

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**EVALUACION DE REACTIVOS DE FLOTACION POR DISEÑO
EXPERIMENTAL PARA INCREMENTAR LA RECUPERACION DE PLATA
DEL YACIMIENTO DE ALPAYANA UBICADO EN HUAROCHIRI - LIMA**

PRESENTADO POR:

BR. BRIGITD MIREYA UCSA VILLAFUERTE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

MGT. EDUARDO FABIAN ORTIZ SARAVIA

CUSCO – PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Eduardo Fabian Ortiz Saravia
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: Evaluación de Reactivos de Flotación
Por diseño experimental Para incrementar la recuperación
de plata del yacimiento de Alpaxana ubicado en
Huaroachiri - Lima

Presentado por: Brigitd Mireya Uscá Villafuerte DNI N° 73075922,
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Metalurgico

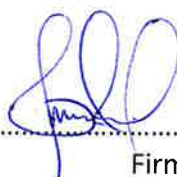
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 02 de Julio de 2026


.....
Firma

Post firma EDUARDO FABIAN ORTIZ SARAVIA

Nro. de DNI 23932525

ORCID del Asesor 0000-0002-6142-3459

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:604039207

Brigitd Mireya Ucsa Villafuerte

Tesis_Mireya_final Repositorio.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:604039207

Fecha de entrega

1 jul 2026, 12:27 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

1 jul 2026, 12:33 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Tesis_Mireya_final Repositorio.pdf

Tamaño del archivo

2.5 MB

112 páginas

22.223 palabras

117.453 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 9%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACION

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Distinguidos señores miembros del jurado.

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos vigente para optar al título profesional de Ingeniera Metalúrgica, me permito presentar a su consideración el siguiente informe de Tesis, titulado:

“EVALUACIÓN DE REACTIVOS DE FLOTACIÓN POR DISEÑO EXPERIMENTAL PARA INCREMENTAR LA RECUPERACIÓN DE PLATA DEL YACIMIENTO DE ALPAYANA UBICADO EN HUAROCHIRÍ – LIMA.”

El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad evaluar el efecto de diferentes reactivos de flotación aplicando un diseño experimental, con el propósito de incrementar la recuperación de plata de los minerales provenientes del yacimiento de Alpayana, ubicado en Huarochirí – Lima. Para ello, se realizaron pruebas metalúrgicas orientadas a determinar la combinación óptima de reactivos que permita maximizar la recuperación metálica, mejorar la eficiencia del proceso de flotación y contribuir a la sostenibilidad económica de la operación minera.

Con la seguridad de que esta investigación servirá de aporte para el desarrollo de la metalurgia de la plata en el Perú y como fuente de consulta para especialistas en el tema.

Br. Brigtd Mireya UCSA VILLAFUERTE

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, fortaleza y fuente de sabiduría a lo largo de este proceso. Su presencia me dio la claridad y el coraje para superar cada desafío y avanzar con fe en cada paso de este camino académico.

A mis padres, por su amor incondicional, sacrificios y apoyo constante. Gracias por enseñarme los valores del esfuerzo, la perseverancia y la humildad. Su ejemplo de vida y su confianza en mí han sido la base de este logro.

A mis hermanos, por su apoyo, aliento y cariño inquebrantables. Su compañía y comprensión hicieron que este recorrido fuera más enriquecedor y llevadero. Gracias por estar siempre a mi lado, alentándome a seguir adelante.

A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por compartir su vasto conocimiento y por motivarme a alcanzar mi máximo potencial. Su dedicación y compromiso con mi formación profesional fueron esenciales en el desarrollo de esta investigación y en mi crecimiento académico.

Brigitd Mireya Ucsa Villafuerte

RESUMEN

La flotación es una técnica ampliamente empleada en la minería para separar minerales valiosos de la ganga, basada en la capacidad selectiva de algunos minerales para adherirse a burbujas de aire, facilitando su separación. La eficiencia de este proceso está influenciada por los reactivos empleados, los cuales alteran las propiedades fisicoquímicas de los minerales.

La presente investigación se centró en la evaluación de reactivos de flotación mediante un diseño experimental con el propósito de incrementar la recuperación de plata en el yacimiento Alpayana, ubicado en Huarochirí, Lima. Para alcanzar este objetivo, se empleó una metodología de tipo aplicada y nivel explicativo bajo un enfoque cuantitativo, utilizando un diseño experimental factorial 2^k procesado en el software estadístico Minitab. Durante el desarrollo experimental, realizado en el laboratorio Certimin, se manipularon variables críticas como el pH, el tiempo de flotación y la dosificación de reactivos específicos, entre los que destacaron los colectores MT6100, MT342 y el modificador Sulfato de Zinc Plus. Los resultados obtenidos demostraron que la interacción de estas variables influyó significativamente en los indicadores metalúrgicos, logrando una optimización del proceso que permitió alcanzar recuperaciones de plata superiores al estándar de 69.5% llegando a 76.9%. En conclusión, se determinó que la estandarización de la dosificación de reactivos y el control riguroso de las condiciones operativas no solo elevaron la eficiencia de la flotación, sino que también mejoraron la ley del concentrado final, validando la rentabilidad técnica y económica de la propuesta para la unidad minera.

Palabras clave: Flotación de Plata, Diseño Factorial, Reactivos MT6100, Optimización Metalúrgica.

ABSTRACT

Flotation is a technique widely used in mining to separate valuable minerals from gangue, based on the selective ability of certain minerals to attach to air bubbles, facilitating their separation. The efficiency of this process is influenced by the reagents used, which alter the physicochemical properties of the minerals. This research focused on the evaluation of flotation reagents through an experimental design with the purpose of increasing silver recovery at the Alpayana deposit, located in Huarochirí, Lima. To achieve this objective, an applied methodology and explanatory level were employed under a quantitative approach, using a 2^k factorial experimental design processed in the Minitab statistical software. During the experimental development, carried out at the Certimin laboratory, critical variables such as pH, flotation time, and the dosage of specific reagents were manipulated, among which the MT6100 and MT342 collectors, and the Zinc Sulfate Plus modifier stood out. The results obtained demonstrated that the interaction of these variables significantly influenced the metallurgical indicators, achieving an optimization of the process that allowed silver recoveries to exceed the standard of 71.5%, reaching 76.9%. In conclusion, it was determined that the standardization of reagent dosage and the rigorous control of operating conditions not only increased flotation efficiency but also improved the grade of the final concentrate, validating the technical and economic profitability of the proposal for the mining unit.

