caracterización de los elementos minerales asociados con la casiterita, el comportamiento mineralógico para la obtención de minerales de estaño mediante la concentración por flotación, y estudios comparativos de pruebas de flotación a nivel industrial. Se utilizaron pruebas de laboratorio para determinar la relación entre la granulometría y el tiempo de molienda, así como la flotación discontinua en celda de laboratorio para evaluar el comportamiento de los minerales en condiciones controladas. Las conclusiones de la evaluación apuntan a la necesidad de mejorar las recuperaciones de los elementos de interés y reducir los impactos ambientales. Se destaca la importancia de evaluar los circuitos de conminución y flotación para mejorar la eficiencia productiva del tratamiento de minerales, así como la operación productiva de la planta concentradora. Se recomienda la implementación de cambios en los circuitos y parámetros de flotación, así como la optimización de la molienda y la concentración por flotación para lograr mejoras en la eficiencia y la reducción de impactos ambientales. La metodología utilizada incluyó pruebas de laboratorio para caracterizar los elementos minerales, estudios de comparación de pruebas de flotación a nivel industrial, evaluación de la operación productiva de la planta concentradora, y flotación discontinua en celda de laboratorio para evaluar el comportamiento de los minerales en condiciones controladas. Estas metodologías permitieron obtener información relevante para la evaluación del



circuito de conminución y flotación, así como para proponer recomendaciones para su mejora.

En el trabajo de Deza (2022) se centra en optimizar el proceso de flotación de casiterita para mejorar la recuperación de estaño. La metodología empleada incluye la determinación de la concentración óptima y dosificación del reactivo PL200, así como pruebas de flotación con diferentes parámetros. Los resultados obtenidos incluyen análisis químicos cualitativos del mineral y pruebas de flotación. Las conclusiones específicas no están disponibles en el contenido proporcionado.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Introducción a la minería del estaño

La casiterita contiene una cantidad considerable de estaño, responsable de más del 85% de la composición total del elemento. El cobre era el componente predominante del bronce, que fue la primera aleación fabricada por el hombre. El porcentaje de estaño en el bronce variaba del tres al veinte por ciento, y el cobre era el componente principal de la aleación. A pesar de que existen pruebas de artefactos que se remontan al año 3300 a.C., como el hacha Miran Otzi, el uso de esta aleación fue muy crucial para los humanos ya que hubo un periodo de tiempo conocido como la Edad de Bronce, que tuvo lugar en el año 2000 a.C. La aleación de bronce fue reconocida por todas las civilizaciones que la descubrieron cuando se descubrió en los Alpes italianos en el año 1991. Se cree que es la aleación más imaginativa y grandiosa de la historia de la humanidad, y que es superior al hierro en prácticamente todos sus atributos, a excepción del acero. Esta es la razón por la que se cree que es superior al hierro. Entre los muchos usos que se le dan, destacan la fabricación de herramientas, armas y una amplia gama de materiales

para la construcción. Ejemplos de ello son los mosaicos y paneles ornamentales elaborados con piedra o calcopirita. La extraordinaria dureza y durabilidad de estos materiales les ha valido una reputación mundial. (Quispe & Herpanicca, 2022).

Figura 1

Lingotes de estaño



Nota. (Quispe & Herpanicca, 2022).

En el mineral hipógeno, los minerales casiterita, estannita y calcopirita se consideran los más significativos. Además, hay una cantidad traza de bismuto y plata, que se encuentra muy probablemente en la forma estructural tetraédrica. Esfalerita, galena enargita, estibina, quelita y wolframita son algunos de los otros minerales que incluyen carbono. La valmorfita es otro mineral que contiene carbono. Algunos ejemplos de minerales de ganga son la clorita cuarzosa, la sílice, la pirita, la arsenopirita, la turmalina, la calcita, la fluorita, la marcasita, la pirrotita, la rodocrosita, la siderita y la adularia. Otros ejemplos son la pirita, la arsenopirita y la turmalina. Es posible que se formen minerales secundarios como consecuencia de la oxidación o del enriquecimiento supergénico. Algunos ejemplos de minerales secundarios son la boronita, la calcosina, la covellita, la cuprita, la malaquita, el cobre nativo, la acantita en una ganga gótica, la limonita,



la pirolusita y el piromelano. Había una cantidad considerable de ellos en las regiones superiores de la veta San Rafael, así como en la veta kenamari.

2.2.2. Importancia económica del estaño

El estaño, elemento metálico del número atómico 50, desempeña un papel fundamental en la economía global contemporánea, trascendiendo su mera clasificación como commodity. Su relevancia económica se manifiesta en una multiplicidad de sectores industriales, donde sus propiedades únicas lo convierten en un componente insustituible. En la industria electrónica, el estaño es el protagonista silencioso de la revolución digital, siendo el componente principal en las soldaduras de baja temperatura utilizadas en la fabricación de circuitos impresos y dispositivos electrónicos de consumo. Esta aplicación, aparentemente modesta, sustenta la infraestructura tecnológica global, desde smartphones hasta satélites. Paralelamente, en el sector alimentario, el estaño se erige como guardián de la conservación, formando una barrera protectora en el interior de las latas de alimentos. Esta función, además de prolongar la vida útil de los productos, facilita su transporte y almacenamiento a escala global, contribuyendo significativamente a la seguridad alimentaria mundial y a la eficiencia logística del sector.

La versatilidad del estaño se extiende más allá de sus aplicaciones directas, manifestándose en su capacidad para formar asociaciones con propiedades excepcionales. El bronce, aleación milenaria de cobre y estaño, continúa siendo relevante en la industria moderna, encontrando aplicaciones en componentes que requieren resistencia a la corrosión y baja fricción. En la industria automotriz, las aleaciones de estaño son cruciales para la fabricación de cojinetes y otras piezas sometidas a alto estrés mecánico. Además, en el ámbito de la química industrial,



el estaño desempeña un papel catalítico en diversos procesos de síntesis orgánica, facilitando reacciones que son fundamentales para la producción de compuestos utilizados en farmacéutica y materiales avanzados. Esta diversidad de aplicaciones no solo asegura una demanda constante del metal, sino que también lo posiciona como un indicador económico de la salud industrial global (Torres, 2006).

2.2.3. Principales yacimientos y producción global

La geología del estaño dibuja un mapa global de distribución asimétrica, con concentraciones significativas en regiones específicas que han moldeado la geopolítica del metal a lo largo de la historia. El cinturón estannífero del Sudeste Asiático, que se extiende desde el sur de China hasta la península de Malaca, alberga los yacimientos más prolíficos del planeta. En esta región, las provincias chinas de Yunnan y Guangxi, junto con las islas indonesias de Bangka y Belitung, se erigen como bastiones de la producción mundial. Estos depósitos, formados hace millones de años por procesos hidrotermales asociados a intrusiones graníticas, se caracterizan por su alta ley y extensión. En el continente americano, la cordillera de los Andes acoge yacimientos significativos, principalmente en Perú y Bolivia. El yacimiento de San Rafael en Perú, situado a más de 4.500 metros sobre el nivel del mar, se distingue por ser uno de los depósitos de estaño más ricos del mundo, con leyes que superan el 4% de estaño en el mineral extraído.

La producción global de estaño es un reflejo de la complejidad geopolítica y económica del siglo XXI. China, líder indiscutible en la extracción y refinación de estaño, ha mantenido su posición dominante gracias a una combinación de vastas reservas y una robusta infraestructura industrial. Sin embargo, su hegemonía se ve desafiada por el resurgimiento de Indonesia como potencia productora, impulsada por políticas gubernamentales que promueven la



valorización local del mineral. La aparición de Myanmar en el escenario global del estaño ha introducido nuevas dinámicas en el mercado, aunque la sostenibilidad de su producción sigue siendo objeto de debate internacional. En Sudamérica, Perú ha consolidado su posición como productor de primer orden, beneficiándose de inversiones en tecnología y expansión de operaciones en yacimientos de clase mundial. Bolivia, pese a sus vastas reservas, enfrenta desafíos en la modernización de su sector minero, lo que ha limitado su capacidad para capitalizar plenamente su potencial estannífero (Torres, 2006).

2.3. CASITERITA: CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES

Uno de los componentes más importantes de la materia prima es el mineral de estaño del tipo filonio. El dióxido de estaño (SnO_2), que es la fórmula química de la casiterita, tiene un 78,6% de estaño y un 21,4% de oxígeno. Entre los elementos que componen la estannita, que es un mineral con la fórmula química $\text{S}_4 \text{Cu}_2 \text{Fe Sn}$, hay un 29,9% de estaño, un 29,5% de cobre, un 27,5% de estaño y un 13,1% de hierro. Sólo el mineral estannita se considera de importancia comercial sustancial. Debido a que es un componente crucial de las rocas ígneas y pegmatitas, sólo puede descubrirse en un número limitado de entornos. Por otra parte, los lugares más comunes para localizarla son los filones que están conectados con cuarzo o en las proximidades de rocas graníticas. Cuarzo, silicatos, pirita, arsenopirita, calcopirita, antimonita, blenda y fluorita son los principales minerales que se descubren cuando está presente en presencia de otros minerales. Además, la presencia de Fe, Mn, Nb y Ta hace que la casiterita tenga una gama de tonalidades que van prácticamente del negro al marrón. Todos estos colores tienen su origen en la presencia de estos elementos. La casiterita procedente del yacimiento de San Rafael no sólo se presenta en una amplia gama de formas y tamaños, sino también en diversas formas (Quispe V., 2019).



- Entre los compuestos responsables de la erosión de la casiterita acicular I, cuyo tamaño oscila entre 1 y 10 micras, se encuentran el cuarzo II, la calcopirita I, la piritita II y las cloritas.
- La casiterita masiva II, una colofoma de grano grueso que está conectada con la wolframita, se degrada debido a la presencia de clorita I y III, que son las responsables de la materia.
- Intercalados con la clorita III hay agregados radiales que también se conocen como casiterita III. Estos agregados son toscamente aciculares. Además de mostrar en ocasiones un aspecto columnar, cristaliza en el sistema tetragonal en forma de prismas y bipirámides. Las maclas, la adiamantina y el brillo submetálico son los tipos de cristales más comunes que puede encontrar una persona. La fragilidad, el clivaje incompleto, la fractura concoidea y un peso específico que oscila entre 6,8 y 7 son algunas de las características propias de este material. En ningún caso es magnético. Como consecuencia de que los estériles de la planta gravimétrica constituyen la materia prima, centramos nuestra investigación en ellos. Dentro de este estéril, mostramos una tabla que aporta información sobre la composición química de los componentes que están presentes además de la casiterita que allí se encuentra.



Tabla 1

Análisis cualitativo del relave procedente de la gravimetría

Elemento	Cantidad (%)
Sn	0.90
Cu	0.25
Fe	12.40
SiO ₂	59.00
S	1.47
Al	13.50
Mg	11.20
Na	0.18
Ca	0.20
Mn	0.15
B	0.12
Otros (Ti, As, Pb, Ag, Bi, Sb)	0.63

Nota. (Quispe V. , 2019).

Sobre la base de estos descubrimientos, es posible llegar a la conclusión de que los principales acompañantes del estaño en los estériles son esencialmente silicatos (Si, - Al, Mg) y compuestos de Fe. Estos compuestos incluyen óxidos (limonita, hematites o siderita) además de sulfuros como pirita (FeS₂) y calcopirita (CuFeS₂). El cuarzo Si O₂ y la clorita Si₃O₁₀ (Mg, Fe)₅ (Al, Fe³⁺)₂ OH₂ son los dos componentes que forman la ganga en la mayor parte de su composición. Otros componentes son el magnesio, el hierro, el aluminio y los iones de hierro. Para producir un concentrado de estaño de calidad superior, es esencial eliminar estos contaminantes en la medida necesaria. Como consecuencia de ello, es muy necesario realizar una acción de limpieza exhaustiva en la etapa previa a la flotación de la casiterita (Quispe V. , 2019).



2.3.1. Composición química y estructura cristalina

Según la tabla periódica, el estaño es un elemento metálico que aparece en la posición número 50. En cuanto a los minerales de estaño que se encuentran en la naturaleza, la casiterita (SnO_2), que es un óxido de estaño, es el más significativo. La casiterita presenta una estructura cristalina tetragonal, comparable a la del rutilo (TiO_2). Hay seis átomos de oxígeno que rodean a los átomos de estaño, formando una estructura octaédrica deformada. La estructura de la casiterita le confiere un alto grado de dureza y densidad, características esenciales para su comportamiento durante los procesos de separación.

La estannita ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$), que es un complejo de azufre, es uno de los minerales de estaño menos frecuentes. También están presentes otros minerales de estaño, como la casiterita. Dependiendo de la presencia de impurezas y componentes traza, la composición química de los minerales de estaño puede ser algo diferente entre sí. El mineral casiterita suele encontrarse en yacimientos con otros minerales, como cuarzo, turmalina, topacio y wolframita, entre otros. Debido a que las características de los minerales que están presentes en la mena tienen un efecto en la eficiencia de la separación, esta paragénesis mineral tiene un efecto en el comportamiento de la mena a lo largo de la etapa de procesamiento.

Durante la flotación, el comportamiento superficial de la casiterita está sustancialmente determinado por su estructura cristalina, así como por su composición química. Las cualidades hidrófilas naturales del material se deben a la presencia de enlaces Sn-O en su superficie. Para que la flotación de la casiterita tenga éxito, es necesario cambiar químicamente su superficie utilizando determinados reactivos colectores que adsorben preferentemente, transformando



así su naturaleza hidrófila en hidrófoba. Cuando se trata del proceso de flotación, es muy necesario conocer a fondo la química superficial de la casiterita para desarrollar esquemas de reactivos eficaces. (Gazaleeva et al.,2020).

2.3.2. Propiedades físicas relevantes para el proceso de flotación

La casiterita presenta una serie de características físicas que son esenciales para su comportamiento durante el proceso de flotación. Su elevada densidad, que puede variar entre 6,8 y 7,1 g/cm³, es una de las más esenciales. En los procedimientos gravimétricos que tienen lugar antes de la flotación, como la concentración en mesa o en espiral, la casiterita es capaz de separarse eficazmente debido a su propiedad especial. Sin embargo, cuando se trata de partículas micro o ultrafinas, la alta densidad puede ser un obstáculo durante la flotación. Esto se debe a que las burbujas de aire necesitan tener una flotabilidad adecuada para levantar las partículas minerales. Es importante señalar que la dureza de la casiterita, que oscila entre 6 y 7 en la escala de Mohs, influye en su comportamiento durante la molienda y en la formación de partículas ultrafinas, que pueden tener un efecto perjudicial en la selectividad de la flotación.

La naturaleza semiconductor de la casiterita es el atributo físico crucial. Esta propiedad tiene un efecto sobre la carga superficial del mineral mientras está en solución acuosa y, como resultado, influye en la forma en que el material interactúa con los reactivos de flotación. Cuando se trata de la adsorción de colectores y de la estabilidad de la suspensión mineral, el potencial zeta (δ) de la casiterita es un factor extremadamente importante. Este potencial es una medida de la carga eléctrica presente en el límite entre los estados sólido y líquido. En el informe se indica que se utilizó un espectrómetro electroacústico para realizar



mediciones del potencial zeta mientras se llevaba a cabo el proceso de flotación. Con la adición de diversos productos químicos, los resultados demostraron que el potencial zeta de la pulpa experimentó un cambio sustancial, lo que permitió ajustar las condiciones de flotación.

También existe una correlación entre la forma de las partículas de casiterita y su flotabilidad. En comparación con las partículas esféricas, las partículas con un mayor grado de angulosidad tienden a tener una mayor energía superficial y su capacidad para adsorber colectores es mayor. Además, la rugosidad de la superficie influye en el grado en que las partículas se adhieren a las burbujas de aire. Otra cuestión importante a tener en cuenta es el tamaño de las partículas. Las partículas demasiado pequeñas, de menos de 10 micrómetros, tienen pocas probabilidades de chocar con las burbujas, lo que dificulta su flotación. Por otro lado, las partículas gruesas pueden ser demasiado pesadas para ser levantadas con éxito. Cuando se trata de optimizar la recuperación del estaño en el proceso de flotación, la investigación subraya la importancia de controlar la distribución del tamaño de las partículas. (Gazaleeva et al.,2020).

2.4. PROCESO DE FLOTACIÓN DE MINERALES

2.4.1. Principios básicos de la flotación

El método de separación de minerales es un procedimiento fisicoquímico que aprovecha las diferencias en las propiedades superficiales de las partículas minerales. Este procedimiento incluye varios procesos diferentes, uno de los cuales es la flotación. Un concepto clave que sustenta el método es que es factible hacer hidrofóbicas algunas partículas minerales mediante el uso de ciertos compuestos que se conocen como colectores. La creación de un agregado



partícula-burbuja que asciende a la parte superior de la pulpa mineral es consecuencia de que estas partículas hidrofóbicas se adhieren preferentemente a las burbujas de aire que se introducen en la pulpa mineral. Tras la generación de una espuma mineralizada en esta etapa, se recoge el concentrado para su posterior procesamiento.

Para que el proceso de flotación sea eficaz, depende en gran medida de la alteración controlada de las propiedades superficiales de los minerales que constituyen el objetivo principal de la operación. La consecución de este objetivo requiere el uso de una serie de reactivos químicos distintos, cada uno de los cuales es responsable de una función específica. El término "colector" se refiere a moléculas orgánicas que se adsorben preferentemente en la superficie del mineral objetivo, convirtiendo así el material en hidrófobo. El estudio proporciona los casos de los colectores IM-50 y JKTM como ejemplos de colectores. La espuma y las burbujas de aire se estabilizan con la ayuda de espumógenos, como el T-80, que se utilizó en los experimentos analizados. Para ajustar el entorno químico de los purines y aumentar la selectividad del proceso, también es posible utilizar reguladores del pH y otros modificadores. Esta es una opción que puede considerarse.

En el proceso de flotación, la formación de complejos metal-adsorbente estables en la superficie del material se considera uno de los componentes más esenciales del proceso. Como resultado de la interacción entre el mineral y los reactivos IM-50 y JKTM, la superficie del mineral se altera con complejos estables que favorecen la hidrofobicidad del mineral y, como consecuencia, la flotabilidad del recipiente. Así lo determinan los resultados del estudio realizado sobre la casiterita. En el marco del proceso de flotación, esta interacción selectiva



actúa como base para la separación eficaz de los minerales valiosos de las sustancias de ganga en el contexto del proceso de flotación. (Matveeva y otros, 2019).

2.4.2. Factores que afectan la eficiencia de la flotación

Existe una gran variedad de características físicas, químicas y operativas que pueden influir en la eficacia de la flotación. El tamaño de las partículas es uno de los factores físicos que influye considerablemente en el resultado. El estudio hace referencia al uso de fracciones minerales que tienen un rango de tamaño de $-0,1 + 0,063$ mm, lo que subraya la necesidad de utilizar procedimientos de molienda adecuados para liberar los minerales y obtener un tamaño ideal para la flotación. Tanto la rugosidad de la superficie como la forma de las partículas influyen en su flotabilidad, que a su vez influye en la capacidad del reactivo para adsorberse a las burbujas de aire y adherirse a ellas.

Los componentes químicos son necesarios para que la flotación sea eficaz antes de que pueda considerarse un éxito. Los resultados de los experimentos IM-50 y JKTM indicaron que la recuperación y la selectividad del proceso se veían directamente afectadas por el tipo de reactivos que se utilizaban, así como por la dosificación de esos productos químicos. Como prueba de que el pH de la pulpa es otro componente significativo, los resultados del experimento demostraron que la flotación de casiterita se comportaba de forma diferente en medios ácidos, neutros y alcalinos. Esto demuestra que el pH de la pulpa es un componente importante. Además, existe una relación entre la eficacia del proceso y la composición mineralógica del mineral aurífero. Esto se debe a que la presencia de



determinados minerales puede interferir en el mecanismo de acción de los reactivos o competir entre sí por los lugares de adsorción.

El período de flotación, la velocidad de agitación, el diseño de la celda de flotación y el flujo de aire son ejemplos de aspectos operativos que hay que tener en cuenta. El informe hace referencia al contacto específico de los reactivos y a los tiempos de flotación, subrayando la necesidad de mejorar estos parámetros siempre que sea factible hacerlo. Además, el rendimiento de la operación puede verse influido significativamente por una serie de factores, como la temperatura, la densidad de la pulpa y la calidad del agua utilizada. Para conseguir la máxima recuperación y selectividad en la flotación de determinados minerales, como la casiterita, es necesario maximizar estas cualidades mediante el uso de un enfoque sistemático y experimental, como demuestran los resultados del estudio (Matveeva et al., 2019).

2.5. FLOTACIÓN DE CASITERITA

2.5.1. Desafíos específicos en la flotación de casiterita

La flotación de casiterita presenta múltiples desafíos específicos que impactan directamente la eficiencia y efectividad del proceso. Uno de los principales problemas es la necesidad de usar colectores específicos debido a la complejidad mineralógica de la casiterita, que a menudo se encuentra asociada a minerales de ganga como la calcita. La selectividad de los colectores convencionales, como el ácido oleico, es baja, lo que reduce la recuperación de casiterita. Además, la solubilidad de estos colectores a bajas temperaturas es pobre, lo cual afecta negativamente el rendimiento del proceso de flotación en ambientes fríos.



Otro desafío significativo es la cantidad considerable de reactivos necesarios para la flotación efectiva de la casiterita. La alta dosificación de reactivos como el silicato de sodio, utilizado comúnmente como depresor de la calcita, no solo encarece el proceso, sino que también plantea problemas ambientales debido a la dificultad para tratar el agua residual generada. El uso intensivo de estos reactivos puede llevar a problemas de sedimentación lenta y tratamiento complejo de residuos, lo que incrementa los costos operativos y la huella ambiental del proceso de flotación.

Para superar estos desafíos, se han desarrollado y probado nuevos esquemas de reactivos. Por ejemplo, el uso de ácido salicilhidroxámico (SHA) en combinación con activadores como el ion plomo ha demostrado mejorar la selectividad de la flotación de casiterita respecto a la calcita. Además, la incorporación de carboximetilcelulosa (CMC) como depresor ha mostrado resultados prometedores en la reducción de la recuperación de calcita sin afectar significativamente la recuperación de casiterita. Estos avances sugieren que la optimización de las condiciones de reactivos puede ofrecer una solución viable para mejorar la eficiencia de la flotación de casiterita, minimizando a su vez el impacto ambiental y los costos asociados (Tian et al.,2018).

2.6. REACTIVOS EN LA FLOTACIÓN DE CASITERITA

El método de flotación de la casiterita (SnO_2) hace uso de una amplia variedad de reactivos químicos con el fin de obtener la mayor separación posible del valioso mineral durante la etapa de flotación. Para modificar la superficie de la casiterita de modo que sea hidrófoba, los colectores, que incluyen ácidos hidroxámicos y ácidos grasos, son una necesidad vital. Además, se utilizan depresores para evitar la flotación de minerales no



deseados, espumantes para aumentar la estabilidad de las burbujas de aire y reguladores del pH para controlar las condiciones químicas de la pulpa. Todos estos procesos se llevan a cabo para garantizar que la pulpa se encuentre en un estado deseable. Para conseguir una recuperación óptima de la casiterita, aumentar su separación de la ganga y minimizar la pérdida de mineral valioso en los estériles, es necesario suministrar dosis específicas de estos productos químicos y combinar estos reactivos en las proporciones adecuadas (Ivánkov, Shubov, & Shcheglova, 1990).

2.6.1. Tipos de reactivos utilizados

Al adsorberse preferentemente en la superficie del mineral, los colectores en la flotación de casiterita revelan que el material tiene propiedades hidrófobas. Este es uno de los trabajos más esenciales que realizan los colectores en el proceso. Los ácidos hidroxámicos, como el IM-50, se encuentran entre los más utilizados debido a la alta selectividad que presentan para los óxidos de estaño dentro de su composición química. Esto lo consiguen formando complejos estables con iones de estaño en la superficie de la casiterita, lo que facilita que estas moléculas se adhieran a las burbujas de aire. Por otro lado, los ácidos grasos, como los que se producen a partir del tall oil (JKTM), también se utilizan como colectores eficaces, especialmente en entornos en los que el pH tiene un rango que va de neutro a alcalino. Para establecer cuál de estos tipos de colectores es la opción más adecuada, es necesario tener en cuenta las características específicas del mineral, así como las condiciones operativas que se dan a lo largo del proceso de flotación.

Los depresores contribuyen sustancialmente a la selectividad del proceso de diferentes maneras. Una de estas formas es que inhiben la flotación de minerales no deseados que tienen el potencial de contaminar el concentrado de



casiterita. El sulfato de aluminio es un material que puede emplearse para controlar la flotación de minerales arcillosos. El silicato de sodio, por otra parte, se utiliza a menudo con el objetivo de deprimir el cuarzo y otros silicatos. Ocasionalmente, se utilizan polisacáridos naturales o sintéticos como depresores orgánicos para mejorar la selectividad del proceso. Esto se hace para conseguir el efecto deseado. No sólo es vital tener en cuenta la composición mineralógica del mineral, sino que también es necesario tener en cuenta las interacciones específicas con los colectores que se necesitan para elegir el depresor adecuado.

Es muy necesario contar con productores de espuma para lograr el objetivo de desarrollar una espuma estable que sea capaz de transportar las partículas hidrofobizadas de casiterita a la superficie de la celda de flotación. Dado que alcoholes como el metil isobutil carbinol (MIBC) o los éteres de poliglicol tienen la capacidad de formar burbujas del tamaño requerido y de mantener la estabilidad de la espuma, es práctica común hacer uso de estas sustancias. Para evitar producir una espuma demasiado rígida, que podría atrapar partículas de ganga, o demasiado débil, incapaz de soportar el peso de las partículas minerales, es posible evitar producir una espuma demasiado rígida o demasiado débil. El proceso de alterar el pH de los purines implica el uso de diferentes reguladores del pH, dos ejemplos de los cuales son la cal y el carbonato sódico. Esto se debe a que el pH de los purines puede tener un impacto significativo en la eficacia de los colectores y en la selectividad del proceso (Ivánkov et al., 1990).

2.6.2. Función y mecanismo de acción del reactivo PL-200

Como parte de este esfuerzo de investigación, tenemos PL200, que se compone de hidróxido de sodio, que es bien conocido por su capacidad para



disolverse rápidamente en agua, Aero Promoter - 845N, y Florrea, que son reactivos colectores que tienen increíblemente grandes capacidades para la selectividad de estaño.

En la preparación del PL200 intervienen los siguientes componentes:

- 5 por ciento para el Aero Promotor, también conocido como AP-845N.
- Hay un 5% de los que son Florrea.
- Es una concentración de hidróxido de sodio que es 5,0%.

Es esencial que siga estos procedimientos para tener listo el PL200 revisado.

- Promotor Aeroespacial (AP-845N): El 6 por ciento
- 6% la Florrea
- Hay seis peróxidos de hidrógeno de sodio.

2.6.2.1. Aero Promoter – 845N

Dado que los colectores hidrosolubles son eficaces para recoger el óxido de estaño, se aconseja suministrarlos directamente al circuito de flotación. Este colector en particular es el que debe utilizarse en circunstancias en las que se requiera la máxima cantidad de recuperación de metal (Deza, 2022)

Tabla 2

Propiedades físicas de Aero Promoter - 845N

PROPIEDADES	VALOR
Aspecto	Líquido de la viscosidad baja
Punto de inflamación	No, flashea, hierve
Índice de evaporación	Similar al agua
Color	Ámbar
Olor	Como el jabón
Gravedad específica	1.13 a 20 °C
pH	7 – 9

Nota. (Deza, 2022)

2.6.2.2. Florrea

Fluorosilicato sódico y hexafluorosilicato sódico son otros dos nombres que recibe esta sustancia química en particular. El silicofluoruro sódico es otro nombre que recibe esta sustancia, que contiene ácido hexafluorosilícico y es una sal orgánica del ácido. Este material es un compuesto, y su fórmula química es Na_2SiF_6 . Está presente en el medio ambiente.

El silicofluor sódico tiene el aspecto de un polvo blanco con estructura cristalina. Éste es el aspecto físico de la sustancia. Tiene un olor característico y es soluble en agua, pero es insoluble en alcohol. El alcohol no la disuelve. Se produce por cristalización o precipitación como subproducto de la producción de ácido fosfórico a partir de cloruro de sodio y cloruro de silicio. La cristalización o precipitación es el otro método. En concreto, la precipitación es el mecanismo responsable de su producción.

El material es soluble hasta cierto punto en agua caliente y fría simultáneamente. No se disuelve con etanol. Utilizando una combinación

consistente en 150 partes de agua fría y 40 partes de agua caliente, es posible disolverlo.

La solubilidad del material en agua es de 0,649 gramos por cada cien gramos cuando la temperatura es de 20 grados Celsius; es de 0,769 gramos por cada cien gramos cuando la temperatura es de 25 grados Celsius; es de 1,27 gramos por cada cien gramos cuando la temperatura es de 50 grados Celsius; y es de 2,45 gramos por cada cien gramos cuando la temperatura es de 100 grados Celsius (Deza, 2022)

Tabla 3

Propiedades físicas de Florrea

PROPIEDADES	VALOR
Formula química	Na ₂ SiF ₆
Peso Molecular	188.06 g/mol
Estado Físico	Sólido (Polvo cristalino)
Color	Blanco
Olor	Inodoro
Gravedad específica	2.7(Agua=1)

Nota. (Deza, 2022)

2.6.2.3. Hidróxido de Sodio

Como consecuencia de su rápida absorción del dióxido de carbono y la humedad del aire (delirio), el hidróxido de sodio, también conocido como NaOH, es un sólido cristalino de color blanco, inodoro y cristalino. También se conoce como hidróxido de sodio. El término "sosa cáustica" es otro de sus nombres. La industria manufacturera hace un uso frecuente de sus productos. Genera una cantidad considerable de calor cuando se disuelve en agua o se neutraliza con ácidos, y este calor puede ser suficiente para provocar la ignición de materiales combustibles cuando



entran en contacto con el hidróxido presente en una solución al cincuenta por ciento.

Es una base muy reactiva que ataca a los metales (cinc, aluminio, cobre, plomo) y aleaciones (cobre, latón) cuando se utiliza como solución proporcionada al cincuenta por ciento en peso o como sólido que se comercializa en forma de gránulos, copos o escamas. También se utiliza como solución proporcional al cincuenta por ciento en espesor.

Como consecuencia de su interacción con los cloroetilenos, es posible producir compuestos explosivos como el dicloroacetileno. Sin embargo, la velocidad de reacción aumenta drásticamente a medida que aumenta la temperatura. Existen diversos compuestos que reaccionan lentamente con el hidróxido de sodio anhidro; sin embargo, la velocidad de reacción aumenta considerablemente (Deza, 2022)

Tabla 4

Propiedades físicas del Hidróxido de Sodio

PROPIEDADES	VALOR
Formula química	NaOH
Peso Molecular	40.0 g/mol
Estado Físico	Sólido blanco, delicuescente
Punto de fusión o congelación	319 °C
Punto de ebullición	1390 °C
Presión de Vapor	0; puro o anhidrido
pH	14; Solución 5%

Nota. (Deza, 2022)

2.6.3. Rol del hidróxido de sodio (NaOH) en la formulación de reactivos

El hidróxido de sodio (NaOH) desempeña un papel crucial en la formulación de reactivos debido a sus propiedades químicas únicas. En los



procesos industriales, el NaOH se utiliza comúnmente como agente alcalinizante para ajustar el pH de las soluciones. Este ajuste de pH es fundamental para optimizar las condiciones de las reacciones químicas y mejorar la eficiencia de los procesos de flotación. Al aumentar el pH, el NaOH ayuda a prevenir la precipitación de ciertos compuestos metálicos, permitiendo una separación más eficiente de los minerales valiosos de la ganga. Además, el NaOH puede actuar como dispersante, mejorando la estabilidad de las suspensiones y facilitando la separación de los componentes deseados.

La flotación de minerales es un ejemplo claro de cómo el NaOH se utiliza para optimizar los procesos de separación. En este contexto, el NaOH se añade para mantener un pH óptimo que favorece la adsorción selectiva de los reactivos colectores sobre las partículas de mineral. Este ajuste del pH es esencial para modificar la superficie de los minerales y aumentar la hidrofobicidad de las partículas de interés, lo que permite que se adhieran a las burbujas de aire y se eleven a la superficie en forma de espuma. Sin el uso adecuado de NaOH, el proceso de flotación sería menos eficiente, resultando en una menor recuperación de minerales valiosos y mayores pérdidas económicas.

Además de su papel en la flotación, el NaOH es vital en otros procesos de tratamiento de minerales. Por ejemplo, se utiliza en la lixiviación de minerales para disolver metales como el aluminio y el zinc, facilitando su extracción. En estos procesos, el NaOH ayuda a romper la estructura cristalina de los minerales, aumentando la solubilidad de los metales y mejorando la eficiencia de la extracción. Asimismo, el NaOH se emplea en la neutralización de ácidos residuales y la precipitación de impurezas, contribuyendo a la purificación de los metales extraídos. En resumen, el hidróxido de sodio es un componente



indispensable en la formulación de reactivos, desempeñando múltiples funciones que optimizan la eficiencia y rentabilidad de los procesos metalúrgicos (Inga et al., 2020).

2.6.4. Importancia del ácido sulfúrico (H_2SO_4) en el proceso

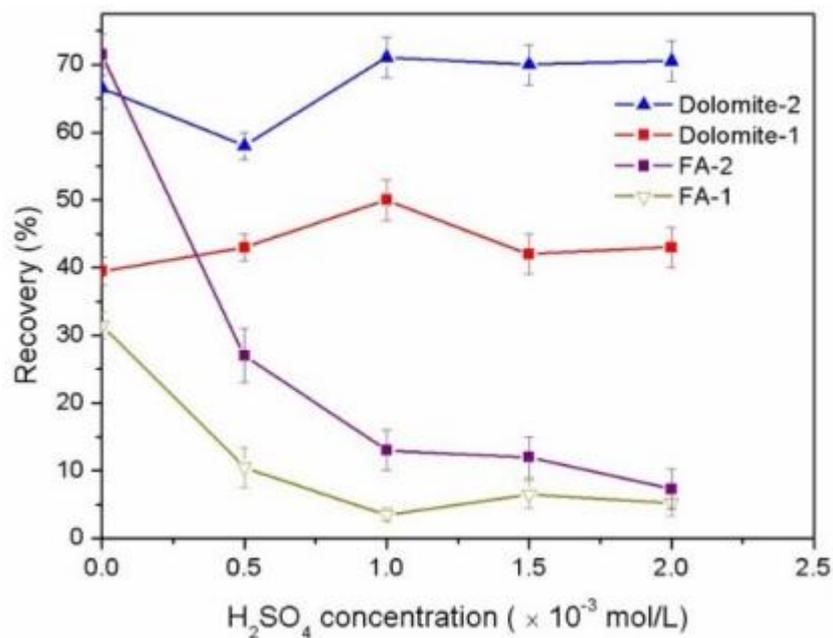
El ácido sulfúrico (H_2SO_4) es esencial en el proceso de recuperación de estaño a partir de casiterita, debido a su capacidad para descomponer y disolver minerales, facilitando la extracción de los metales valiosos. En el proceso de tostación de la casiterita, el ácido sulfúrico concentrado se utiliza para generar sulfato de estaño, lo que convierte al estaño en una forma soluble que puede ser fácilmente lixiviada con agua. Este paso es crucial para la separación eficiente del estaño del mineral, ya que permite que el metal se convierta en un compuesto más manejable para las etapas posteriores del proceso. Además, el uso de ácido sulfúrico ayuda a eliminar impurezas presentes en la casiterita, mejorando la pureza del producto final.