Keywords: Silver Flotation, Factorial Design, MT6100 Reagents, Metallurgical Optimization.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PRESENTACION	II
DEDICATORIA	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Situación problemática	2
1.2. Formulación del problema	3
1.2.1. Problema general	3
1.2.2. Problemas específicos	3
1.3. Justificación	3
1.3.1. Conveniencia	3
1.3.2. Relevancia Tecnológica	3
1.3.3. Relevancia social	4
1.3.4. Valor Teórico	4
1.3.5. Utilidad Metodológica	4
1.4. Objetivo de la investigación	5

1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes internacionales	6
2.2. Antecedentes nacionales	8
2.3. Bases teóricas	11
2.3.1. La Plata	11
2.3.2. Minerales de Plata	11
2.3.3. Flotación de minerales	13
2.3.4. Factores que intervienen en la flotación.	14
2.3.5. Elementos tecnológicos del proceso	19
2.3.6. Principios de Flotación	20
2.3.7. Tipos de Celdas de Flotación	21
2.3.8. Variables Operacionales en el Proceso de Flotación de Plata	29
2.3.9. Fases en el Proceso de Flotación	30
2.3.10. Cinética de flotación	32
2.3.11. Termodinámica de flotación	34
2.3.12. Reactivos utilizados en el proceso de flotación de minerales	38
2.3.13. Diseño Experimental	40
2.4. Definición de términos Básicos	43

CAPÍTULO III: HIPOTESIS Y VARIABLES	46
3.1. Hipótesis	46
3.1.1. Hipótesis General	46
3.1.2. Hipótesis Específicas	46
3.1.2.1. Variable Dependiente	46
3.1.2.2. Variable Independiente	46
3.1.2.3. Variables Intervinientes	46
4.2 Tipo, nivel y Diseño de Investigación	50
4.2.1 Tipo de investigación	50
4.2.2 Nivel de investigación	50
4.2.3 Método de investigación	50
4.3 Población de estudio	51
4.3.1 Población	52
4.3.2 Muestra	52
CAPÍTULO V: PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS	56
5.1. Procedimientos experimentales:	56
5.1.1. Recolección de muestras	56
5.1.2. Preparación de muestras para las pruebas experimentales	56
5.1.3. Flow sheet de trabajo preparación de muestras	57
5.1.4. Análisis químico de la muestra	58

5.1.5. Determinación de la gravedad específica o peso específico de la muestra	58
5.1.6. Cálculo del tiempo óptimo de molienda en seco	60
5.1.7. Preparación de la pulpa para la alimentación a la celda de flotación	64
5.1.8. Preparación de reactivos	65
5.1.9. Procedimiento de las 11 pruebas experimentales de flotación en laboratorio	69
5.2. Diseño Experimental del trabajo de investigación	73
5.3. Evaluación estadística de las pruebas de laboratorio	82
5.4. Discusión de hipótesis	84
CONCLUSIONES	88
RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Comparación entre celda Denver y Columna de Flotacion</i>	28
Tabla 2 <i>Factores y Niveles Considerados en el Estudio de Flotación</i>	42
Tabla 3 <i>Análisis Químico ley de Cabeza ensayada por duplicado</i>	58
Tabla 4 <i>Elementos para determinar gravedad especifica</i>	60
Tabla 5 <i>Determinación de la Gravedad Especifica del Mineral</i>	60
Tabla 6 <i>Cálculos de Consistencia y Preparación de la Pulpa</i>	64
Tabla 7 <i>Detalle de la Composición de la Pulpa para la Alimentación a la Celda de Flotación</i>	64
Tabla 8 <i>Concentración de Reactivos</i>	65
Tabla 9 <i>Dosificación de Reactivos</i>	66
Tabla 10 <i>Reactivos evaluados en el diseño factorial</i>	66
Tabla 11 <i>Condiciones de Flotación</i>	67
Tabla 12 <i>Parámetros para la realización de las pruebas.</i>	73
Tabla 13 <i>Diseño factorial respecto a pesos de cabeza, concentrados y relave del mineral (yacimiento Alpayana)</i>	74
Tabla 14 <i>Diseño factorial respecto al análisis químico de la cabeza del mineral (yacimiento Alpayana)</i>	75
Tabla 15 <i>Diseño factorial respecto al análisis del contenido metálico de cabeza del mineral (yacimiento Alpayana)</i>	76
Tabla 16 <i>Diseño factorial respecto al análisis químico del concentrado del mineral (yacimiento Alpayana)</i>	77

Tabla 17 *Diseño factorial respecto al análisis del contenido metálico del concentrado del mineral (yacimiento Alpayana)* 78

Tabla 18 *Diseño factorial respecto al análisis químico del relave del mineral (yacimiento Alpayana)* 79

Tabla 19 *Diseño factorial respecto al análisis del contenido metálico del relave del mineral (yacimiento Alpayana)* 80

Tabla 20 *Diseño factorial respecto al análisis químico de las recuperaciones del mineral (yacimiento Alpayana)* 81

Tabla 21 *Coeficientes codificados* 82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Principales factores de la Flotación</i>	18
Figura 2 <i>Factor importante del aire en una celda de flotación</i>	18
Figura 3 <i>Corte transversal de una celda de flotación</i>	19
Figura 4 <i>Zonas de una celda Door Oliver</i>	22
Figura 5 <i>Mecanismo de una celda</i>	23
Figura 6 <i>Partes de una celda de Flotacion Wemco</i>	24
Figura 7 <i>Características hidrodinámicas de una celda de flotación Wemco.</i>	24
Figura 8 <i>Celda Wemco con autoareación</i>	25
Figura 9 <i>Esquema de una celda Jameson y sus varias zonas activas.</i>	26
Figura 10 <i>Modelo general de un proceso o sistema.</i>	41
Figura 11 <i>Ubicación geográfica y política</i>	48
Figura 12 <i>Flow sheet de trabajo en planta y en laboratorio metalúrgico de la Empresa</i>	49
Figura 13 <i>Flow sheet de trabajo en planta y en laboratorio metalúrgico de la Empresa:</i>	57
Figura 14 <i>Distribución granulométrica de muestra seca molida a 7 minutos.</i>	62
Figura 15 <i>Distribución granulométrica de muestra seca molida a 14 minutos.</i>	63
Figura 16 <i>Distribución granulométrica de muestra seca molida a 27 minutos</i>	63
Figura 17 <i>Diagrama de Pareto</i>	83
Figura 18 <i>Grafica de efectos principales</i>	83