Una vez completada la tostación, la lixiviación con ácido sulfúrico disuelve el sulfato de estaño formado, resultando en una solución rica en estaño que puede ser tratada para la precipitación del metal. Durante esta etapa, el control del pH es vital para optimizar la solubilidad del estaño y minimizar la disolución de otras impurezas. La precipitación se realiza típicamente mediante la adición de agentes precipitantes específicos, que reaccionan con el estaño en solución para formar compuestos insolubles que pueden ser filtrados y recuperados. Este proceso de lixiviación y precipitación es fundamental para asegurar la alta pureza del estaño recuperado, lo que es crítico para su uso en aplicaciones industriales y tecnológicas.

Además, el ácido sulfúrico se emplea en la etapa final de purificación del estaño recuperado, eliminando trazas de otros metales y compuestos no deseados. Este paso garantiza que el estaño obtenido cumpla con los estándares de calidad requeridos para su utilización en diversas industrias, como la electrónica y la manufactura de aleaciones. La capacidad del ácido sulfúrico para interactuar con diferentes compuestos y facilitar la separación de componentes específicos lo convierte en un reactivo indispensable en la recuperación de minerales. En resumen, el ácido sulfúrico no solo optimiza la eficiencia del proceso de extracción de estaño de la casiterita, sino que también mejora la calidad del producto final, haciendo posible la producción de estaño de alta pureza para aplicaciones comerciales (Gu & Gao, 2021).

Figura 2

Efecto de la concentración del ácido sulfúrico con respecto a la recuperación de un mineral



Nota. (Heng et al.,2019)



2.7. OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN PROCESOS DE FLOTACIÓN

2.7.1. Estrategias generales para la reducción de costos operativos

La reducción de costos operativos en la minería, especialmente en la extracción de casiterita para obtener estaño, es un tema de gran relevancia debido a los altos costos asociados con las operaciones mineras. Una de las estrategias fundamentales para reducir estos costos es la optimización de las operaciones unitarias, particularmente en perforación y voladura. La implementación de estándares óptimos de trabajo en estas áreas puede generar significativos ahorros y mejorar la eficiencia operativa. Por ejemplo, al mejorar los procedimientos de perforación y voladura, se puede lograr una reducción del costo unitario de mina, lo que se traduce en un ahorro sustancial anual. Esto implica una adecuada supervisión y control de las operaciones, asegurando que se cumplan los diseños de malla de perforación y se optimice el uso de explosivos, lo cual es crucial para reducir los costos en la producción de estaño.

Otra estrategia clave es la capacitación continua del personal en técnicas avanzadas de perforación y voladura. La capacitación no solo mejora las habilidades de los trabajadores, sino que también aumenta la conciencia sobre la importancia de seguir procedimientos óptimos de trabajo. Esto resulta en una mayor productividad y seguridad en las operaciones mineras. Además, la motivación y retroalimentación constante al personal sobre los avances y resultados obtenidos contribuyen a un mejor desempeño y compromiso con los objetivos de reducción de costos. La creación de un entorno de trabajo que valore la eficiencia y la seguridad puede llevar a una disminución notable en los costos operativos, beneficiando así la viabilidad económica de la extracción de casiterita



para estaño. La aplicación de tecnologías avanzadas y prácticas innovadoras también juega un papel crucial en la reducción de costos operativos. El uso de equipos de perforación más eficientes y métodos de voladura más precisos puede disminuir el consumo de recursos y minimizar el desperdicio. Por ejemplo, la adopción de tecnologías de control y monitoreo en tiempo real permite una gestión más efectiva de las operaciones, reduciendo el riesgo de errores costosos. Asimismo, la optimización del ciclo de minado, que incluye la perforación, voladura, limpieza y acarreo, puede llevar a una mejora sustancial en la eficiencia operativa y una reducción de los costos totales. La combinación de estas estrategias puede hacer que la minería de casiterita sea más competitiva y sostenible en el largo plazo (Jáuregui, 2009).

2.7.2. Estudios previos sobre optimización de reactivos en flotación

La optimización de reactivos en el proceso de flotación de minerales se centra en mejorar la eficiencia y efectividad del proceso de separación de los minerales valiosos de la ganga. Esta técnica es especialmente relevante en la recuperación de minerales como el estaño, donde se busca maximizar la recuperación y calidad del concentrado mientras se minimiza el consumo de reactivos y costos operativos. En el contexto de la minería, la flotación es una técnica ampliamente utilizada debido a su capacidad para procesar grandes volúmenes de mineral a bajo costo. Sin embargo, el éxito de este proceso depende en gran medida de la selección y uso adecuado de los reactivos químicos, que incluyen colectores, espumantes y modificadores. Los colectores son sustancias que aumentan la hidrofobicidad de las partículas minerales, permitiendo que se adhieran a las burbujas de aire y sean llevadas a la superficie. Los espumantes, por su parte, facilitan la formación de una espuma estable que puede ser removida



fácilmente. Finalmente, los modificadores ajustan las condiciones del medio de flotación para mejorar la selectividad y eficiencia del proceso. Estudios previos han demostrado que el uso de reactivos alternativos puede mejorar significativamente los resultados de flotación. Por ejemplo, en el caso del mineral de estaño, la sustitución de colectores tradicionales por nuevos reactivos ha mostrado una mejor recuperación del mineral y una reducción en el consumo de reactivos. Además, la optimización del pH y la dosificación de reactivos son variables críticas que deben ser controladas cuidadosamente para lograr resultados óptimos. En resumen, la optimización de reactivos en la flotación es un campo dinámico que combina el conocimiento de la química de los reactivos con la ingeniería de procesos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones mineras (Román, 2018).

2.8. MÉTODOS DE DISEÑO EXPERIMENTAL EN METALURGIA EXTRACTIVA

2.8.1. Diseños factoriales y sus aplicaciones

Los diseños factoriales son esenciales para optimizar y comprender los procesos industriales, particularmente en la extracción de estaño de la casiterita. Estos diseños permiten estudiar varios factores simultáneamente y comprender sus interacciones, lo cual es crucial en la minería, donde múltiples variables pueden afectar significativamente los resultados. Por ejemplo, en la obtención de estaño, los diseños factoriales pueden ayudar a identificar las mejores condiciones de operación, como la temperatura, el tiempo de reacción y la concentración de reactivos, optimizando así la eficiencia del proceso y la pureza del producto final. La implementación de diseños factoriales en la investigación proporciona una



base sólida para tomar decisiones informadas, resultando en procesos más eficientes y sostenibles.

Una de las principales ventajas de los diseños factoriales es su capacidad para revelar interacciones entre factores que no serían evidentes si se estudiaran de manera aislada. En el contexto de la minería de casiterita, esto podría implicar la identificación de la mejor combinación de temperatura y concentración de reactivos para maximizar la recuperación de estaño. Además, estos diseños permiten reducir el número total de experimentos necesarios al proporcionar un enfoque sistemático para explorar el espacio experimental. Esto no solo ahorra tiempo y recursos, sino que también facilita una comprensión más profunda de cómo diferentes variables afectan el proceso de extracción. Por lo tanto, la implementación de diseños factoriales es una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia operativa y la calidad del producto en la industria minera.

2.8.2. Aplicaciones Prácticas en la Minería de Casiterita

Los diseños factoriales completos, como el diseño factorial 2^k , son ampliamente utilizados en la minería de casiterita. Este tipo de diseño involucra todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores investigados, permitiendo un análisis detallado de los efectos y sus interacciones. Por ejemplo, en un diseño factorial 2^3 , donde se estudian tres factores (temperatura, tiempo de reacción y concentración de reactivos) cada uno con dos niveles (alto y bajo), se realizarían ocho experimentos. Este enfoque permite analizar tanto los efectos principales de cada factor como las interacciones entre ellos, lo cual es crucial para optimizar el proceso de extracción de estaño. Los datos obtenidos de estos



experimentos pueden utilizarse para construir modelos predictivos que guíen las operaciones mineras, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos operativos.

En situaciones donde realizar un diseño factorial completo no es práctico debido al elevado número de experimentos necesarios, se pueden emplear diseños factoriales fraccionados. Estos diseños permiten estudiar un subconjunto de las combinaciones posibles, reduciendo así el número total de experimentos sin sacrificar demasiada información valiosa. En la minería de casiterita, los diseños factoriales fraccionados son especialmente útiles durante la fase inicial de exploración, donde el objetivo es identificar rápidamente los factores más importantes. Una vez identificados estos factores, se pueden realizar estudios más detallados utilizando diseños factoriales completos o diseños adicionales para refinar aún más las condiciones óptimas del proceso. Este enfoque secuencial no solo ahorra tiempo y recursos, sino que también proporciona una ruta clara hacia la optimización del proceso de extracción de estaño, maximizando la eficiencia y reduciendo los costos operativos a largo plazo.

2.8.3. Diseño hexagonal: principios y ventajas

2.8.3.1. Principios del Diseño Hexagonal

El diseño hexagonal se utiliza para optimizar varios parámetros simultáneamente, permitiendo una mejor comprensión de la interacción entre diferentes variables en un proceso experimental. En el contexto de la recuperación de minerales, este diseño es particularmente útil para identificar las condiciones óptimas de operación. Por ejemplo, en el tratamiento de casiterita para obtener estaño, el diseño hexagonal puede



ayudar a determinar las mejores condiciones para maximizar la pureza y rendimiento del mineral procesado.

Este diseño se basa en la creación de un conjunto de pruebas que exploran sistemáticamente diferentes combinaciones de variables, como la dosificación de reactivos y el tiempo de procesamiento. La aplicación del diseño hexagonal permite modelar la respuesta del sistema de manera más precisa, reduciendo la necesidad de realizar experimentos adicionales. Al realizar menos pruebas pero de manera más estratégica, se pueden obtener resultados significativos y fiables con una menor inversión de tiempo y recursos.

Uno de los principales beneficios del diseño hexagonal es su capacidad para revelar interacciones complejas entre variables. Por ejemplo, al ajustar simultáneamente la concentración de reactivos y el tiempo de molienda, es posible identificar combinaciones que no serían evidentes con un enfoque experimental más tradicional. Esta metodología no solo mejora la eficiencia del proceso sino que también permite un mejor control y optimización del mismo (Pérez & Franco, 2021).

2.8.3.2. Ventajas del Diseño Hexagonal

El diseño hexagonal ofrece varias ventajas significativas en la optimización de procesos industriales. Primero, permite la exploración de un espacio experimental más amplio con un número relativamente pequeño de experimentos. Esto es crucial en la industria minera, donde los costos de pruebas pueden ser prohibitivamente altos. Al utilizar un diseño hexagonal, se puede minimizar el número de experimentos necesarios para



encontrar las condiciones óptimas, reduciendo así tanto los costos como el tiempo de desarrollo.

Otra ventaja es la capacidad de este diseño para identificar interacciones entre múltiples factores. En el procesamiento de casiterita, variables como la temperatura, la concentración de reactivos y el tiempo de tratamiento pueden tener interacciones complejas que afectan el rendimiento final. El diseño hexagonal permite evaluar estas interacciones de manera eficiente, proporcionando una comprensión más profunda de cómo optimizar cada paso del proceso.

Además, el diseño hexagonal mejora la precisión en la estimación de los efectos de las variables independientes. Esto se traduce en una mejor capacidad para predecir los resultados bajo diferentes condiciones de operación, lo cual es esencial para la planificación y control del proceso a gran escala. Al aplicar este diseño, se pueden realizar ajustes finos en las condiciones de operación, asegurando una producción consistente y de alta calidad.

Finalmente, el diseño hexagonal es adaptable y puede integrarse fácilmente con herramientas de análisis estadístico avanzadas, como el software Minitab. Esto facilita la interpretación de los resultados y la implementación de mejoras continuas en el proceso. En resumen, el diseño hexagonal no solo optimiza la eficiencia y eficacia del proceso de recuperación de estaño a partir de casiterita, sino que también proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas y estratégicas en la gestión de la producción (Pérez & Franco, 2021) .



2.8.3.3. Aplicaciones Prácticas

El diseño hexagonal ha sido aplicado con éxito en diversas industrias para mejorar la eficiencia operativa y la calidad del producto. En la minería de casiterita, este diseño se puede utilizar para optimizar la flotación del mineral, ajustando variables como el pH, la dosificación de colectores y el tiempo de agitación. Mediante la implementación de un diseño hexagonal, las empresas pueden identificar rápidamente las mejores condiciones de operación, reduciendo los costos y aumentando la rentabilidad.

Además, este diseño es útil para evaluar la robustez del proceso ante variaciones en las condiciones de operación. Por ejemplo, en un entorno de producción real, pueden ocurrir fluctuaciones en la calidad del mineral o en las condiciones ambientales. El diseño hexagonal permite simular estas variaciones y ajustar los parámetros de manera que el proceso sea menos sensible a estos cambios, asegurando una producción estable y de alta calidad.

En conclusión, el diseño hexagonal es una herramienta poderosa y versátil que proporciona beneficios significativos en la optimización de procesos industriales complejos. Su capacidad para reducir el número de experimentos necesarios, identificar interacciones entre variables y mejorar la precisión en la estimación de efectos lo hace indispensable en la minería de casiterita y otras aplicaciones industriales (Pérez & Franco, 2021).



2.9. ANÁLISIS ECONÓMICO EN LA INDUSTRIA MINERA

2.9.1. Métodos de evaluación económica de procesos mineros

La evaluación económica de procesos mineros es fundamental para determinar la viabilidad y rentabilidad de los proyectos de explotación de recursos minerales. Los métodos de evaluación económica más utilizados incluyen el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Beneficio/Costo (RB/C). El VAN es una técnica que permite calcular el valor presente de los flujos de caja futuros generados por el proyecto, descontados a una tasa de interés determinada. Este método ayuda a establecer si los ingresos esperados superarán los costos iniciales y operativos. Un VAN positivo indica que el proyecto es rentable, mientras que un VAN negativo sugiere que no lo es.

Por otro lado, la TIR es una tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de caja futuros con la inversión inicial del proyecto. Este método es útil para comparar la rentabilidad de diferentes proyectos, ya que permite identificar la tasa de retorno que se obtendría si los flujos de caja proyectados se reinvirtieran en el mismo proyecto. Una TIR superior a la tasa de corte o de descuento implica que el proyecto es atractivo económicamente. La relación Beneficio/Costo, por su parte, es un índice que compara los beneficios obtenidos por cada unidad monetaria invertida. Un índice B/C mayor a 1 indica que los beneficios superan los costos, lo que justifica la inversión en el proyecto (Ramírez, 2018).



2.9.2. Impacto de la optimización de reactivos en la rentabilidad

La optimización de reactivos en el proceso de flotación de casiterita para la obtención de estaño tiene un impacto significativo en la rentabilidad del proyecto. Al ajustar adecuadamente la dosificación de reactivos como colectores, espumantes y modificadores de pH, se puede mejorar considerablemente la recuperación y la pureza del estaño extraído. Un uso eficiente de estos reactivos no solo aumenta la cantidad de mineral recuperado sino que también reduce los costos operativos al minimizar el desperdicio de reactivos y mejorar la eficiencia del proceso. La correcta dosificación y combinación de estos productos químicos es crucial para maximizar la interacción entre las burbujas de aire y las partículas de mineral, facilitando así su separación y concentración.

Además, la optimización de reactivos permite controlar mejor las condiciones de operación, lo que se traduce en una mayor estabilidad del proceso y una reducción de las fluctuaciones en la calidad del producto final. Esto es especialmente importante en la minería de casiterita, donde las condiciones del mineral pueden variar considerablemente. Al utilizar técnicas avanzadas de monitoreo y control, las empresas mineras pueden ajustar rápidamente la dosificación de reactivos para adaptarse a las variaciones del mineral, asegurando una producción constante y de alta calidad. La implementación de modelos matemáticos y herramientas de simulación también puede ayudar a predecir y optimizar el uso de reactivos, reduciendo así los costos y mejorando la rentabilidad global del proyecto (Ramírez, 2018).



2.10. TENDENCIAS ACTUALES Y FUTURAS EN LA FLOTACIÓN DE CASITERITA

2.10.1. Innovaciones tecnológicas recientes

En los últimos años, las innovaciones tecnológicas en el campo de la flotación de minerales han permitido mejorar significativamente la eficiencia y la efectividad de la recuperación de estaño a partir de casiterita. Una de las innovaciones más destacadas es el desarrollo de nuevos reactivos de flotación más selectivos y eficaces, que permiten una mejor separación de la casiterita de la ganga. Además, la automatización y el uso de sistemas de control avanzados han mejorado la precisión y consistencia de las operaciones de flotación. Estos sistemas utilizan sensores en tiempo real para monitorear y ajustar las variables del proceso, optimizando así las condiciones de operación y mejorando la recuperación del mineral.

Otra innovación significativa es la implementación de tecnologías de procesamiento en seco, que eliminan la necesidad de grandes cantidades de agua en el proceso de flotación. Esto no solo reduce el consumo de agua y los costos asociados, sino que también minimiza el impacto ambiental del proceso minero. Además, el uso de equipos de flotación de última generación, como las celdas de flotación neumáticas, ha demostrado ser altamente eficiente en la recuperación de casiterita. Estas celdas permiten un mayor control sobre el tamaño de las burbujas y la distribución del aire, mejorando la selectividad y eficiencia del proceso (Ramírez, 2018).



2.10.2. Perspectivas de sostenibilidad y eficiencia energética

La sostenibilidad y la eficiencia energética son dos de las principales preocupaciones en la minería moderna. En la flotación de casiterita, se están adoptando varias estrategias para abordar estos desafíos. La optimización del uso de energía a través de la implementación de equipos más eficientes y el uso de tecnologías de ahorro energético es una tendencia creciente. Por ejemplo, la incorporación de motores de alta eficiencia y sistemas de recuperación de calor en las plantas de procesamiento puede reducir significativamente el consumo de energía y los costos operativos.

Además, se están explorando métodos para reducir el impacto ambiental del proceso de flotación, como el desarrollo de reactivos biodegradables y menos tóxicos. Estos reactivos no solo son más seguros para el medio ambiente, sino que también pueden mejorar la eficiencia del proceso de flotación al reducir la interferencia de sustancias no deseadas. La gestión sostenible del agua es otra área clave, con técnicas de reciclaje y reutilización del agua que se están implementando para minimizar el consumo y reducir los efluentes. Estas iniciativas no solo mejoran la sostenibilidad del proceso minero, sino que también pueden ofrecer beneficios económicos significativos al reducir los costos de tratamiento y disposición de residuos (Ramírez, 2018).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIAL DE LABORATORIO:

- Lapicero
- Cuaderno
- Cinta masking
- Lapiceros
- Plumón
- Bandeja de metal
- Vasos precipitados de 1L, 500 ml, 100 ml, 50 ml (vidrio borosilicatado)
- Jeringa de 10, 5, 3 ml (plástico estéril)
- Cucharilla de agitador (acero inoxidable)
- Hojas papel bond (A4, 80 g/m²)
- Lápiz (2B)
- Borrador
- Floculante
- Folder

3.1.1. Equipos

- Agitador de pulpa (velocidad variable, 0-2000 RPM)
- Computadora
- Laptop
- Agitador magnético con calefacción (rango de temperatura: ambiente a 300°C)
- Cronómetro (precisión de ± 0.01 s)



- Impresora
- Calculadora científica
- Celda de flotación (capacidad de 2 litros, material de acero inoxidable)
- Balanza de precisión (precisión de ± 0.001 g)
- Reactor de calor (rango de temperatura: ambiente a 250°C)
- USB

3.1.2. Reactivos

- PL200
- Z-11
- MIBC (10 gr/ton)
- Fluosilicato (55 gr/ton)
- Silicato (112 gr/ton)
- Hidróxido de sodio (NaOH, pureza 98%)
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4 , concentración 95-98%)

3.1.3. Software

- Excel
- Minitab
- Word



3.2. MÉTODOS

3.2.1. Determinación del porcentaje óptimo de NaOH en la formulación del reactivo PL-200:

- **Preparación de soluciones:** Se preparó diferentes soluciones de NaOH a concentraciones variables (3.87%, 4.84%, 2.90%) en agua destilada utilizando vasos precipitados y jeringas para medir volúmenes precisos.
- **Pruebas de flotación:** Utilizando la celda de flotación, se realizó pruebas de flotación de casiterita con cada solución de NaOH, manteniendo constantes las demás condiciones del proceso.
- **Medición de la recuperación de casiterita:** La recuperación se midió pesando la cantidad de mineral recuperado con una balanza de precisión.
- **Análisis de datos:** Los datos se analizó con Minitab para determinar la concentración óptima de NaOH que maximice la recuperación.

3.2.2. Evaluación del efecto del porcentaje de reactivo PL-200 por tonelada de mineral:

- **Dosificación del reactivo:** Se modificó las dosis de PL-200 por tonelada de mineral en diferentes pruebas de flotación.
- **Pruebas de eficiencia:** La eficiencia del proceso se evaluó mediante la cantidad de casiterita recuperada en cada prueba.

3.2.3. Comparación de resultados:

Los resultados se compararon para identificar la dosis más eficiente, utilizando herramientas estadísticas en Excel.



3.2.4. Análisis del impacto de la variación en la dosificación de silicato

- **Preparación de soluciones de silicato:** Se preparó soluciones de silicato a diferentes concentraciones en gramos por tonelada (g/ton).
- **Pruebas de flotación:** Se realizó pruebas de flotación utilizando estas soluciones de silicato, manteniendo constantes las demás variables del proceso.
- **Medición de la eficiencia de recuperación:** La eficiencia se midió pesando la casiterita recuperada y comparando los resultados con el uso de Excel y Minitab para analizar los datos y determinar la concentración óptima de silicato que maximiza la recuperación.

3.2.5. Análisis comparativo de costos

- **Diseño hexagonal:** Se implementó un diseño hexagonal para comparar el consumo de NaOH y H₂SO₄ entre el proceso propuesto y las plantas convencionales.
- **Recopilación de datos:** Se recopiló datos de consumo de reactivos y costos operativos.
- **Comparación de costos:** Se utilizó Excel para realizar un análisis comparativo detallado de los costos operativos.

3.2.3.1. Análisis Estadístico

Para la interpretación de los datos, se utilizó análisis estadísticos descriptivos y pruebas de hipótesis. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) para comparar las medias de las diferentes concentraciones de



reactivos y sus efectos en la recuperación de casiterita. Se utilizó software estadístico (Minitab) para llevar a cabo estos análisis, asegurando la precisión y validez de los resultados obtenidos.

3.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento para este trabajo que consta de la flotación de casiterita en este proyecto sigue un enfoque meticuloso que se ha adaptado específicamente para maximizar la recuperación del mineral valioso. A partir de la figura del diagrama de flujo del proceso, se puede detallar cada etapa del procedimiento, enfatizando las condiciones controladas y los reactivos utilizados en cada fase.

El proceso inicia con la preparación de la muestra, donde se seleccionan aproximadamente 10 kg de mineral de casiterita. Este mineral se tritura y se reduce de tamaño hasta que pasa por una malla de -10. Después de esta reducción, el mineral se homogeneiza mediante un proceso de roleado, asegurando que todas las partículas estén mezcladas uniformemente. Luego, se realiza un cuarteo, dividiendo la muestra en submuestras de 1 kg que serán usadas en las pruebas de flotación.

Una vez preparada la muestra, se procede a la molienda del mineral en un molino de bolas. Se carga 1 kg de la muestra previamente triturada en el molino, junto con 500 ml de agua, formando una pulpa con 67% de sólidos. Durante la molienda, se añade NaOH para actuar como colector y se ajusta el pH con H_2SO_4 si es necesario. También se agrega silicato como modificador, garantizando que la pulpa esté en las condiciones óptimas para la flotación. La molienda se lleva a cabo a 71 rpm hasta que se logra un tamaño de partícula de P80 a 150 micras.

La pulpa resultante se transfiere a una celda de flotación de 4 litros. En esta celda, se ajusta nuevamente el pH utilizando un multiparámetro y se adicionan los reactivos de

flotación: PL200, silicato y MIBC como espumante. La operación de la celda se realiza a 1500 rpm, asegurando la correcta generación y estabilización de las espumas que contienen casiterita. Durante la flotación, las espumas se recogen mediante un paleteo cuidadoso, extrayendo periódicamente las espumas hacia bandejas para recolectar el concentrado.

Figura 3

Reactivos para la flotación



Este procedimiento se repite para diferentes concentraciones de reactivos, con el fin de evaluar la eficiencia de recuperación en cada condición. En la etapa Rougher Casiterita, se realizan ajustes en el pH y se monitorea constantemente para asegurar condiciones óptimas. Las espumas obtenidas se envían a la etapa Cleaner I, donde se realiza una flotación adicional para mejorar la pureza del concentrado final. Finalmente, el relave de la etapa Rougher se trata en la etapa SCV Casiterita para recuperar cualquier casiterita residual, con una menor cantidad de reactivos.

Figura 4

Etapa de acondicionado



Figura 5

Celda de flotación en acondicionado



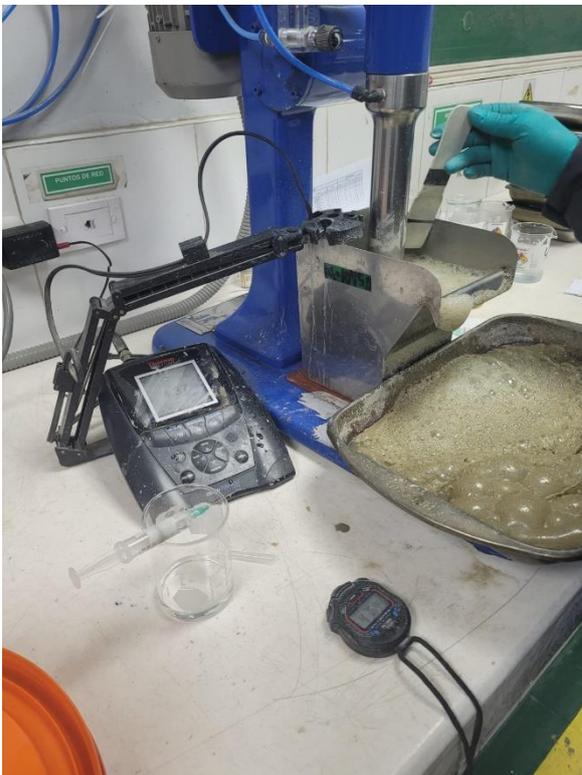
Figura 6

Celda de flotación en agitación



Figura 7

Etapa de paleta de o recuperación



Tras la flotación, tanto el concentrado como los relaves se filtran y secan a 105°C, preparándolos para su análisis químico. Este procedimiento permite no solo optimizar la recuperación de casiterita, sino también reducir los costos operativos asociados al proceso de flotación.

Figura 8

Roleado de la muestra



Figura 9

Muestras





CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

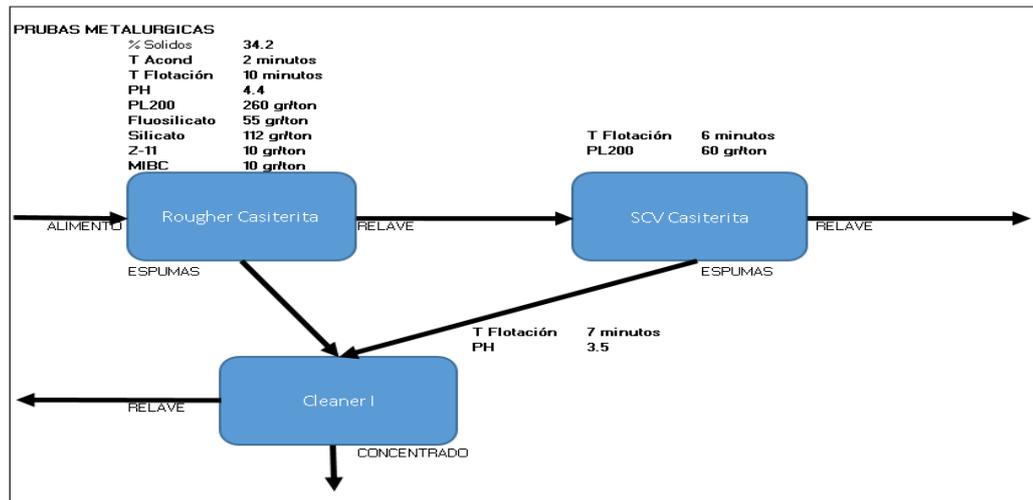
4.1.1. Primeras consideraciones de las pruebas

La figura representa un diagrama de flujo del proceso metalúrgico de flotación de la casiterita, que es lo que se requiere para obtener los resultados. Además de destacar los distintos procesos que lo componen, este diagrama de flujo también proporciona una visión general de los parámetros operativos que se utilizaron. El proceso comienza con la etapa de «casiterita de desbaste», que es el primer paso propiamente dicho. En esta etapa, el mineral se acondiciona y flota con una serie de reactivos, que incluyen PL200 (260 g/tonelada), fluosilicato (55 g/tonelada), silicato (112 g/tonelada), Z-11 (10 g/tonelada) y MIBC (10 g/tonelada), a un pH de 4,4 y un contenido de sólidos del 34,2%. El mineral sigue flotando hasta que alcanza las características deseadas. Como paso adicional, los relaves se envían a la etapa «SCV Casiterita», y la espuma que se genera como resultado de esta etapa se transfiere a la etapa «Limpiador I» para su posterior concentración. Esta segunda etapa consiste en someter el mineral a una nueva flotación con reactivos (PL200, 60 g/tonelada) durante un período de seis minutos a un pH de 3,5. El proceso de flotación se repite tantas veces como se desee. El proceso de flotación se repite tantas veces como sea necesario. Una vez finalizada la etapa «Limpiador I», se recoge el concentrado final de la espuma que se ha formado y se retiran los estériles que se han producido durante ambas etapas. Este gráfico ofrece una imagen clara del flujo de materiales, así como de los parámetros de funcionamiento importantes para cada fase del proyecto. El objetivo de este

gráfico es facilitar la comprensión de la arquitectura del proceso de flotación de la casiterita en su conjunto.

Figura 10

Flowsheet del proceso metalúrgico



En el siguiente cuadro se verá los parámetros en los que se dará la prueba de laboratorio para el proceso de metalúrgico el cual será la flotación de la casiterita para la recuperación del estaño, se han establecido varios parámetros como la una densidad de pulpa de 2.77 g/cm^3 , un volumen útil de celda de 2.2 litros, tiempos de acondicionamiento y flotación de 2 y 10 minutos respectivamente, y un flujo de aire de 5 litros por minuto. El pH se mantiene en 4.4 y la velocidad de rotación de la celda es de 1200 rpm, con una frecuencia de paletado de 30 minutos. Además, se reporta que la muestra pesa 963.40 gramos, el volumen de agua es de 1852.20 cc, y la densidad de pulpa es de 1279.82 con un porcentaje de sólidos de 34.22%.



Tabla 5

Parámetros del proceso

PARAMETROS	
G.e.	2.77
VUTIL DE CELDA	2.2
Acondicionamiento (min)	2
Flotación (min)	10
AIRE (l/min)	5
Ph	4.4
rpm	1200
frecuencia de paleteo (min)	30

Tabla 6

Cuadro metalúrgico

P _{muestra} (gr.)	V _{AGUA} (cc)	Dp	%S
963.40	1852.20	1279.82	34.22

En el proceso de flotación de casiterita, se llevaron a cabo siete pruebas con diversos parámetros para evaluar su eficiencia. Todas las pruebas mantuvieron un pH de 4.4, ajustado con H₂SO₄, y utilizaron consistentemente el espumante MIBC y el reactivo Z-11 a una concentración de 10 g/ton. Los cambios principales se observaron en el porcentaje de NaOH en el colector de Sn, la cantidad de silicato y el consumo de H₂SO₄. En la Prueba 1, se emplearon 260 g/ton de colector de Sn con un 3.87% de NaOH, 50 g/ton de silicato, y se consumieron 4.58 gramos de H₂SO₄. En la Prueba 2, aunque se mantuvo la misma cantidad de colector de Sn, se incrementó el silicato a 75 g/ton, resultando en un consumo de 5.00 gramos de H₂SO₄. Para la Prueba 3, se aumentó el colector de Sn a 125 g/ton de silicato, con un consumo de 5.12 gramos de H₂SO₄.



La Prueba 4 redujo el silicato nuevamente a 50 g/ton, consumiendo 4.72 gramos de H_2SO_4 . La Prueba 5 se asemejó a la Prueba 4, pero el colector de Sn contenía un 2.90% de NaOH, con un consumo de 4.32 gramos de H_2SO_4 . En la Prueba 6, se incrementó el silicato a 75 g/ton, con un consumo de 4.16 gramos de H_2SO_4 . Finalmente, la Prueba 7 utilizó H_2SO_6 como modificador de pH y 50 g/ton de silicato, resultando en un consumo de 4.74 gramos. Estos ajustes en los reactivos y condiciones operacionales fueron críticos para optimizar la flotación de la casiterita, reflejando la necesidad de un equilibrio adecuado de los reactivos para mejorar la recuperación del mineral y la eficiencia del proceso como se ve en la siguiente tabla.

Tabla 7

Consumo y dosificación de reactivos en las 7 pruebas

PRUEBA	MODIFICADOR DE PH	Ph	Consumo					Dosificación					H2SO4 consumo en gramos				
			ETAPA ROUGHER		COLECTOR DE Sn	SILICA TO	SILICA TO (10%)	ROUGHER		SCAVENTOR DE Sn	SILICA TO (10%)						
			ESPUMANTE	Zn				ESFUM ANTE	Zn (10%)			COLEC TOR DE Sn		SCAVENTOR DE Sn			
g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton					
PRUEBA-1	H2SO4	4,40	MIB C	10	10	10	PL-200 con 3.87 % NaOH	260	50	3.5	60	2	0.06	2.50	0.96	0.58	4.58
PRUEBA-2	H2SO4	4,40	MIB C	10	10	10	PL-200 con 4.84 % NaOH	260	75	3.5	60.00	2	0.06	2.50	1.45	0.58	5.00
PRUEBA-3	H2SO4	4,40	MIB C	10	10	10	PL-200 con 4.84 % NaOH	260	125	3.5	60.00	2	0.06	2.50	2.41	0.58	5.12
PRUEBA-4	H2SO4	4,40	MIB C	10	10	10	PL-200 con 3.87 % NaOH	260	150	3.5	60.00	2	0.06	2.50	2.89	0.58	4.72
PRUEBA-5	H2SO5	4,40	MIB C	10	10	10	PL-200 con 2.90 % NaOH	260	125	3.5	60.00	2	0.06	2.50	2.41	0.58	4.32
PRUEBA-6	H2SO5	4,40	MIB C	10	10	10	PL-200 con 2.90% NaOH	260	75	3.5	60.00	2	0.06	2.50	1.45	0.58	4.16
PRUEBA-7	H2SO6	5,40	MIB C	10	10	10	PL-200 con 3.87 % NaOH	260	112	3.5	60	2	0.06	2.50	2.16	0.58	4.74



4.1.2. Resultados de las 7 pruebas de frotación

En el siguiente cuadro se verá detalladamente los resultados de varias pruebas de flotación de casiterita, enfocándose en el análisis de relaves y diversos parámetros como peso, porcentaje de peso, porcentaje de estaño (% Sn), porcentaje de sólidos (% S), contenido metálico de Sn y S, y la distribución porcentual de Sn y S. Las pruebas están codificadas como P1, P2, P3, etc., incluyendo tanto las condiciones iniciales (P) como los relaves (PR). El punto óptimo también está identificado, proporcionando una referencia crucial para la evaluación de los resultados.

El análisis del peso y el porcentaje de peso es fundamental para entender la eficiencia de las pruebas de flotación. Las pruebas muestran variaciones significativas en el peso, lo que sugiere diferencias en la capacidad de captura de mineral bajo distintas condiciones operativas. Por ejemplo, la prueba P6 tiene uno de los pesos más altos, lo que podría indicar una mayor eficiencia en la captura de mineral. Sin embargo, el peso por sí solo no es suficiente para determinar la eficacia del proceso; se debe considerar junto con otros parámetros como el % Sn y el % S para obtener una imagen completa.