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación surge ante la necesidad de mejorar la eficiencia en la recuperación de plata del yacimiento Alpayana, ubicado en Huarochirí, Lima. A pesar del potencial económico del mineral, las tasas de recuperación en los procesos actuales de flotación no alcanzan niveles óptimos, lo que impacta directamente en la rentabilidad de la unidad minera. Ante este escenario, se planteó un enfoque sistemático para optimizar el proceso mediante limitaciones operativas y la definición de objetivos orientados a la selección de reactivos y el ajuste de variables críticas como el pH, la dosificación y los tiempos de proceso. La investigación se sustenta en antecedentes nacionales e internacionales sobre la flotación de sulfuros polimetálicos. Se profundiza en los fundamentos fisicoquímicos y el rol de agentes colectores, espumantes y modificadores, así como en la eficiencia de tecnologías de celdas tipo Door-Oliver, Wemco y Jameson. A partir de este sustento teórico, se formularon hipótesis y un esquema de operacionalización de variables que permiten las relaciones técnicas durante la fase experimental.

Bajo un enfoque cuantitativo con diseño factorial 2^k , el estudio analiza muestras representativas del yacimiento para garantizar la confiabilidad de los datos. La fase experimental, desarrollada en el laboratorio Certimin, consistió en ensayos controlados de flotación donde se evaluó el desempeño de reactivos específicos como MT6100, Sulfato de Zinc, ajustando además el pH y el tiempo de residencia para calcular indicadores clave.

Finalmente, mediante el análisis estadístico en el software Minitab, se determinaron los efectos principales y las interacciones entre variables. Los resultados permiten establecer las condiciones operativas óptimas para maximizar la recuperación de plata llegando a 76.5%, proporcionando una solución eficiente, técnica y reproducible para los desafíos metalúrgicos del yacimiento Alpayana.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.Situación problemática

El yacimiento Alpayana representa una fuente estratégica de minerales de plata, cuya explotación es un eje clave para la economía local. Geológicamente, se define como un depósito epigenético hidrotermal de sulfuros polimetálicos con vetas argentíferas de galena y tetraedrita. No obstante, la eficiencia en la recuperación de plata mediante el proceso de flotación no ha alcanzado niveles óptimos, lo que compromete la rentabilidad y la sostenibilidad de la operación minera.

Uno de los principales desafíos radica en la limitada investigación específica sobre la selección y optimización de reactivos. Según Wills y Finch (2015), la recuperación de plata en minerales complejos de sulfuros suele verse afectada por la presencia de minerales portadores de plata que no responden uniformemente a los colectores convencionales, lo que exige un enfoque sistemático basado en el diseño experimental. Actualmente, la falta de metodologías adaptadas a las características mineralógicas particulares de Alpayana impide alcanzar una eficiencia de flotación consistente.

La variabilidad mineralógica de los sulfuros portadores de plata, junto con las condiciones fisicoquímicas del mineral, requiere una evaluación técnica rigurosa. Como sostiene Bulatovic (2017), en la flotación de minerales de plata, el tipo de colector y su dosificación son críticos, ya que una selección inadecuada incrementa las pérdidas en el relave y reduce la selectividad frente a la ganga. Esta falta de un protocolo estandarizado genera actualmente pérdidas metalúrgicas significativas de mineral precioso hacia las colas, afectando directamente los ingresos de la empresa y su impacto social.

En consecuencia, existe la necesidad de evaluar y optimizar la dosificación de reactivos mediante flotación directa. El uso de herramientas estadísticas y diseño de

experimentos es fundamental en la metalurgia moderna para maximizar la selectividad y recuperación. Abordar esta problemática no solo permitirá mejorar el rendimiento global de la planta bajo condiciones controladas de laboratorio, sino que posicionará al yacimiento Alpayana como un modelo de eficiencia en la recuperación de plata dentro de la minería peruana.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo influye la evaluación de reactivos de flotación mediante diseño experimental en la recuperación de plata del yacimiento de Alpayana?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influye la variación en la dosificación del colector 6100 en la recuperación de plata según la mineralogía del yacimiento?
- ¿Cuál es el efecto de las variables operativas sobre la eficiencia de flotación?
- ¿Cómo optimizar la dosificación de reactivos para incrementar la recuperación y ley del concentrado?

1.3. Justificación

1.3.1. Conveniencia

Es conveniente realizar esta investigación ya que, al evaluar y ajustar los reactivos de flotación, se busca maximizar la concentración de plata en los concentrados obtenidos, lo cual es crucial para incrementar el valor del producto final y de este modo se resuelva el problema planteado.

1.3.2. Relevancia Tecnológica

El presente trabajo de investigación busca mejorar el proceso de flotación, incrementar la rentabilidad, reducir costos, contribuir al desarrollo tecnológico y promover la transferencia de conocimientos y buenas prácticas en la industria minera. Estos beneficios hacen que esta evaluación sea valiosa para la operación y las comunidades mineras en general, por consiguiente, el modelamiento por diseño experimental nos dará a conocer variables importantes a controlar para su posterior optimización.

1.3.3. Relevancia social

La evaluación de los reactivos de flotación por diseño experimental evidencia el compromiso de la empresa minera con la constante mejora y la adopción de prácticas más sostenibles y responsables, se hará un control estricto de los relaves respetando el máximo permisible de contaminación de acuerdo con normas legales, beneficiando a la comunidad, trabajadores, la empresa creando bienestar social y calidad de vida.

1.3.4. Valor Teórico

El valor teórico de este estudio radica en su aporte al conocimiento científico, al aplicar principios de diseño experimental y mejorar la eficiencia y rentabilidad en la industria minera. Además, se destaca su capacidad de transferir los resultados y conocimientos obtenidos a otros yacimientos similares. Por último, este estudio impulsa la innovación y el desarrollo tecnológico en la industria minera, fomentando prácticas más eficientes y sostenibles.

1.3.5. Utilidad Metodológica

La utilidad metodológica de abordar la evaluación de los reactivos de flotación por diseño experimental para optimizar concentrados de plata de minerales del yacimiento de Alpayana, se basa en su enfoque riguroso de diseño, el análisis estadístico

aplicado, la optimización de parámetros, la capacidad de reproducir y generalizar los resultados, y su contribución a la toma de decisiones fundamentales en la industria minera.

1.4.Objetivo de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de reactivos de flotación mediante diseño experimental para incrementar la recuperación de plata en el yacimiento Alpayana.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la influencia en la variación de la dosificación del colector 6100 para las características mineralógicas del yacimiento.
- Determinar el efecto de las variables: pH, tiempo, para mejorar la eficiencia del proceso de flotación.
- Optimizar la dosificación de los reactivos MT6100, Sulfato de Zn plus, MT342 para incrementar la recuperación y ley del concentrado de plata.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes internacionales

Kemp A. (2018), en su estudio titulado "*Análisis crítico de las eficiencias de pulpa y espuma en experimentos de flotación a escala de laboratorio*", llevado a cabo en la Universidad de Chile, buscó estimar las eficiencias de pulpa y espuma, así como su relación con el retroceso de partículas a lo largo del tiempo en un entorno controlado. Para ello, se realizaron experimentos bajo condiciones específicas de flotación, como el flujo de gas, la composición del mineral y el tamaño de las partículas. La eficiencia de la espuma se modeló en función del volumen de espuma retirada, utilizando dos micas: una para determinar el inicio de la remoción y otra para llevarla a cabo. Se introdujo material valioso en la celda para reducir el arrastre y mejorar la flotación selectiva, mientras que el material de ganga facilitó la recuperación mediante mecanismos no selectivos. Las recuperaciones de mineral valioso con la eliminación de diferentes porcentajes de espuma (10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 100 %) fueron de 12 %, 15 %, 21 %, 29 % y 67 %, respectivamente. Al aumentar diez veces el tiempo de flotación, la recuperación mejoró un 2,5 % y 4,9 % al retirar el 20 % y 40 % de espuma, respectivamente. Esta mejora se asoció a la flotación real, vinculada con la caída de partículas. Los modelos indicaron que la recuperación de espuma disminuye con el tiempo, mientras que la recuperación de pulpa aumenta rápidamente al inicio y luego se estabiliza. La profundidad de la espuma se midió en ambas zonas (eliminada y no eliminada), observándose un comportamiento sinusoidal en la zona de remoción, con un periodo de 14 segundos, y una disminución lineal en la zona no eliminada, siguiendo una relación de Poisson de $-0,48 \pm 0,13$.

Los estudios concluyen que la recuperación de espuma tiende a cero en tiempos prolongados de flotación, mientras que el retroceso aumenta al reducir la fracción de espuma retirada.

Por otro lado, **Valencia, F. y Vergara, A. (2019)** en su tesis titulada *"Concentración de oro mediante flotación en columna"*, realizada en la Universidad del Azuay, Ecuador, investigaron la concentración metalúrgica por flotación de espuma de un mineral polimetálico, con un enfoque particular en la recuperación del oro (Au). El objetivo principal de la investigación fue comparar la eficiencia de la flotación en una columna a escala de laboratorio con una celda de flotación tipo Denver, en cuanto a la recuperación del oro en un mineral de composición compleja. El diseño experimental consistió en la construcción y ajuste de una columna de flotación de laboratorio, que se sometió a diversas pruebas en condiciones controladas, comparándola con una celda tipo Denver, que es un equipo estándar utilizado en la industria minera. La población utilizada para el estudio fue muestras de minerales polimetálicos que contenían oro, y las variables controladas durante las pruebas incluyeron el tipo de colectores y espumantes empleados, el tipo de material procesado, la densidad de pulpa, y el pH de la solución. Los instrumentos principales fueron la columna de flotación de laboratorio y la celda Denver, utilizados para realizar las pruebas de flotación bajo las mismas condiciones de operación. Los resultados obtenidos revelaron que la columna de flotación superó a la celda Denver en términos de recuperación, alcanzando una recuperación de oro de 70,33 %, lo cual fue significativamente más alto que los valores obtenidos con la celda tipo Denver. Esto demuestra que la columna de flotación puede ser más eficiente en la recuperación de oro en minerales polimetálicos. En conclusión, la investigación de Valencia y Vergara subraya la superioridad de la columna de flotación sobre la celda tipo Denver en la concentración de oro, abriendo la puerta a la optimización de los procesos metalúrgicos en la minería, especialmente en la recuperación de metales preciosos. Esta investigación contribuye al campo de la metalurgia extractiva al proponer una alternativa más eficiente y rentable para los procesos de flotación en la minería del oro.

Ávila Huaranga, L. (2019), en su trabajo titulado *“Evaluación de flotación a nivel de planta con colectores secundarios para mejorar la recuperación de plata en la Unidad Minera Recuperada – Huachocolpa – Huancavelica – 2019”*, tuvo como objetivo evaluar el desempeño de diferentes reactivos colectores para mejorar la concentración de plata en el proceso de flotación en una planta minera. La investigación se centró en mejorar la recuperación de plata, la cual es crucial para optimizar el valor del concentrado de plomo, dado que ambos metales están mineralógicamente involucrados en el mismo proceso. En este contexto, se realizaron balances metalúrgicos con el fin de priorizar la recuperación tanto de la plata como del plomo, debido a que estos dos metales se comercializan conjuntamente, lo que implica que el comportamiento de ambos debía ser considerado en el análisis. La metodología empleada incluyó el análisis y la interpretación de datos obtenidos de gráficas y tablas estadísticas, lo que permitió prever los efectos de los diferentes colectores sobre el proceso. En particular, se evaluaron tres colectores: AEROFLOAT 242, AEROPHINE 3418 y una combinación de ambos, con el fin de determinar su influencia en la recuperación de los metales. Los resultados obtenidos permitieron verificar si existía una diferencia significativa en la recuperación de plata y plomo al variar las dosificaciones de los colectores, evaluando tanto su uso individual como en combinación. La conclusión del estudio fue que el mejor desempeño en términos de recuperación se obtuvo utilizando el colector AR-1404, ditiofosfato, con un tamaño de partícula de malla 100, alcanzando una recuperación de plata del 81,73 %, a partir de una ley inicial de 18,4 g/t después de la molienda. Este resultado indica que el uso adecuado de colectores secundarios y la optimización de las condiciones de flotación pueden mejorar significativamente la eficiencia en la recuperación de metales preciosos en la minería.