El porcentaje de estaño (% Sn) es el parámetro más crítico, ya que refleja directamente la eficiencia de la flotación en la recuperación del mineral objetivo. Los datos muestran que las pruebas P2 y P7 tienen un % Sn relativamente alto en comparación con otras. Es notable que la prueba P7 alcanza un % Sn de 7.41 en el relave, lo que indica una alta eficiencia en la separación de estaño. La prueba P6 también muestra un alto porcentaje de Sn en el concentrado con un valor de 6.51, lo cual es significativo para la evaluación del proceso.



El contenido metálico de Sn y S en gramos proporciona una visión detallada de la cantidad de metal recuperado en cada prueba. Los datos indican que las pruebas P4 y P6 tienen los valores más altos de contenido metálico de Sn, lo que refuerza la conclusión de que estas condiciones son óptimas para la recuperación de estaño. Este aspecto es crucial no solo para la eficiencia del proceso sino también para la rentabilidad económica de la operación, ya que una mayor recuperación de Sn implica un mayor ingreso potencial.

La distribución porcentual de Sn y S es otro aspecto importante a considerar. La prueba P6 no solo muestra un alto porcentaje de Sn recuperado sino también una distribución de S relativamente baja, lo cual es favorable. Esto indica que la condición de operación en la prueba P6 es efectiva no solo en recuperar el estaño sino también en minimizar la recuperación de impurezas como el azufre, mejorando así la pureza del concentrado final. Esta distribución equilibrada es crucial para obtener un producto de alta calidad.

En los dos últimos párrafos, nos centramos en el análisis detallado de las pruebas que se acercan más al punto óptimo. La prueba P6 destaca significativamente con un porcentaje de Sn en el relave de 6.51 y una distribución de Sn del 60.90%, lo cual está muy cerca del punto óptimo identificado con un porcentaje de Sn de 8.41 y una distribución de 62.93%. La prueba P6 no solo se acerca al punto óptimo en términos de eficiencia de recuperación de Sn sino también en términos de minimizar las impurezas, haciendo de esta condición una de las más prometedoras para la optimización del proceso de flotación de casiterita.



Otra prueba destacada es la P2, que presenta un porcentaje de Sn en el relave de 7.10 y una distribución de Sn del 60.89%. Aunque no alcanza el punto óptimo, está muy cerca en términos de eficiencia de recuperación y pureza del concentrado. Estos resultados sugieren que las condiciones operativas de las pruebas P6 y P2 son las más efectivas para maximizar la recuperación de estaño y minimizar los costos operativos, proporcionando una base sólida para futuras optimizaciones del proceso.

Tabla 8

Resultados con las diferentes pruebas y teniendo en cuenta diferentes aspectos

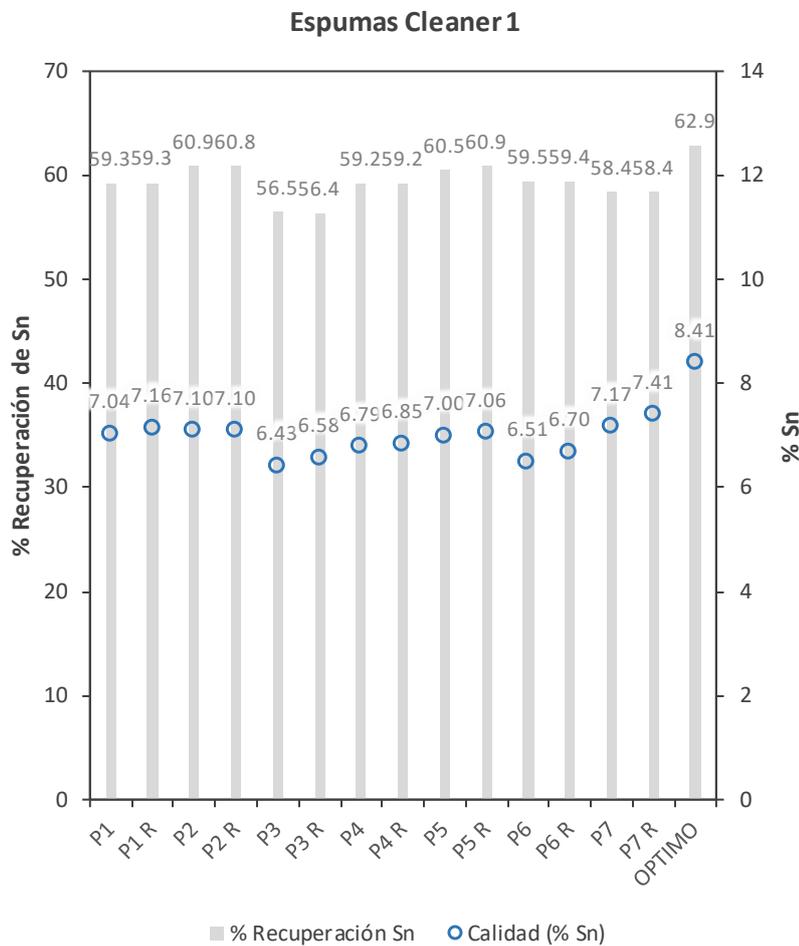
Producto	P1	P1R	P2	P2R	P3	P3R	P4	P4R	P5	P5R	P6	P6R	P7	P7R	OPTIMO
Pesos (gr)															
Espumas Cleaner I	80.30	77.20	81.80	81.70	83.80	79.40	83.20	81.37	82.40	82.23	87.10	80.74	77.70	71.42	76.70
Relave Cleaner I	212.30	212.40	213.2	213.1	215	215.2	212.5	214	211.6	211.5	224.8	224.8	216	216	218
Relave Scavenger	672.30	672.20	669.4	669.4	665.8	665.7	669	669	671.1	671.1	652.8	652.8	671.8	671.8	669.2
% Peso															
Espumas Cleaner I	8.32	8.03	8.48	8.47	8.69	8.27	8.62	8.44	8.54	8.52	9.03	8.43	8.05	7.45	7.96
Relave Cleaner I	22.00	22.08	22.11	22.10	22.29	22.41	22.03	22.19	21.93	21.92	23.30	23.46	22.37	22.52	22.62
Relave Scavenger	69.68	69.89	69.41	69.43	69.02	69.32	69.35	69.37	69.54	69.56	67.67	68.12	69.58	70.04	69.43
% Sn															
Espumas Cleaner I	7.04	7.16	7.1	7.1	6.43	6.58	6.79	6.85	7	7.06	6.51	6.7	7.17	7.41	8.41
Relave Cleaner I	0.86	1.03	0.95	1.01	0.99	1.24	0.98	1.04	1.07	1.06	1.21	1.12	1.11	1.57	1.57
Relave Scavenger	0.31	0.24	0.25	0.24	0.30	0.21	0.27	0.24	0.22	0.22	0.18	0.18	0.23	0.06	0.06
%S															
Espumas Cleaner I	0.57	0.41	0.46	0.5	0.5	0.48	0.44	0.47	0.5	0.38	0.39	0.52	0.55	0.53	0.53
Relave Cleaner I	0.22	0.22	0.23	0.27	0.22	0.23	0.25	0.26	0.26	0.28	0.25	0.25	0.26	0.19	0.19
Relave Scavenger	0.10	0.09	0.07	0.09	0.1	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.1	0.09	0.09	0.09	0.09
Contenido Metálico Sn (gr)															
Espumas Cleaner I	5.65	5.53	5.81	5.80	5.39	5.22	5.65	5.57	5.77	5.81	5.67	5.41	5.57	5.29	6.45
Relave Cleaner I	1.83	2.19	2.03	2.15	2.13	2.67	2.08	2.23	2.26	2.24	2.72	2.52	2.40	3.39	3.42
Relave Scavenger	2.06	1.61	1.70	1.58	2.02	1.37	1.81	1.61	1.51	1.49	1.15	1.18	1.57	0.38	0.38
Contenido Metálico S (gr)															
Espumas Cleaner I	0.46	0.32	0.38	0.41	0.42	0.38	0.37	0.38	0.41	0.31	0.34	0.42	0.43	0.38	0.41
Relave Cleaner I	0.47	0.47	0.49	0.58	0.47	0.49	0.53	0.56	0.55	0.59	0.56	0.56	0.56	0.41	0.41
Relave Scavenger	0.67	0.60	0.47	0.60	0.67	0.60	0.60	0.60	0.60	0.54	0.65	0.59	0.60	0.60	0.60
% de Distribución Sn															
Espumas Cleaner I	59.27	59.30	60.89	60.84	56.50	56.41	59.23	59.22	60.48	60.90	59.45	59.40	58.41	58.40	62.93



Producto	P1	P1R	P2	P2R	P3	P3R	P4	P4R	P5	P5R	P6	P6R	P7	P7R	OPTIMO
Relave Cleaner I	19.14	23.47	21.24	22.57	22.32	28.81	21.83	23.65	23.74	23.52	28.52	27.64	25.14	37.42	33.39
Relave Scavenger	21.59	17.23	17.87	16.58	21.19	14.77	18.93	17.13	15.79	15.58	12.03	12.96	16.45	4.18	3.68
% de Distribución S															
Espumas Cleaner I	28.66	22.79	28.18	25.75	26.90	25.83	24.41	24.82	26.31	21.68	21.85	26.75	26.82	27.16	28.57
Relave Cleaner I	29.24	33.65	36.73	36.27	30.36	33.55	35.43	36.11	35.13	41.08	36.15	35.81	35.24	29.45	29.11
Relave Scavenger	42.10	43.56	35.09	37.98	42.74	40.61	40.16	39.07	38.57	37.24	41.99	37.44	37.94	43.39	42.32
Cabeza Calculada															
Peso (gr)	964.90	961.80	964.40	964.20	964.60	960.30	964.70	964.37	965.10	964.83	964.70	958.34	965.50	959.22	963.90
% Sn	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99	0.96	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.95	0.99	0.94	1.06
% S	0.17	0.14	0.14	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.17	0.15	0.15

Figura 11

Porcentaje de recuperación en las diferentes pruebas



Nota. La figura muestra la variabilidad en la recuperación y calidad de Sn, destacando un punto óptimo con 62.9% de recuperación y 8.41% de calidad.

La figura muestra el porcentaje de recuperación y calidad de Sn en diferentes pruebas de flotación de casiterita en la etapa de espumas Cleaner 1. Se puede observar que la recuperación de Sn varía entre 56.4% y 60.9%, mientras que la calidad del Sn oscila entre 6.43% y 8.41%. El punto óptimo, representado en la gráfica, indica una recuperación de 62.9% y una calidad de 8.41% de Sn, destacándose como el mejor balance entre estos dos factores. Entre las pruebas, la recuperación más cercana al punto óptimo se observa en la Prueba 1, con un 59.3%



de recuperación y 7.04% de calidad de Sn, y en la Prueba 3, con un 60.9% de recuperación y 7.10% de calidad de Sn.

Para alcanzar estas eficiencias, se prestó especial atención a la dosificación y combinación de reactivos. Los puntos críticos fueron la cantidad de NaOH en el colector de Sn, el uso del silicato, y el consumo de H₂SO₄ para ajustar el pH. Por ejemplo, en la Prueba 1 se utilizó 260 g/ton de colector de Sn con 3.87% de NaOH y 50 g/ton de silicato, mientras que en la Prueba 3 se incrementó el colector de Sn a 125 g/ton de silicato. Estos ajustes permitieron optimizar las condiciones de flotación, logrando así mejorar la recuperación y calidad del Sn. La cuidadosa manipulación de estos reactivos y condiciones operativas es esencial para maximizar la eficiencia del proceso de flotación de la casiterita, reflejando la importancia de un enfoque equilibrado y preciso en el tratamiento del mineral.

4.1.3. Análisis del impacto de la variación en el consumo de H₂SO₄

Tabla 9

Consumo de H₂SO

Consumo en gramos H₂SO₄	SILICATO	NaOH
G	g/ton	%
4.58	50.00	PL-200 con 3.87 % NaOH
5.00	75.00	PL-200 con 4.84 % NaOH
5.12	125.00	PL-200 con 4.84 % NaOH
4.72	150.00	PL-200 con 3.87 % NaOH
4.32	125.00	PL-200 con 2.90 % NaOH
4.16	75.00	PL-200 con 2.90% NaOH
4.74	112.00	PL-200 con 3.87 % NaOH

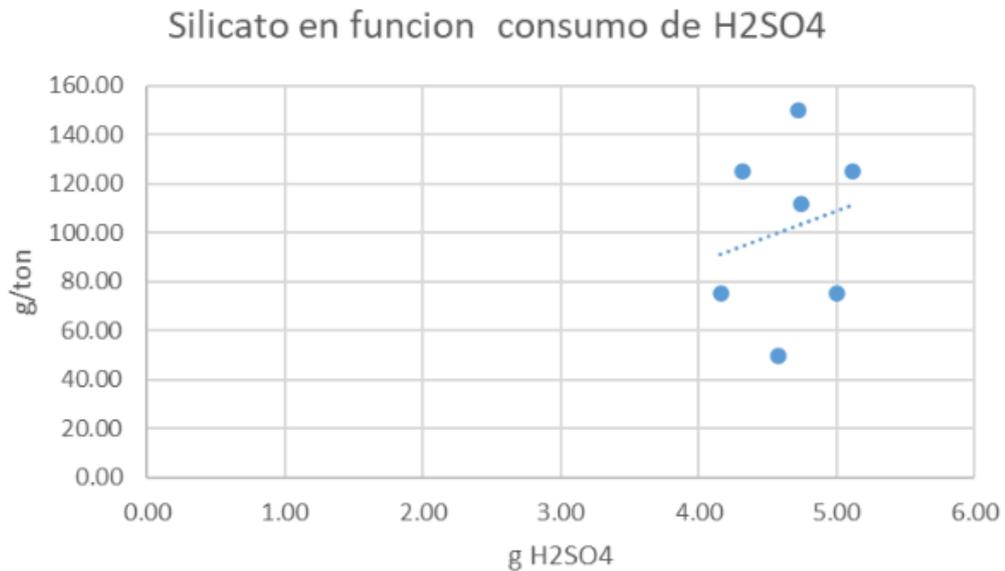
Nota La tabla muestra el consumo de H₂SO₄, silicato y NaOH en diferentes pruebas de flotación de casiterita, destacando variaciones importantes en la dosificación de reactivos.



La tabla presenta los valores de consumo de ácido sulfúrico (H_2SO_4), silicato y NaOH en diferentes pruebas de flotación de casiterita. En la prueba 1, se observa un consumo de 4.58 gramos de H_2SO_4 , 50 g/ton de silicato y 0.04% de NaOH. La prueba 2 muestra un incremento en el consumo de reactivos con 5.00 gramos de H_2SO_4 , 75 g/ton de silicato y 0.05% de NaOH. La prueba 3 continúa esta tendencia con 5.12 gramos de H_2SO_4 y un aumento significativo del silicato a 125 g/ton, manteniendo el NaOH en 0.05%. En la prueba 4, aunque el consumo de H_2SO_4 disminuye a 4.72 gramos, el silicato alcanza su máximo valor de 150 g/ton, mientras que el NaOH permanece en 0.04%. La prueba 5 reduce el H_2SO_4 a 4.32 gramos y mantiene el silicato en 125 g/ton, con una ligera disminución del NaOH a 0.03%. La prueba 6 presenta el menor consumo de H_2SO_4 con 4.16 gramos y mantiene el silicato en 75 g/ton, con 0.03% de NaOH. Finalmente, la prueba 7 muestra un consumo de 4.74 gramos de H_2SO_4 y 112 g/ton de silicato, con el NaOH regresando a 0.04%. Estas variaciones en el consumo de reactivos son cruciales para determinar las condiciones óptimas de flotación, balanceando la eficiencia de recuperación de casiterita y los costos operativos, y proporcionando una base sólida para optimizar el proceso y mejorar la eficiencia global del sistema.

Figura 12

Silicato en función del consumo de H₂SO₄



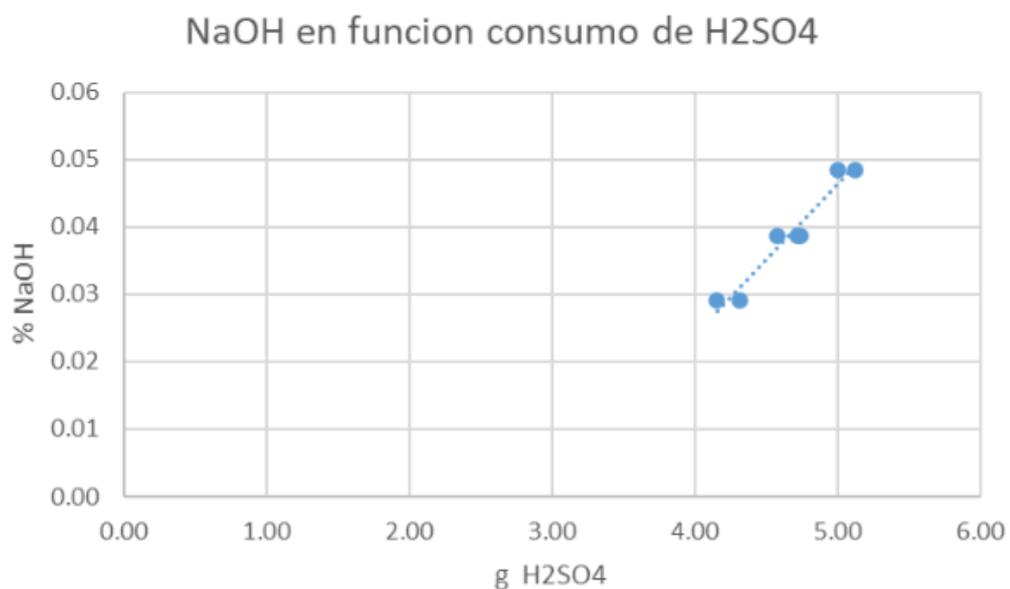
Nota. La gráfica muestra una correlación entre el consumo de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y silicato durante las pruebas de flotación de casiterita, destacando una tendencia ascendente.