2.2. Antecedentes nacionales

Eulate (2012), en su estudio titulado “Mejoramiento de la recuperación de plata de los minerales de mina Poopó”, analizó las dificultades metalúrgicas asociadas a la alta complejidad del mineral proveniente de dicha mina, caracterizada por un elevado contenido de zinc y plata, y una baja proporción de plomo. Esta complejidad se evidenció en la distribución de la recuperación de plata: un 25,59% con una ley de 5 884 g/t en el concentrado de plomo, y un 46,80% con 462 g/t en el concentrado de zinc. Sin embargo, el valor económico de la plata recuperada en el concentrado de zinc resultó poco favorable, en comparación con la rentabilidad del concentrado plomo-plata, debido a la baja ley de plata y menor valorización en este tipo de concentrado. El análisis químico del mineral mostró que los contenidos de zinc y plata eran superiores a los de plomo, lo que implicaba que, para una recuperación eficiente de la plata, era necesario priorizar la flotación de minerales que favorezcan la asociación plomo-plata. Para ello, se realizaron ensayos tanto a nivel de laboratorio como en planta, empleando el colector AEROPHINE 3418. Tras seis campañas de prueba, se obtuvieron resultados positivos, logrando una recuperación de plata de hasta 42,32%, lo cual evidenció el potencial de mejora en la eficiencia del proceso mediante la selección adecuada de reactivos y condiciones operativas.

Zuñiga (2018), en su tesis presentada “Obtención de un concentrado final de plata a partir de un mineral polimetálico Pb-Ag-Zn-Au contaminado con cemento mediante métodos de cinética de flotación y diseño experimental” UNI – Lima, el objetivo: obtener un concentrado final de plata del tipo de mineral: polimetálico con plomo, plata, zinc y oro, con contaminación por cemento. La metodología empleada: cinética de flotación y diseño experimental. En la Universidad Nacional de Ingeniería, desarrolló una investigación orientada a obtener un concentrado final de plata a partir de un mineral polimetálico compuesto por plomo, plata, zinc y oro, el cual presentaba contaminación

con cemento. Su estudio empleó métodos de cinética de flotación y diseño experimental, bajo un enfoque exploratorio y con técnicas experimentales controladas. Los resultados demostraron que a un pH entre 9 y 10 se lograron recuperaciones significativas: 89 % para la plata, 82,05 % para el oro, 91,90 % para el plomo, 56,24 % para el zinc y 48,28 % para el hierro. Sin embargo, cuando se operó a pH más elevados, se observó una disminución en las leyes y recuperaciones metalúrgicas. Además, se identificaron efectos antagónicos en el uso de reactivos depresores de pirita, los cuales afectaron negativamente el desempeño del proceso. La investigación concluyó que la flotación colectiva de plomo, oro y plata no es eficiente a valores de pH superiores a 10,5, recomendándose operar en un rango de pH entre 8 y 10,5. Asimismo, se sugirió evitar el uso de cianuro de zinc como depresor, debido a sus efectos adversos sobre la selectividad del proceso.

Finalmente, **Huaraca, R. y Pérez, J. (2019)**, en su tesis titulada *“Optimización del proceso de flotación de galena en la Planta Concentradora Santander mediante la metodología de superficie de respuesta y el método Taguchi”* de la Universidad Nacional del Centro del Perú, aplicaron las metodologías de superficie de respuesta (RSM) y el método Taguchi para optimizar el proceso de flotación de galena en la mencionada planta concentradora. El objetivo principal de su estudio fue mejorar la eficiencia del proceso de flotación mediante la aplicación de herramientas estadísticas avanzadas, como la metodología de superficie de respuesta (RSM) y el método Taguchi, con el fin de optimizar varios factores clave sin comprometer la calidad del análisis. La combinación de estos enfoques permitió reducir de manera significativa el número de experimentos necesarios, pasando de 240 ensayos a solo 42, lo que representó una gran eficiencia en términos de recursos y tiempo. En los ensayos realizados, se evaluaron diversos factores, entre ellos el tipo y la dosificación de colectores, el uso de almidón, el cianuro de sodio, el pH y el agente neutralizante. Antes de la implementación de la optimización, la

recuperación de plomo era de 79 % y la de zinc de 23,2 %. Sin embargo, después de la aplicación del modelo optimizado, la recuperación de plomo aumentó a 87 %, manteniendo la ley del concentrado, mientras que la recuperación de zinc disminuyó a 17,3 %. Este cambio resultó en una mejora significativa en la selectividad del proceso, lo que contribuyó a una mayor eficiencia global en la operación. Los resultados de este estudio demuestran cómo la aplicación de herramientas estadísticas avanzadas puede optimizar los procesos metalúrgicos y mejorar la productividad en las plantas concentradoras, contribuyendo a una mayor rentabilidad y sostenibilidad en la industria minera.

2.3.Bases teóricas

2.3.1. La Plata

A lo largo de la historia, la plata ha sido apreciada por su versatilidad y sus propiedades excepcionales. Este metal, uno de los siete conocidos desde la antigüedad y mencionado incluso en el libro del Génesis, ha sido utilizado por el ser humano durante milenios, especialmente debido a su maleabilidad, lo que facilitó su trabajo en estado libre. Hallazgos arqueológicos, como montones de escoria encontrados en Asia Menor y en las islas del mar Egeo, evidencian que la plata comenzó a separarse del plomo mediante métodos rudimentarios de fundición más de 4 000 años a.C. Etimológicamente, el término "plata" proviene del latín medieval *plattus*, que significa "ancho" o "aplanado", haciendo referencia a las láminas metálicas en las que se trabajaba este metal. Durante el Imperio Romano, la plata era conocida como *argentum*, de donde se deriva su símbolo químico, Ag (Hernández & Silva, s.f., p. 30)

2.3.2. Minerales de Plata

La plata se presenta con frecuencia en asociación con otros metales valiosos, como el oro, y también suele encontrarse en yacimientos de cobre y plomo. Entre los minerales más importantes de plata se incluyen la argentita (Ag_2S), polibasita, proustita (Ag_3AsS_3), pirargirita (Ag_3SbS_3), estefanita y tetraedrita. La reactividad de la plata influye significativamente en los procesos metalúrgicos, alterando incluso el comportamiento del oro en etapas como la flotación, la lixiviación y la recuperación final del metal. (UNMSM, 2015, p. 45).

En la naturaleza, la plata es un elemento escaso, con una abundancia estimada de 0.1 ppm en la corteza terrestre. Aunque puede hallarse en estado nativo, predomina su ocurrencia en combinación con azufre y otros metaloides. Es notable que aproximadamente el 75 % de la producción global de plata no proviene de minas de plata primaria, sino que se recupera como subproducto del procesamiento de sulfuros de plomo y cobre (Marsden y House, 2006). Desde el punto de vista químico, la plata se define como el metal noble más activo. Posee una notable resistencia a la oxidación atmosférica simple, pero reacciona rápidamente con compuestos sulfurosos, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), formando una pátina de sulfuro de plata. Respecto a su solubilidad, es resistente a ácidos diluidos no oxidantes (clorhídrico o sulfúrico), pero se disuelve con facilidad en ácidos oxidantes como el ácido nítrico (HNO_3) y el ácido sulfúrico concentrado en caliente. Como señala Habashi (2019), su comportamiento electroquímico permite la formación de óxidos o peróxidos bajo condiciones específicas de potencial y pH, factor determinante en los procesos de lixiviación y recuperación final. En cuanto a sus propiedades físicas, destaca por ser un metal moderadamente blando (Dureza de 2.5 a 3 en la escala de Mohs), con una densidad de 10.5 g/cm^3 . Posee una reflectividad excepcional, devolviendo hasta el 95 % de la luz incidente cuando su superficie está pulida. En el mercado de metales, su pureza se estandariza en milésimas,

siendo la plata comercial de alta calidad de ley 0.999,99.9 % de pureza en proporción 1 de 1000, cumpliendo con los requisitos internacionales para la refinación y comercialización de metales preciosos.

2.3.3. Flotación de minerales

La flotación es un proceso de concentración de minerales que se fundamenta en principios fisicoquímicos, y se ha convertido en una de las técnicas más eficaces para la separación selectiva de minerales valiosos respecto de la ganga. Este procedimiento opera dentro de un sistema trifásico compuesto por agua (fase líquida), aire (fase gaseosa) y partículas minerales (fase sólida). Su efectividad radica en la capacidad de ciertos reactivos químicos para modificar las propiedades superficiales de los minerales, haciéndolos hidrofóbicos o hidrofílicos, según se requiera para su separación (Gaudin, 1957).

Durante el proceso, se introducen burbujas de aire en la pulpa mineral, y aquellas partículas cuya superficie ha sido acondicionada para volverse hidrofóbica tienden a adherirse a las burbujas y subir a la superficie, donde forman una espuma que es recolectada como concentrado. En contraste, los minerales no deseados permanecen en la fase líquida y se eliminan como relaves (Wills & Finch, 2016). A nivel industrial, la flotación se ha consolidado como un método esencial para el tratamiento de minerales de baja ley, especialmente sulfuros metálicos como cobre, plomo y zinc. Su desarrollo ha permitido la explotación rentable de yacimientos que anteriormente eran considerados no viables mediante métodos gravimétricos convencionales, debido a la complejidad mineralógica o a la baja concentración de elementos valiosos (Salager & Forgiarini, 2007). El éxito de la flotación depende gran medida de la correcta aplicación de los reactivos químicos. Los tipos principales de reactivos utilizados son:

Colectores: Alteran la superficie de los minerales valiosos, haciéndolos hidrofóbicos y facilitando su adherencia a las burbujas (por ejemplo, xantatos, ditiocarbamatos, tiósfatos).

Espumantes: Ayudan a estabilizar las burbujas de aire, favoreciendo la formación de una espuma estable (por ejemplo, metil isobutil carbinol - MIBC, pinoil, alcoholes).

Depresores: Impiden que ciertos minerales indeseados floten, permitiendo su separación selectiva (ej. cianuro de sodio, sulfato de zinc).

Activadores: Modifican la superficie de los minerales para hacerlos más susceptibles a la acción de los colectores (ej. sales de cobre para activar esfalerita).

Modificadores de pH: ajustan la acidez o alcalinidad del medio para favorecer la flotación de minerales específicos (ej. cal, ácido sulfúrico).

Estos reactivos actúan de forma sinérgica, y su selección y dosificación adecuada son claves para lograr una recuperación eficiente y selectiva de los minerales valiosos (Fuerstenau, 2007).

Según Salager y Forgiarini (2007), el desarrollo de la flotación ha permitido el aprovechamiento de grandes volúmenes de minerales pobres y complejos, lo que ha revolucionado la minería moderna. Si bien inicialmente se aplicó a sulfuros de cobre, plomo y zinc, su uso se ha expandido a otros metales como níquel, molibdeno, manganeso, cromo, cobalto y tungsteno. Además, ha demostrado utilidad en la recuperación de minerales no metálicos e industriales como fosfatos, feldespatos, mica, barita, berilio, fluorita y potasio. Incluso ha hecho posible la recuperación de carbón fino, anteriormente descartado como residuo.

2.3.4. Factores que intervienen en la flotación.

El proceso de flotación está influenciado por una serie de factores interrelacionados que determinan la eficiencia de la separación mineralógica. Entre los principales factores que condicionan el éxito del proceso se encuentran las características de la pulpa, la granulometría, la densidad, el pH, el suministro de aire y el uso adecuado de reactivos químicos (Wills & Finch, 2016; Fuerstenau, 2007).

a) Tamaño de Partícula

La pulpa, constituida por mineral finamente molido y agua, representa el medio en el que se desarrolla la flotación. El tamaño de partícula de los minerales es un aspecto crítico, ya que influye directamente en la recuperación y en la calidad del concentrado. Una molienda inadecuada puede generar partículas demasiado gruesas, las cuales tienden a sedimentarse en el fondo de las celdas, dificultando la formación de espuma y el arrastre del mineral valioso (Gaudin, 1957). Por otro lado, una molienda excesiva produce partículas ultrafinas, que tienden a perderse en los relaves debido a su baja capacidad de adherencia a las burbujas (Wills & Finch, 2016). Lo ideal es lograr una granulometría óptima que garantice la exposición del mineral útil sin sobre pulverizar la ganga, con tamaño de pulpa de partícula de 60% de malla -200.

b) Densidad de Pulpa

La densidad de la pulpa (g/l) tiene un impacto directo en la viscosidad del sistema y en la movilidad de las partículas y burbujas. Una densidad alta, que suele estar asociada con una molienda gruesa, puede dificultar el ascenso de las burbujas y disminuir la selectividad del proceso. Por otro lado, una densidad demasiado baja reduce la capacidad de carga de las celdas de flotación, lo que afecta negativamente la productividad (Fuerstenau & Han, 2003). Es esencial ajustar la relación entre sólidos y líquidos según

el tipo de mineral, la fase del proceso (primaria, limpieza o recirculación) y los parámetros de diseño del circuito.

c) pH de la Pulpa

El pH es un factor crucial en el proceso de flotación, ya que influye tanto en la superficie de los minerales como en la acción de los reactivos. Los valores ácidos o alcalinos alteran la carga superficial de las partículas, lo que modifica su comportamiento hidrofóbico o hidrofílico. Usualmente, el pH se ajusta mediante la adición de cal (CaO), soda cáustica (NaOH) o ácido sulfúrico (H_2SO_4), dependiendo del mineral a procesar. Por ejemplo, para la flotación de sulfuros como la galena (PbS), se utilizan condiciones ligeramente alcalinas (pH 8-9), mientras que para minerales como la esfalerita (ZnS), es necesario un pH más alto y el uso de depresores selectivos (Castro, 2012).