La gráfica muestra la relación entre el consumo de silicato y el consumo de ácido sulfúrico (H₂SO₄) en diferentes pruebas de flotación de casiterita. En el eje horizontal se representa el consumo de H₂SO₄ en gramos, mientras que en el eje vertical se muestra el consumo de silicato en gramos por tonelada. Los puntos dispersos en el gráfico indican los valores obtenidos en cada prueba, y una línea de tendencia sugiere una ligera correlación positiva entre ambos parámetros. A medida que el consumo de H₂SO₄ aumenta, también tiende a incrementarse el consumo de silicato, aunque la relación no es estrictamente lineal. Algunas pruebas, como las que consumen alrededor de 4.5 gramos de H₂SO₄, muestran una amplia variabilidad en el consumo de silicato, desde valores tan bajos como 50 g/ton hasta valores tan altos como 125 g/ton. Esta dispersión sugiere que otros factores podrían estar influyendo en el consumo de silicato y que la relación con el ácido sulfúrico no es la única variable en juego. La comprensión de esta relación

es crucial para optimizar el proceso de flotación, ya que ambos reactivos tienen un impacto significativo en los costos operativos y la eficiencia de recuperación del mineral. Por lo tanto, es esencial seguir investigando para identificar y controlar las variables que afectan el consumo de estos reactivos y así mejorar la eficiencia global del proceso.

Figura 13

NaOH en función del consumo H₂SO₄



Nota. La gráfica muestra una correlación positiva entre el consumo de H₂SO₄ y el porcentaje de NaOH en pruebas de flotación de casiterita.

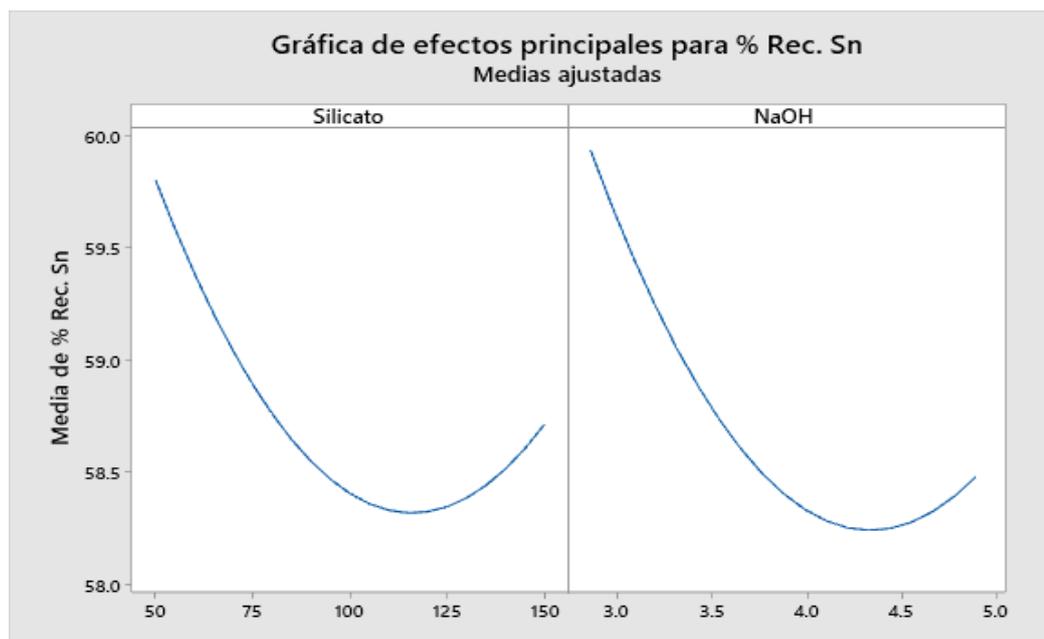
La gráfica muestra la relación entre el consumo de hidróxido de sodio (NaOH) y el consumo de ácido sulfúrico (H₂SO₄) en diferentes pruebas de flotación de casiterita. En el eje horizontal se representa el consumo de H₂SO₄ en gramos, mientras que en el eje vertical se muestra el porcentaje de NaOH utilizado. Los puntos en el gráfico indican los valores obtenidos en cada prueba, y una línea de tendencia revela una clara correlación positiva entre ambos parámetros. A medida que el consumo de H₂SO₄ aumenta, también lo hace el

porcentaje de NaOH. Este patrón sugiere que el ajuste de uno de estos reactivos influye directamente en la cantidad del otro que se necesita. Por ejemplo, cuando el consumo de H_2SO_4 es de aproximadamente 4.5 gramos, el porcentaje de NaOH oscila entre 0.03% y 0.05%. Esta relación lineal indica que un mayor consumo de H_2SO_4 requiere un mayor porcentaje de NaOH para mantener el equilibrio del proceso de flotación. Comprender esta relación es esencial para optimizar el uso de reactivos, reducir costos y mejorar la eficiencia de recuperación del mineral. Controlar y ajustar adecuadamente las concentraciones de H_2SO_4 y NaOH puede llevar a un proceso más eficiente y económico, maximizando la recuperación de casiterita mientras se minimizan los costos operativos y el impacto ambiental.

4.2. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL PORCENTAJE DE REACTIVO PL-200 POR TONELADA DE SILICATO Y DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE NAOH

Figura 14

Grafica de efectos para el porcentaje de recuperación por el silicato y NaOH

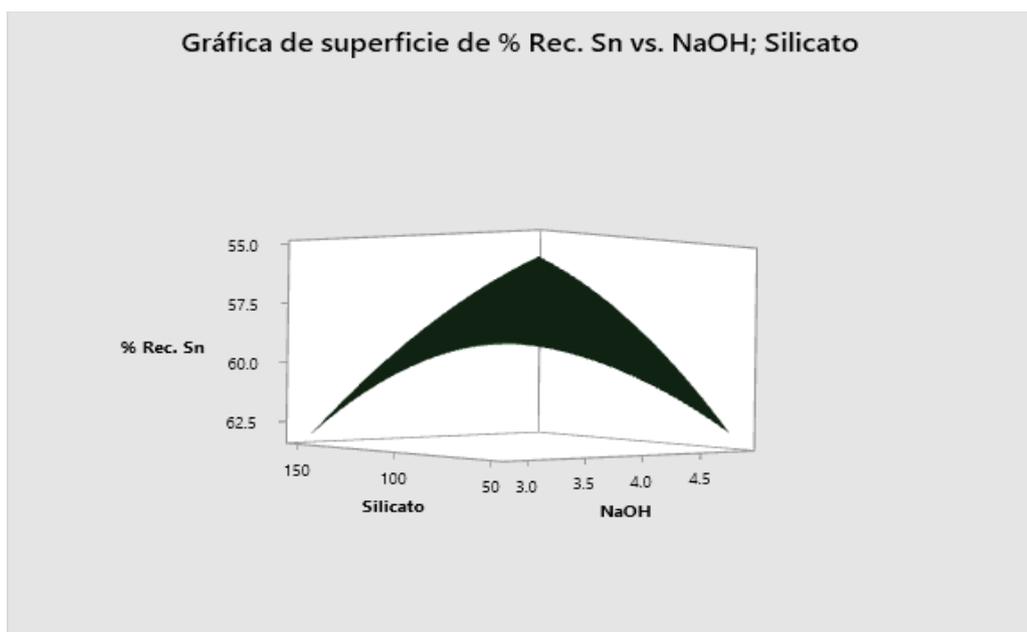


Nota. La imagen muestra una gráfica de efectos principales, analizando la influencia del silicato y NaOH en la recuperación de estaño.

La Figura 14 muestra una gráfica de efectos principales que ilustra cómo las concentraciones de silicato y NaOH afectan el porcentaje de recuperación de estaño (Sn). Las curvas indican que tanto el silicato como el NaOH tienen un impacto significativo en la recuperación, pero de manera no lineal. Se observa que la recuperación de Sn disminuye a niveles extremos de ambos reactivos, sugiriendo que hay un rango óptimo de concentración para maximizar la eficiencia del proceso. En particular, la concentración de silicato muestra una curva en forma de U invertida, mientras que la curva del NaOH indica que la recuperación mejora hasta un punto óptimo antes de disminuir nuevamente. Este gráfico es crucial para identificar las concentraciones ideales de estos reactivos, evitando tanto el subuso como el exceso de dosificación.

Figura 15

Grafica de superficie de %Rec. Sn en función del NaOH y el silicato

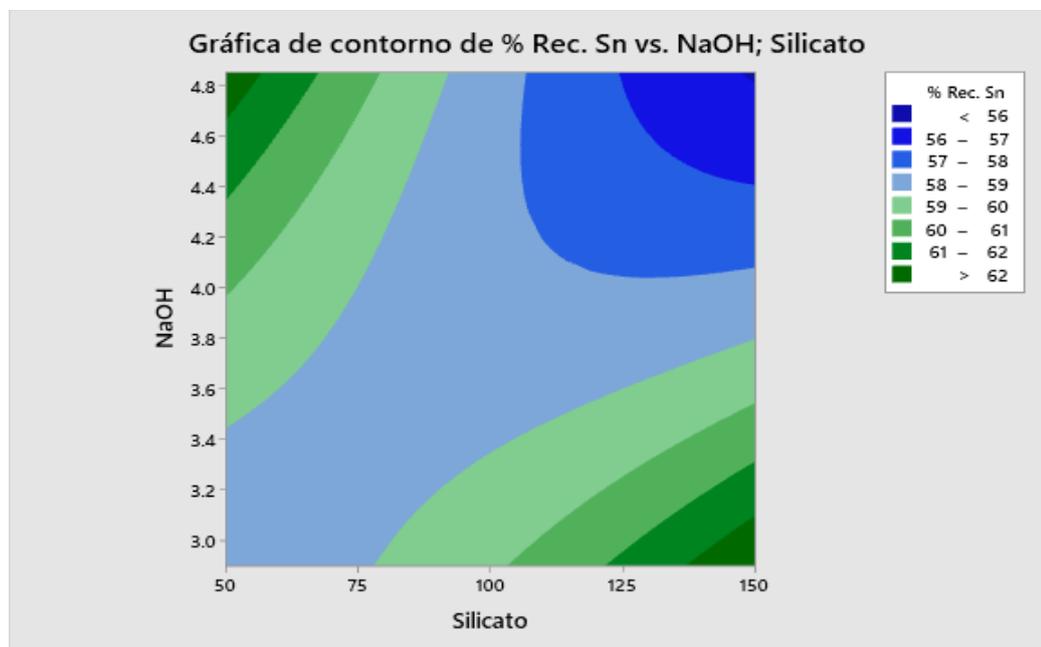


Nota. La gráfica muestra cómo las concentraciones óptimas de NaOH y silicato maximizan la recuperación de estaño en el proceso de flotación.

La Figura 15 presenta una gráfica de superficie que relaciona el porcentaje de recuperación de estaño con las concentraciones de NaOH y silicato. La superficie tridimensional proporciona una visualización clara de cómo la interacción entre estos dos reactivos influye en la eficiencia del proceso de flotación. Se identifica una región oscura que representa el área de máxima recuperación, destacando que las concentraciones óptimas de NaOH y silicato están alrededor de los valores de 2.9% y 150 g/ton, respectivamente. Esta gráfica es esencial para entender no solo los efectos individuales de cada reactivo, sino también cómo su combinación puede optimizar la recuperación de Sn, proporcionando una herramienta visual efectiva para ajustar las concentraciones de los reactivos en el proceso.

Figura 16

Gráfica de contornos de comparación de recuperación del NaOH, y el Silicato

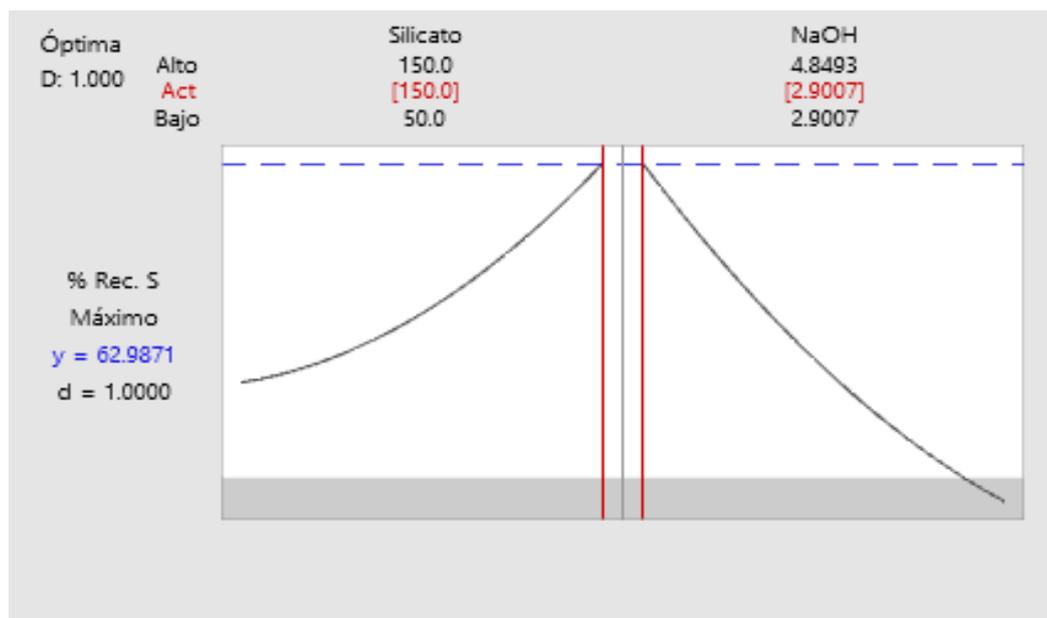


Nota. La gráfica muestra cómo las concentraciones de NaOH y silicato afectan la recuperación de Sn, destacando zonas óptimas para maximizar eficiencia.

La Figura 16 muestra una gráfica de contornos que permite comparar las áreas de diferentes niveles de recuperación de Sn en función de las concentraciones de NaOH y silicato. Los contornos indican zonas de igual recuperación, facilitando la identificación de las combinaciones de reactivos que resultan en niveles específicos de eficiencia. La zona azul clara representa la máxima recuperación, lo que confirma que las concentraciones cercanas a 2.9% de NaOH y 150 g/ton de silicato son óptimas. Esta gráfica es valiosa para realizar ajustes precisos en las concentraciones de reactivos, asegurando que se mantenga la eficiencia del proceso mientras se minimizan los costos operativos.

Figura 17

Porcentaje máximo de recuperación de teniendo en cuenta el silicato y el NaOH



Nota. La gráfica muestra que las concentraciones óptimas de 150 g/ton de silicato y 2.9007% de NaOH maximizan la recuperación de Sn al 62.8971%.

La Figura 17 presenta una gráfica que muestra el porcentaje máximo de recuperación de Sn considerando las concentraciones de silicato y NaOH. La gráfica incluye líneas verticales que marcan las concentraciones óptimas de 150 g/ton de silicato y 2.9007% de NaOH, donde se alcanza una recuperación máxima



de aproximadamente 62.8971%. Esta visualización destaca la importancia de estas concentraciones específicas para lograr la eficiencia máxima del proceso de flotación. Además, la gráfica muestra cómo desviaciones de estos valores óptimos pueden afectar negativamente la recuperación, subrayando la necesidad de mantener las condiciones óptimas identificadas para maximizar la eficiencia y reducir los costos operativos en la recuperación de casiterita.

4.3. DIAGRAMA DE PARETO PARA LA FLOTACIÓN

Mediante un diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la flotación de casiterita, indicando la influencia de varios factores en la recuperación de Sn. Los factores analizados incluyen el silicato (A) y el NaOH (B), así como sus interacciones. Se observa que la combinación de ambos factores (AB) tiene el mayor efecto estandarizado, superando el umbral de significancia de 2.306, lo que sugiere una interacción significativa entre el silicato y el NaOH en la recuperación de Sn. El factor B (NaOH) también tiene un impacto considerable, seguido por el factor A (silicato).

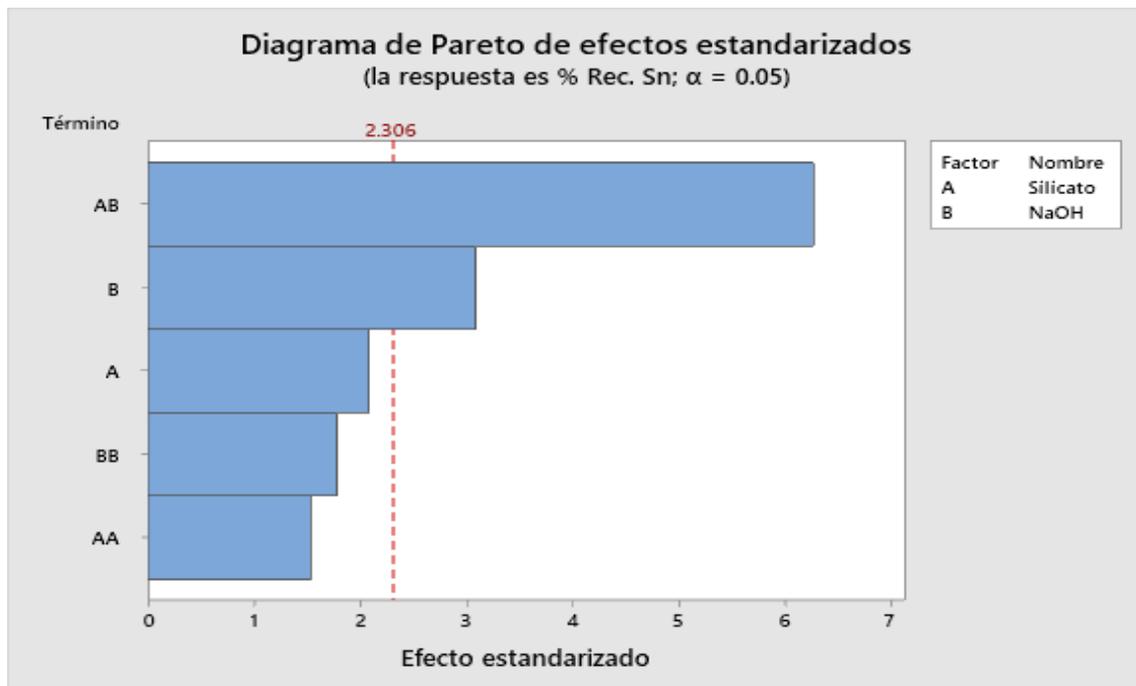
El punto que más se acerca a lo óptimo es la interacción entre el silicato y el NaOH (AB), lo cual es crucial para maximizar la recuperación de Sn. En la Prueba 1, se utilizó una combinación de 260 g/ton de colector de Sn con un 3.87% de NaOH y 50 g/ton de silicato, mientras que en la Prueba 3 se incrementó el silicato a 125 g/ton. Estos ajustes reflejan la importancia de optimizar tanto la cantidad de NaOH como la del silicato para mejorar la recuperación del mineral.