d) Aireación y Formación de Espuma

La inyección de aire es esencial para la generación de burbujas en las celdas de flotación. Estas burbujas actúan como vehículo de transporte para los minerales hidrofóbicos, llevándolos a la superficie donde forman una capa de espuma. La regulación del caudal de aire es fundamental: un exceso de aire puede desestabilizar la espuma y arrastrar ganga no deseada, mientras que un suministro insuficiente compromete la recuperación del mineral valioso (Wills & Finch, 2016). La eficiencia del proceso depende de la adecuada dispersión de burbujas finas y uniformes, las cuales presentan una mayor área de contacto con las partículas minerales.

e) Reactivos de Flotación

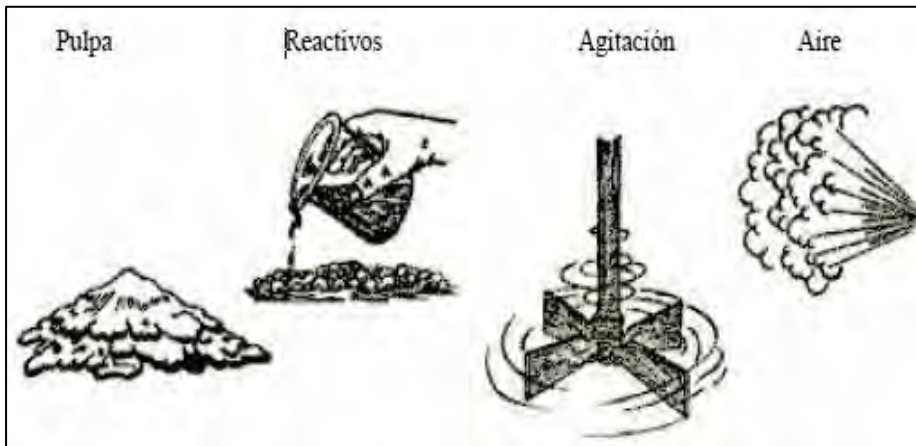
El uso de reactivos es uno de los pilares del proceso de flotación, ya que permiten controlar la interacción entre los minerales y las burbujas. Existen diversos tipos de reactivos con funciones específicas: Colectores, como los xantatos y tiófosfatos, que

aumentan la hidrofobicidad de los minerales valiosos, facilitando su adherencia a las burbujas (Fuerstenau, 2007). Espumantes, como el MIBC (metil isobutil carbinol), que estabilizan la espuma y mejoran la cinética de flotación. Depresores, como el cianuro de sodio y el sulfato de zinc, que evitan la flotación de minerales no deseados. Activadores, como el sulfato de cobre, que modifican minerales inactivos para hacerlos flotables. Modificadores de pH, como la cal y el ácido sulfúrico, que ajustan el ambiente químico del sistema.

La correcta selección y dosificación de estos reactivos permite mejorar la selectividad del proceso, reduciendo pérdidas en relaves y mejorando la ley de los concentrados obtenidos.

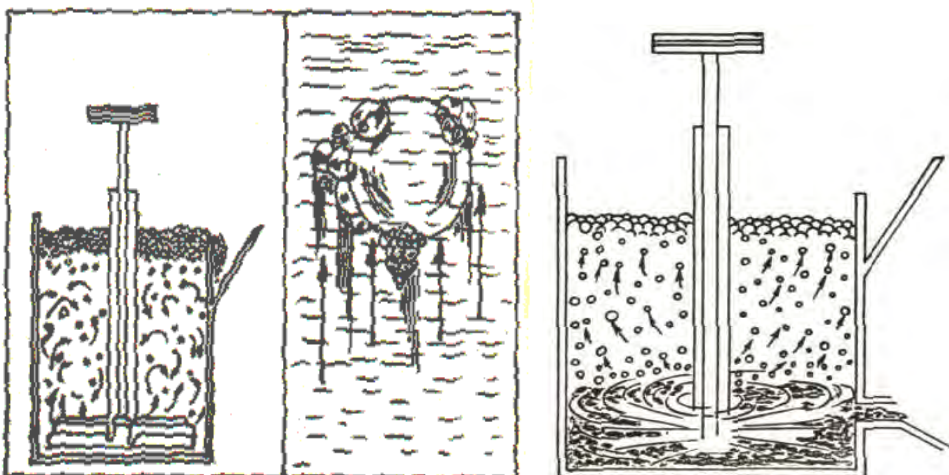
La elección de reactivos adecuados para la flotación de plata es un componente crítico para el éxito del proceso. Hidalgo (2015) destaca que los colectores como los xantatos, tiósfatos, y el espumante MT-342 son esenciales para mejorar la hidrofobicidad de los minerales de plata, permitiendo su separación efectiva de la ganga. El colector MT-6100, por ejemplo, ha demostrado ser altamente eficiente para sulfuros de plata, y su dosificación precisa es fundamental para maximizar la recuperación.

Fuerstenau (2007) señala que el uso de depresores como el cianuro de sodio y el sulfato de zinc es esencial para evitar la flotación de minerales no deseados, mientras que los activadores permiten modificar la superficie de los minerales para mejorar su flotación. La correcta combinación de estos reactivos, junto con los modificadores de pH, garantiza una flotación selectiva que maximiza la recuperación de plata, reduciendo al mismo tiempo las pérdidas en los relaves.

Figura 1*Principales factores de la Flotación*

Nota: En el proceso de flotación intervienen cuatro factores principales. tomado de Manual de Flotación de minerales por (Bravo, 2004, pág. 6)

La pulpa y el aire son fundamentales en el proceso de flotación. Para asegurar una recuperación efectiva de los sulfuros valiosos, la pulpa debe tener el tamaño de partícula, la densidad y el pH adecuados. Mientras tanto, el aire es esencial para crear las burbujas que forman espumas y elevan los minerales a la superficie. Un control preciso de estos factores es crucial para lograr una flotación exitosa.