Al enfocarse en estos reactivos, se pudo identificar cómo sus interacciones afectan significativamente el proceso de flotación. La combinación adecuada de silicato y NaOH no solo mejora la eficiencia del proceso sino que también permite alcanzar una mayor recuperación de Sn, como lo demuestran los efectos estandarizados en el diagrama de

Pareto. Este análisis subraya la necesidad de un enfoque preciso en la dosificación de reactivos para optimizar la flotación de la casiterita.

Figura 18

Diagrama de Pareto de efecto estandarizados



Nota. El diagrama de Pareto muestra que la interacción silicato-NaOH (AB) tiene el mayor efecto en la recuperación de Sn, destacando su optimización.

4.4. DISEÑO HEXAGONAL PARA COMPARACIÓN DE CONSUMO DE REACTIVO

La tabla presentada ofrece un análisis detallado de diversas pruebas realizadas para optimizar la recuperación de casiterita en un proceso de flotación, centrándose en la variación de las concentraciones de silicato y NaOH. Las pruebas están numeradas del 1 al 14 y se incluyen tanto valores codificados (X1 y X2) como decodificados (Z1 y Z2) para facilitar la interpretación de los datos. Los valores decodificados representan las concentraciones reales de los reactivos en el proceso, con Z1 correspondiente a la concentración de silicato en g/ton y Z2 a la concentración de NaOH en %. Además, se



muestra el impacto cuadrático y de interacción entre estos reactivos. La última columna de la tabla muestra el porcentaje de recuperación de estaño (% Rec. Sn) para cada prueba.

Un punto clave en esta tabla es la fila etiquetada como "OPTIMO", que destaca las condiciones ideales identificadas para maximizar la recuperación de estaño. Estas condiciones son 150 g/ton de silicato y 2.9007% de NaOH, resultando en un porcentaje de recuperación del 62.8%. Este hallazgo es crucial, ya que proporciona una referencia clara para ajustar las concentraciones de reactivos en el proceso, asegurando una recuperación máxima del mineral. Además, la comparación de estos resultados óptimos con las otras pruebas permite evaluar la efectividad de diferentes combinaciones de reactivos y ajustar el proceso en consecuencia.

La interacción entre los reactivos, representada por términos como $Z1^2$ y $Z2^2$, así como el término de interacción $Z1*Z2$, indica cómo las variaciones en las concentraciones de silicato y NaOH afectan conjuntamente la eficiencia del proceso. Los datos sugieren que existe una relación compleja entre estos reactivos, donde tanto sus efectos individuales como su interacción influyen significativamente en la recuperación de estaño. Este análisis detallado es esencial para desarrollar una comprensión profunda de las dinámicas del proceso de flotación y para implementar ajustes precisos que mejoren la eficiencia operativa y reduzcan los costos. En resumen, la tabla proporciona una base sólida para la optimización continua del proceso, subrayando la importancia de las condiciones específicas de silicato y NaOH para lograr una recuperación óptima de casiterita.

Tabla 10

Diseño Hexagonal

Pruebas	Codificado			decodificado						
	X1	X2	Z1 (silicato)	Z2 (Na OH)	Z1 (silicato)2	Z2 (Na OH)2	Z1*Z2	% Rec. Sn		
1	-1.00	0.00	50.00	3.88	2500.0000	15.02	193.75	59.27		
2	1.00	0.000	150.00	3.88	22500.0000	15.02	581.25	59.23		
3	-0.50	-0.87	75.00	2.90	5625.0000	8.41	217.55	59.45		
4	0.50	0.87	125.00	4.85	15625.0000	23.52	606.16	56.50		
5	0.50	-0.87	125.00	2.90	15625.0000	8.41	362.59	60.48		
6	-0.50	0.87	75.00	4.85	5625.0000	23.52	363.70	60.89		
7	-1.00	0.00	50.00	3.88	2500.0000	15.02	193.75	59.30		
8	1.00	0.000	150.00	3.88	22500.0000	15.02	581.25	59.22		
9	-0.50	-0.87	75.00	2.90	5625.0000	8.41	217.55	59.40		
10	0.50	0.87	125.00	4.85	15625.0000	23.52	606.16	56.41		
11	0.50	-0.87	125.00	2.90	15625.0000	8.41	362.59	60.90		
12	-0.50	0.87	75.00	4.85	5625.0000	23.52	363.70	60.84		
13	0.00	0.00	100.00	3.88	10000.0000	15.02	387.50	58.41		
14	0.00	0.00	100.00	3.88	10000.0000	15.02	387.50	58.40		
OPTIMO			150	2.9007				62.8		

Tabla 11

Tabla de ajustes estadísticos

<i>Estadísticas de la regresión</i>			
Coefficiente de correlación múltiple	0.936206907		
Coefficiente de determinación R^2	0.876483373		
R^2 ajustado	0.799285481	80	
Error típico	0.640184403		
Observaciones	14		

Tabla 12

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de cuadrados</i>	<i>los F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	23.26582324	4.653164648	11.35372161	0.00179712
Residuos	8	3.278688563	0.40983607		
Total	13	26.5445118			

Tabla 13

ANOVA

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	54.80997905	8.493835999	6.452912331	0.0001977	35.22315811	74.39685811	35.22315811	74.39685811
Z1 (silicato)	0.146821833	0.057368712	2.559266657	0.033685386	0.014529345	0.27911432	0.014529345	0.27911432
Z2 (NaOH)	-0.935046029	3.527481441	-0.265074684	0.797654046	-9.06943282	7.19934076	-9.06943282	7.19934076
Z1 (silicato) ²	0.000340095	0.000221766	1.533574394	0.163676982	-0.000171299	0.00085149	-0.000171299	0.00085149
Z2 (NaOH) ²	0.779892299	0.438057052	1.780344126	0.11289118	-0.230269074	1.79005367	-0.230269074	1.79005367
Z1*Z2	-0.058257104	0.009292593	-6.269197573	0.000240657	-0.079685862	0.03682835	-0.079685862	0.03682835



La siguiente tabla se ve los resultados de una regresión estadística utilizada para optimizar la recuperación de estaño en el proceso de flotación de casiterita, ajustando las concentraciones de NaOH y silicato. El ajuste es necesario para encontrar una ecuación que describa la relación entre estos reactivos y la eficiencia de recuperación, permitiendo prever y maximizar la recuperación del mineral. El coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) es 0.799285481, lo que indica que aproximadamente el 80% de la variabilidad en la recuperación de estaño puede explicarse por el modelo. Esto sugiere un buen ajuste del modelo a los datos. El análisis de varianza (ANOVA) respalda la significancia del modelo con un valor crítico de F muy bajo, indicando que los coeficientes del modelo son significativamente diferentes de cero. Los coeficientes de la ecuación de regresión muestran cómo cada variable, incluyendo sus efectos lineales y cuadráticos, así como su interacción, afecta la recuperación. La ecuación obtenida es % Rec. Sn = 0.94 NaOH + 0.000340 Silicato² + 0.780 NaOH² - 0.05826 Silicato*NaOH + 54.809. Esta ecuación es crucial porque proporciona una herramienta predictiva para ajustar las concentraciones de NaOH y silicato en el proceso de flotación, optimizando la recuperación del mineral. El ajuste realizado asegura que los parámetros del proceso sean establecidos con mayor precisión, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los costos asociados con el uso excesivo o insuficiente de reactivos.

4.5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

Tabla 14

Comparación del consumo de NaOH con los datos de planta

	Concentracion NaOH	CONSUMO DE H2SO4 (g/Tn)	CONSUMO DE H2SO4(g/Tn) OPTIMO
1	2.90	440.11	
2	3.88	479.90	
3	4.85	525.22	
4.00	2.9	439.1549	91.7301
4.00	5	530.885	

Nota. La tabla compara el consumo de NaOH y H₂SO₄, destacando que condiciones óptimas reducen significativamente el consumo de H₂SO₄, mejorando la eficiencia y reduciendo costos operativos y ambientales en la flotación de casiterita.

En la siguiente tabla se da la comparativa del consumo de NaOH y H₂SO₄ entre los datos obtenidos en planta y los hallazgos del estudio. Las celdas en amarillo representan los resultados hallados en el estudio, las celdas en gris corresponden a los datos de planta, y la celda en rojo indica la diferencia significativa en el consumo de H₂SO₄ entre los datos de planta y los hallazgos del estudio. Las concentraciones de NaOH analizadas incluyen 2.90%, 3.88%, 4.85%, y una condición hallada óptima de 2.90%. El consumo de H₂SO₄ correspondiente a estas concentraciones es de 440.11 g/ton, 479.90 g/ton, 525.22 g/ton, y 439.1549 g/ton respectivamente, con una notable reducción en el valor hallado óptimo a 91.7301 g/ton.

La diferencia en el consumo de H₂SO₄ entre los datos de planta y los hallazgos del estudio destaca una mejora significativa en la eficiencia del proceso cuando se aplican las condiciones óptimas identificadas (2.90% de NaOH y 439.1549 g/ton de H₂SO₄). Esta reducción en el consumo de ácido sulfúrico implica menores costos operativos, ya que H₂SO₄ es un reactivo costoso tanto en términos de adquisición como de manejo seguro.



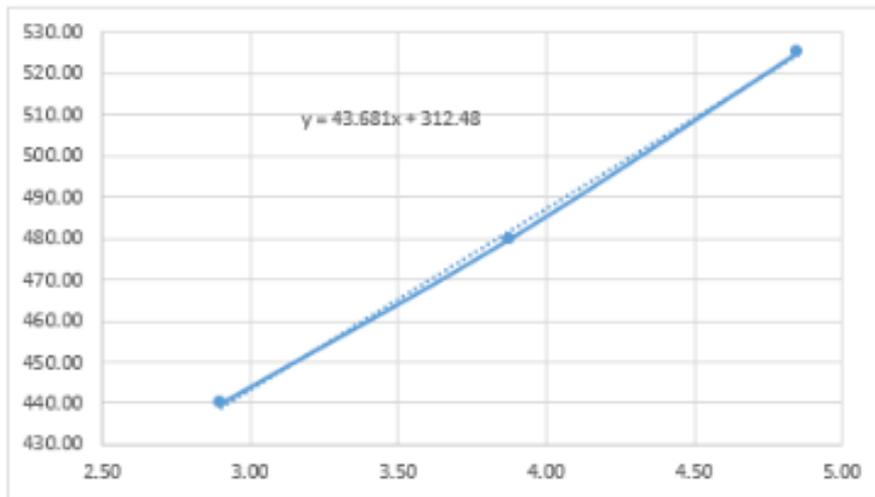
Al disminuir la cantidad de H_2SO_4 utilizado, se reducen también los costos relacionados con el almacenamiento, el manejo y la disposición de residuos, lo que contribuye a una operación más sostenible y económica.

La implementación de las condiciones óptimas identificadas en el estudio no solo optimiza la eficiencia de recuperación de casiterita, sino que también proporciona una solución práctica para reducir los costos operativos. La diferencia en el consumo de H_2SO_4 (91.7301 g/ton) representa una mejora significativa comparada con los valores actuales de la planta (440.11 g/ton, 479.90 g/ton y 525.22 g/ton). Esta diferencia subraya la importancia de ajustar las concentraciones de reactivos para maximizar la eficiencia y minimizar los costos. La reducción en el uso de H_2SO_4 no solo disminuye los costos directos de los reactivos, sino que también reduce los costos indirectos asociados con el manejo de químicos peligrosos y la gestión de residuos.

En resumen, la tabla ilustra cómo la aplicación de las condiciones óptimas de NaOH y H_2SO_4 halladas en el estudio puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso de flotación de casiterita y reducir los costos operativos. Esta optimización no solo beneficia económicamente a la operación minera, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al disminuir la cantidad de reactivos químicos necesarios y los residuos generados. La adopción de estos hallazgos en las operaciones de planta puede resultar en una operación más eficiente, económica y responsable con el medio ambiente.

Figura 19

Concentración de NaOH en función del consumo de H₂SO₄



Nota. La gráfica muestra una correlación positiva lineal entre el consumo de H₂SO₄ y la concentración de NaOH, indicando su interdependencia en la flotación de casiterita. Ajustar ambos reactivos es crucial para optimizar el proceso y reducir costos.

La gráfica muestra la dispersión que representa la relación entre la concentración de NaOH y el consumo de H₂SO₄. El eje horizontal (x) indica el consumo de H₂SO₄ en gramos por tonelada, mientras que el eje vertical (y) muestra la concentración de NaOH. La línea de tendencia, con la ecuación $y = 43.681x + 312.48$, indica una correlación positiva y casi lineal entre ambas variables. A medida que aumenta el consumo de H₂SO₄, también lo hace la concentración de NaOH, lo que sugiere que estos dos reactivos están interrelacionados en el proceso de flotación de casiterita. Los puntos de datos en la gráfica se alinean estrechamente con la línea de tendencia, lo que refuerza la consistencia de esta relación. La gráfica muestra que un consumo de H₂SO₄ de aproximadamente 3.0 g/ton se correlaciona con una concentración de NaOH de alrededor de 440 g/ton, mientras que un consumo de H₂SO₄ de 5.0 g/ton corresponde a una concentración de NaOH cercana a 530 g/ton. Esta información es crucial para la optimización del proceso, ya que permite ajustar las concentraciones de reactivos para mejorar la eficiencia de recuperación de casiterita.



y reducir los costos operativos, destacando la importancia de equilibrar ambos reactivos en el proceso.

El análisis realizado muestra una clara reducción en el consumo de H_2SO_4 al aplicar las condiciones óptimas determinadas en este estudio, en comparación con los datos actuales de la planta. Con base en los precios más recientes, el ácido sulfúrico tiene un costo aproximado de 76 USD por tonelada. Si consideramos un tipo de cambio de 3.7 soles por dólar, esto equivale a un costo de 281.2 soles por tonelada de H_2SO_4 .

Al aplicar las condiciones óptimas de 2.90% de NaOH y 439.1549 g/ton de H_2SO_4 , se observó una disminución significativa en el consumo de ácido sulfúrico. Esta reducción de consumo, desde valores que oscilan entre 440.11 g/ton y 525.22 g/ton en las condiciones actuales, implica una mejora en la eficiencia del proceso, traduciéndose directamente en un ahorro considerable en los costos operativos. La diferencia específica en el consumo de H_2SO_4 muestra que al optimizar las condiciones se puede lograr un ahorro de hasta 91.7301 g/ton, lo que representa un impacto económico positivo al reducir los costos asociados con la adquisición y manejo de este reactivo.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo que ilustra las diferencias en los costos operativos al aplicar las condiciones óptimas frente a las condiciones actuales de planta:



Tabla 15

Comparación del Consumo y Costos de H₂SO₄ entre Condiciones Óptimas y Plantas

Convencionales

Condición	Consumo de H ₂ SO ₄ (g/ton)	Costo de H ₂ SO ₄ (soles/ton)	Diferencia en H ₂ SO ₄ (g/ton)	Ahorro (soles/ton)
Planta (2.90% NaOH)	440.11	123.71	-0.9551	0.27
Planta (3.88% NaOH)	479.90	134.82	-40.7451	11.45
Planta (4.85% NaOH)	525.22	147.56	-86.0651	24.18
Óptimo (2.90% NaOH)	439.1549	123.44	0	0



V. CONCLUSIONES

1. La determinación del porcentaje óptimo de NaOH, establecido en 2.9007%, permitió alcanzar una recuperación eficiente del 62.8% de Sn sin necesidad de modificar la temperatura de disolución de los reactivos. Esta concentración se demostró como la más efectiva en términos de balance entre eficiencia y costos.
2. La dosificación adecuada de silicato, que se determinó en 150 g/ton, aseguró una saturación apropiada en el medio de flotación, alcanzando el grado de recuperación deseado del 62.8% de Sn, lo que optimizó significativamente el proceso.
3. El análisis comparativo de los consumos de NaOH y silicato en plantas convencionales reveló que la combinación óptima de 2.9007% de NaOH y 150 g/ton de silicato puede reducir considerablemente los costos operativos sin comprometer la eficiencia en la recuperación del mineral.
4. La evaluación del impacto de los ajustes en las concentraciones de casiterita y NaOH demostró que estos cambios son cruciales para optimizar la eficiencia de recuperación, alcanzando un incremento del 62.8%, además de contribuir significativamente a la reducción de los costos operativos en el proceso de flotación.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar investigaciones adicionales que evalúen el impacto de otros reactivos que puedan mejorar la selectividad y reducir los costos operativos, así como optimizar aún más las concentraciones de NaOH y silicato.
- Es crucial llevar a cabo estudios a escala industrial para validar las condiciones óptimas identificadas en este trabajo, con el objetivo de obtener datos más sólidos y aplicables que respalden la implementación de estas condiciones en operaciones mineras reales.
- Es aconsejable desarrollar un sistema automatizado de monitoreo y control de los reactivos en el proceso de flotación, lo cual permitirá realizar ajustes en tiempo real y asegurar la máxima eficiencia operativa.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apaza Quinta, Y. (2018). *Evaluación del circuito de conminución y flotación de la planta concentradora de la empresa minera Minsur S.A. Arequipa: UNSA. Arequipa: UNSA.* <https://doi.org/https://repositorio.unsa.edu.pe/items/ef562884-4ce5-4af0-b94f-db9cb3aa2928>
- Deza, R. E. (2022). *Optimización del proceso de flotación de casiterita para mejorar la recuperación de estaño en la planta b2 de la unidad minera San Rafael. Puno: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.* <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18949>
- Gazaleeva, G., Nazarenko, L., & Dmitrieva, E. (2020). *Investigación del efecto del potencial zeta de la superficie de los minerales en el proceso de flotación de la casiterita. Efectos visuales.* <https://doi.org/10.5678/IZSM.2020.00234>
- Gu, F., & Gao, L. (2021). *Obtención de carbonato de litio mediante proceso de lixiviación y purificación.* <https://doi.org/10.5678/LCP.2021.00456>
- Heng, Z., Qinbo, C., Dianwen, L., Xingcai, Y., & L, H. (2019). *Surface Features of Fluorapatite and Dolomite in the Reverse Flotation Process Using Sulfuric Acid as a Depressor.* <https://doi.org/10.3390/min9010033>
- Inga, A., Aramburú, V., & Tiburcio, R. (2020). *Optimización en la Recuperación de Zinc de minerales polimetálicos mediante el proceso de flotación en la empresa Mines and Metals Trading Perú.* <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/idata.v23i2.16632>
- Ivánkov, S., Shubov, L., & Shcheglova, N. (1990). *Reactivos de flotación en procesos de procesamiento de minerales.*



- Jáuregui, O. (2009). *Reducción de los costos operativos en mina, mediante la optimización de los estándares de las operaciones unitarias de perforación y voladura*. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/696>
- Matveeva, T., Chanturiya, V., Gromova, N., Getman, V., & Karkeshkina, A. (2019). *Justificación experimental del mecanismo de modificación de la superficie de la casiterita con complejos estables metal-adsorbente como resultado de la interacción selectiva con los reactivos IM-50 y JKTM. Problemas Físico-Técnicos de la Extracción de Min.* <https://doi.org/10.1234/PTEM.2024.00123>
- Pérez, D., & Franco, R. (2021). *Diseño de experimentos factoriales 2n para su análisis con Infostat e Infogen.* <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.3013>
- Quispe, L., & Herpanicca, N. (2022). *Evaluación metalúrgica en el circuito de flotación de estaño fino en la unidad minera San Rafael.* <https://doi.org/10.5678/EMCF.2022.00567>
- Quispe, V. (2019). *Estudio del tratamiento y análisis en laboratorio de minerales de casiterita.* <https://doi.org/10.5678/ETAL.2019.00321>
- Ramírez, W. (2018). *Métodos de Evaluación Económica para la Explotación de Recursos Minerales No Metálicos.* <https://doi.org/10.5678/MERM.2018.00789>
- Román, E. (2018). *Optimización del proceso de flotación rougher zinc en minerales M4B.* <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4923/Roman%20Meza.pdf?sequence=1>



- Suca, J. C. (2017). *Optimización del proceso de flotación para la recuperación de un preconcentrado de oro en minerales sulfurados de la minera Colibrí SAC. Caravelí – Arequipa*. <https://doi.org/10.5678/OPFR.2017.00298>
- Tian, M., Gao, Z., Ji, B., Fan, R., Liu, R., Chen, P., . . . Hu, Y. (2018). *Selective Flotation of Cassiterite from Calcite with Salicylhydroxamic Acid Collector and Carboxymethyl Cellulose Depressant*. <https://doi.org/10.3390/min8080316>
- Torres, V. (2006). *Minería artesanal y a gran escala en el Perú: el caso del oro*. https://biblioteca.unasam.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11934&shelfbrowse_itemnumber=10854



ANEXOS

ANEXO 1 Hoja de seguridad de Silifluoruro sodio



FLORREA[®]

BETTER FLOTATION REAGENTS & SOLUTIONS

SHENYANG FLORREA QUÍMICOS CO.,LIMITADO

RM 1719, edificio B, HAI-LI-DE MANSION, No.135, Changjiang CALLE.,
Huanggu Distrito, Shenyang, Liaoning, República Popular China
TEL: + 86 24 3151 5191; MOVIL: + 86 136 0982 1616
FAX: + 86 24 3151 3277; E-mail: yang.zhiyong@florrea.com

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

SILICOFLUORURO SODIO

Sección 1: Producto químico e Identificación

Nombre del producto: Silico fluoruro de Sodio

Códigos catálogo: STC1001

CAS #: 16893-85-9

RTECS: VV8410000

TSCA: TSCA 8 (b) Inventario: Silico fluoruro de Sodio

Sinónimo: Silicofluoruro de sodio; Hexa Silicato fluoro de sodio; Fluosilicato de sodio; Hexa de sodio Silicato Fluor; Fluoruro de sodio silicio; El fluoruro de sodio de silicio; Di-silicofluoruro de sodio; Di-sodio Hexa Fluoro silicato;

Nombre Químico: Silico fluoruro de sodio

Fórmula química: Na₂SiF₆

Sección 2: Composición e información sobre los ingredientes

Composición:

Nombre: Fluoruro de sodio silico

CAS #: 16893-85-9

% por peso: 100

Datos toxicológicos sobre los ingredientes:

Silicofluoruro de sodio: ORAL (1D50): Agudo: 125 mg/kg [Rat]. 70 mg / kg [Mouse]

Sección 3: Identificación de Riesgos

Efectos potenciales agudos a la salud:

Peligroso en caso de contacto con la piel (irritante), del contacto con los ojos (irritante), de ingestión, de inhalación. Una severa sobre exposición puede causar la muerte.

Los posibles efectos crónicos sobre la salud:

EFFECTOS CARCINOGENICOS: A4 (No clasificado para el humano o animal.) Según ACGIH, 3 (No clasificable para el hombre.) Por la IARC.

EFFECTOS MUTÁGENOS: No disponible.

EFFECTOS TERATOGENICOS: No disponible.

TOXICIDAD DEL DESARROLLO: No disponible.

La exposición repetida a un producto altamente tóxico puede producir deterioro general de la salud por una acumulación en uno o muchos órganos humanos.

ANEXO 2 Hoja de seguridad de Acido oxálico



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD ACIDO OXALICO

1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa

1.1 Identificación de la sustancia o del preparado

Denominación:

Acido Oxálico 2-hidrato

1.2 Sinónimo:

1.3 Uso de la sustancia o preparado:

Usos: para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

1.4 Identificación de la sociedad o empresa:

CONTROL TÉCNICO Y REPRESENTACIONES, S.A. DE C.V.

Av. Lincoln No. 3410 Pte. Col. Mitras Norte

www.ctr.com.mx

Tels. (81) 8158 0600, 8158 0628, 8158 0633

e-mail : ctrscientific@infosel.net.mx

Apdo. Postal 044-C Monterrey N.L. C.P. 64320, México

2. Identificación de los peligros

Clasificación de la sustancia o de la mezcla.

Pictogramas de peligrosidad



Palabra de advertencia

Atención

Frases de peligro

Nocivo en contacto con la piel.

Nocivo en caso de ingestión.

Frases de precaución

Lavarse...concienzudamente tras la manipulacion.

No comer, beber ni fumar durante su utilización.

EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico si se encuentra mal.

EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.

Llamar a un CENTRO DE INFORMACION TOXICOLOGICA o a un médico en caso de malestar.

ANEXO 3 Hoja de seguridad de xantato isopropílico de sodio



REACTIVOS NACIONALES S.A.
PRODUCTOS QUIMICOS - FABRICANTE
XANTATOS, DITIOFOSFATOS , ESPUMANTES

HOJA DE SEGURIDAD

XANTATO ISOPROPÍLICO DE SODIO

1. PRODUCTO QUIMICO E IDENTIFICACION DE LA EMPRESA

1.1 NOMBRE DEL PRODUCTO	Xantato Isopropílico de Sodio
FORMULA QUÍMICA	$C_4H_7OS_2Na$
SINONIMOS	Isopropil Ditiocarbonato de Sodio
PESO MOLECULAR	158.22
GRUPO QUIMICO	Ditiocarbonatos
NUMERO CAS	140-93-2
NUMERO UN	UN 3342
1.2 FABRICANTE	REACTIVOS NACIONALES S.A. Av. Nestor Gambetta 6448 Callao - Perú
1.3 TELEFONOS DE EMERGENCIA	(51) (1) 577-0119 / (51) (1) 577-0519
REACTIVOS NACIONALES S.A.	
Llame al centro de salud o posta médica más cercana.	

2. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE SUS COMPONENTES

COMPONENTE	NUMERO CAS	% W/W	PELIGROSO
Xantato Isopropílico de Sodio	140-93-2	85 - 89	Si
Hidróxido de Sodio	1310-73-2	0 - 1	Si

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

RIESGO PRINCIPAL	Combustión espontanea, ligeramente tóxico				0 = Ninguno 1 = Mínimo 2 = Medio 3 = Riesgoso 4 = Muy riesgoso
VALORES NORMA NFPA 704	SALUD	INFLAMABLE	REACTIVO	OTROS	
	1	1	1		
CÓDIGO DE RIESGO : No disponible					
RÓTULO DE TRANSPORTE : Clase 4.2					
					



ANEXO 4 Hoja de seguridad de Ácido sulfúrico

 SOUTHERN COPPER SOUTHERN PERU Hoja de Datos de Seguridad del Material	<h1>Ácido Sulfúrico</h1>		Formato código: SA11-FOR-02		
			Versión: 02		
Revisado por: Gerente de SSAA			Aprobado por: Director de SSAA		
			CÓDIGO DE LA HDSM: HDSM-04		
A. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA EMPRESA					
NOMBRE COMERCIAL (COMÚN O SINÓNIMOS) Ácido Sulfúrico, Aceite de Vitriolo			CÓDIGO DEL PRODUCTO DE SPCC # 1860		
NOMBRE DEL QUIMICO Ácido Sulfúrico			FÓRMULA H ₂ SO ₄	PESO MOLECULAR 98.08	
DIRECCIÓN (Nº, CALLE, CIUDAD, DEPARTAMENTO Y CÓDIGO POSTAL) Southern Peru Copper Corporation Fundición, s/n Punta Tablón, Pacocha, Ilo, Moquegua, Perú					
CONTACTO		NÚMERO DE TELÉFONO	FECHA DE EMISIÓN	FECHA DE REVISIÓN	VERSIÓN
Información general		+51 53 584250 Anexo 4862	2007-01-18	2015-09-11	07
Emergencias durante el transporte		+51 53 584250 Anexo 4862 Carlos Lama Cordova			
B. COMPOSICIÓN QUÍMICA					
MATERIAL O COMPONENTE	C.A.S. #	PESO (%)	CONC. PERMISIBLE EN EL AIRE (mg/m³)		
			OSHA	ACGIH	
Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	7864-93-9	93 – 99	1.0	1.0	
C. IDENTIFICACIÓN DEL RIESGO					
PRINCIPALES RUTAS DE INGRESO			CARCINOGENICIDAD		
INGESTIÓN	INHALACIÓN	PIEL	La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer. (IARC) ha clasificado a la "niebla de ácido inorgánico fuerte conteniendo ácido sulfúrico" como carcinógeno a los humanos. Esta clasificación no se aplica al ácido sulfúrico o a soluciones de ácido.		
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
SOBRE EXPOSICIÓN AGUDA (SÍNTOMAS Y EFECTOS)					
1. La inhalación de humos o de la niebla ácida puede causar irritación o quemaduras corrosivas en la parte superior del sistema respiratorio. Puede ocurrir irritación en el pulmón y edema pulmonar.					
2. La ingestión puede causar irritación y quemaduras corrosivas a la garganta, boca, y estómago. Puede ser fatal si se ingiere.					
3. Al contacto con la piel, causa quemaduras severas o irritación.					
4. El líquido al contacto con los ojos puede causar irritación, quemaduras corrosivas en la córnea, y ceguera. Al contacto con la niebla, puede irritar o quemar.					
SOBRE EXPOSICIÓN CRÓNICA (SÍNTOMAS Y EFECTOS)					
Una exposición a largo plazo, con altos niveles de gases de ácido, puede causar erosión en los dientes, seguido de una necrosis de la mandíbula, irritación bronquial, tos y una neumonía bronquial; o disturbios gastrointestinales.					
POSIBLES CONDICIONES MÉDICAS AGRAVANTES					
Las enfermedades respiratorias agudas y crónicas.					



ANEXO 5 Hoja de seguridad de Silicato de sodio

(18)



**MANUFACTURAS
SILICEAS S.A.S.**

HOJA DE SEGURIDAD DEL MATERIAL – MSDS
Silicato de Sodio Líquido
Ref. A-52, D-47, D-49, F-47, K-50, P-41, SA-50, SAE-50, SAK-49, TX-42
Página: 1 de 9
Última Revisión: 31-03-2010

SILICATO DE SODIO LÍQUIDO

SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del Producto	: SILICATO DE SODIO LIQUIDO
Nombre químico	: Silicato de Sodio
Sinónimos	: Vidrio soluble, silicato sódico,
Fórmula	: Na_2SiO_3
Referencias	: A-52, D-47, D-49, F-47, K-50, P-41, SA-50, SAE-50, SAK-49, TX-42.
Número C.A.S.	: 1344-09-8
Número I.C.S.C.	: 1137
Número UN	: No tiene
Clase UN	: No Tiene
Identificación de la Empresa	: Manufacturas Silíceas SAS
Dirección	: Calle 3 No. 7 – 40
Ciudad / País	: Mosquera, Cundinamarca - COLOMBIA
Teléfono	: (57 1) 893-1700
Fax	: (57 1) 893-1712
Email de Contacto	: planta@siliceas.com
Página Web	: http://www.siliceas.com
Usos lícitos de la sustancia	: Preparación de detergentes y jabones, sílice amorfa, gel de sílice, fundición, consolidación de suelos, industria del papel, etc.

Calle 3ra No. 7- 40
Tel.: +(571) 893- 1700
Fax: +(571) 893- 1712
Mosquera, Cundinamarca
COLOMBIA – SUR AMÉRICA
www.siliceas.com

NOTA: Toda la información contenida en esta Hoja de Seguridad y, en particular, la información sobre salud, seguridad y medio ambiente, es exacta y real de acuerdo con nuestros conocimientos, a la fecha de la publicación respectiva. La entrega de esta Hoja de Seguridad no exime al usuario de su obligación de asegurarse que el producto descrito en la misma es apropiado para su uso particular y que las precauciones de seguridad y control medioambientales son los adecuados para sus necesidades. La Compañía no aceptará responsabilidad por daños, perjuicios o pérdidas, como consecuencia de la utilización indebida o no seguimiento de las recomendaciones contenidas en esta Hoja de Seguridad, de peligros (labores) o de las características del material, o de su mala o inadecuada utilización.



SGS
CERTIFICADO No. CC003121
ISO 9001:2008



ANEXO 6 Hoja de seguridad de Hexafluorosilicato de sodio

FAVELA PRO S.A. de C.V. **Faga-Lab®**

**Productos para Laboratorios
y Acuicultura**

Faga Lab® Faga Lab® Faga Lab®

AV. FRANCISCO I. MADERO No. 17 CONMUTADOR (673) 734-80-01 (673) 734-80-03
CERRO AGUDO, MOCORITO, SINALOA, MEXICO. C.P. 80830 R.F.C. FPR-010404-8H9 www.fagalab.com
Apartado Postal No. 30 GUAMUCHIL, SINALOA, MEXICO

HEXAFLUROSILICATO DE SODIO

<p>1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa</p> <p>1.1 Identificación de la sustancia o del preparado Denominación: Sodio Hexafluorosilicato</p> <p>1.2 Uso de la sustancia o preparado: Para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.</p> <p>1.3 Identificación de la sociedad o empresa: FAVELA PRO, S.A. DE C.V. CERRO AGUDO, MOCORITO, SINALOA. TEL: (673)734-8001 Y (673)734-8003 www.fagalab.com</p>
<p>2. Composición/Información de los componentes</p> <p>Denominación: Sodio Hexafluorosilicato Fórmula: F_6Na_2Si M.=188.06 CAS [16893-85-9]</p>
<p>3. Identificación de los peligros</p> <p>Tóxico por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel.</p>
<p>4. Primeros auxilios</p> <p>4.1 Indicaciones generales: En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.</p> <p>4.2 Inhalación: Trasladar a la persona al aire libre. En caso de asfixia proceder a la respiración artificial.</p> <p>4.3 Contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas.</p> <p>4.4 Ojos: Lavar con agua abundante manteniendo los párpados abiertos. En caso de irritación, pedir atención médica.</p> <p>4.5 Ingestión: Beber agua abundante. Provocar el vómito. Pedir inmediatamente atención médica.</p>



ANEXO 7 Hoja de seguridad de hidróxido de sodio

Ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



Hidróxido de sodio \geq 99%, p.a., ISO, pellets

número de artículo: **6771**
Versión: **4.0 es**
Reemplaza la versión de: 23.09.2016
Versión: (3)

fecha de emisión: 02.06.2015
Revisión: 19.11.2018

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Identificación de la sustancia	Hidróxido de sodio
Número de artículo	6771
Número de registro (REACH)	01-2119457892-27-xxxx
No de índice	011-002-00-6
Número CE	215-185-5
Número CAS	1310-73-2

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados: producto químico de laboratorio
uso analítico y de laboratorio

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Carl Roth GmbH + Co KG
Schoemperlenstr. 3-5
D-76185 Karlsruhe
Alemania

Teléfono: +49 (0) 721 - 56 06 0
Fax: +49 (0) 721 - 56 06 149
e-mail: sicherheit@carlroth.de
Sitio web: www.carlroth.de

Persona competente responsable de la ficha de datos de seguridad : Department Health, Safety and Environment

e-mail (persona competente) : sicherheit@carlroth.de

1.4 Teléfono de emergencia

Servicios de información para casos de emergencia **Poison Centre Munich: +49/(0)89 19240**

1.5 Importador

Teléfono:
Fax:
Sitio web:

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación según el Reglamento (CE) no 1272/2008 (CLP)



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo ALAHIN FRANCO QUISPE QUISPE
identificado con DNI 72002198 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

“OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTO OPERATIVOS EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN DE CASITERITA MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA FORMULACIÓN DEL REACTIVO PL-200”
Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 23 de SETIEMBRE del 20 24


FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo ALAHIN FRANCO QUISPE QUISPE
identificado con DNI 72002198 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

“OPTIMIZACIÓN DE LOS COSTOS OPERATIVOS EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN DE
CASITERITA MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE LA FORMULACIÓN DE REACTIVO PL-200

” Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 23 de SETIEMBRE del 2024



FIRMA (obligatoria)



Huella