Figura 2*Factor importante del aire en una celda de flotación*

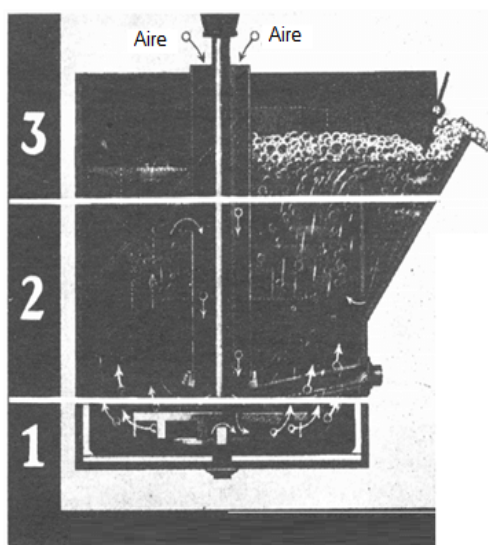
Nota: Factores que intervienes en una celda de flotación tomado de Manual de Flotación de minerales por (Bravo, 2004, pág. 7)

2.3.5. Elementos tecnológicos del proceso

En un proceso de flotación convencional, el mineral sigue una serie de etapas para su tratamiento. Primero, el mineral crudo extraído de la mina se procesa en una planta de trituración, donde se reduce en seco en varias fases hasta obtener fragmentos de aproximadamente 10 mm. Estos fragmentos se envían luego a una planta de molienda, donde se realiza la reducción del tamaño en dos circuitos de molienda húmeda, con el objetivo de alcanzar partículas de 50 a 100 micrones, según la distribución del mineral. Es esencial que el mineral sea molido hasta el punto de liberación, es decir, que cada partícula individual corresponda a una única especie mineralógica.

Figura 3

Corte transversal de una celda de flotación



Nota: En el proceso de flotación intervienen cuatro factores principales. tomado de Flotación de minerales por (Sutulov, 1963, pág. 15)

El mineral tratado de esta manera se somete a diversos reactivos, cada uno con una función específica. Algunos reactivos preparan las superficies de los minerales para que puedan adsorber otros reactivos (modificadores), mientras que otros aumentan las propiedades hidrofóbicas de los minerales (colectores). Además, algunos reactivos

ayudan a formar una espuma uniforme y estable (espumantes). Las pulpas con estos reactivos se introducen luego en las máquinas de flotación, donde el producto valioso se separa generalmente como concentrado, mientras que la fracción estéril se descarga como relave.

Según Sutulov (1963), tras la etapa de flotación, los productos concentrados pasan por procesos de desagüe, como el espesamiento, la filtración y, si es necesario, el secado. Además, para el tratamiento metalúrgico posterior, puede ser necesario realizar la aglomeración o nodulación de las partículas finas. Los relaves, por otro lado, se envían a un depósito donde se desaguan normalmente mediante el proceso de decantación.

2.3.6. Principios de Flotación

La flotación es un método utilizado para concentrar minerales, con el objetivo de separar las partículas finamente molidas de minerales útiles de las gangas o materiales estériles. Este proceso implica el tratamiento químico de una pulpa mineral para crear condiciones que favorezcan la adhesión de ciertas partículas minerales a las burbujas de aire. El objetivo principal es separar las especies minerales finamente divididas de una suspensión acuosa, aprovechando su afinidad (hidrofílica) o repulsión (hidrofóbica) hacia el agua.

Ballester (2014) señala que, en la flotación por espumas, la concentración de minerales puede adoptar diferentes formas. En la flotación colectiva (bulk), se separan varios componentes en dos grupos, mientras que en la flotación selectiva o diferencial se separan compuestos complejos que contienen una sola especie mineral. La flotación ha permitido la explotación de yacimientos con características complejas y bajos contenidos minerales, que antes se consideraban marginales.

El proceso de flotación se basa en las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas de los minerales. Las partículas hidrofílicas tienen afinidad por el agua y permanecen en suspensión en la pulpa, mientras que las partículas hidrofóbicas tienden a repeler el agua.

Para optimizar el proceso de flotación, se realizan pruebas en laboratorio utilizando celdas de flotación que pueden manejar entre 500 y 2000 gramos de mineral. La muestra se obtiene a partir del mineral de alimentación, que se somete a una o más etapas de reducción de tamaño hasta que todo el material pasa a través de la malla N° 10 Tyler (1700 μm). Una vez preparadas las muestras, se realizan pruebas de molienda para determinar el tiempo necesario para alcanzar la reducción de tamaño requerida según el plan experimental de flotación.

2.3.7. Tipos de Celdas de Flotación

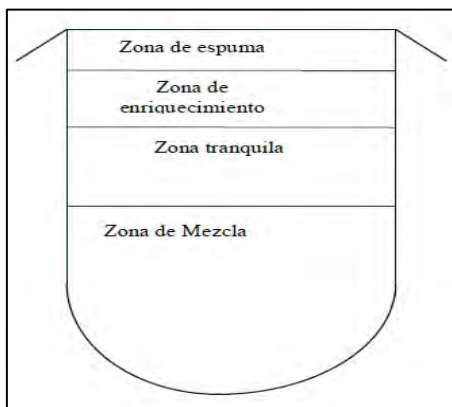
Máquina Door-Oliver: Las máquinas de flotación de la marca Door-Oliver han considerado el comportamiento hidrodinámico de celdas prototipo, las cuales han sido sometidas a pruebas experimentales con pulpas industriales de diversos minerales. Estas celdas tienen características específicas, como una zona turbulenta de mezcla en la parte inferior, la ausencia de embanques de arena, una zona tranquila, una zona de enriquecimiento y una zona estable de espuma. El mecanismo de estas celdas se divide en dos componentes: el rotor y el estator. El rotor cumple con los siguientes propósitos: Actuar como una bomba para mantener en suspensión las partículas de mineral, especialmente en las partes inferiores de la celda. y dispersar eficientemente el aire en toda la pulpa. Este mecanismo, que funciona como una bomba de alta eficiencia, permite manejar grandes caudales con un consumo energético relativamente bajo.

Gracias a su alta eficiencia, el rotor consigue suspender tanto partículas finas como gruesas. Al situar la zona de succión en la parte inferior de la celda, el rotor puede

recoger y dispersar las partículas que se han asentado. El flujo positivo de la pulpa y la profundidad del rotor distribuyen las partículas finas de aire por toda la celda, especialmente en las zonas más bajas, lo que aumenta el contacto con las partículas minerales y mejora las posibilidades de flotación. El estator, por su parte, tiene el propósito de redirigir el flujo de pulpa descargado tangencialmente por la rotación del rotor, convirtiéndolo en corrientes de pulpa dirigidas radialmente. Esto mejora la recirculación de la pulpa y evita la formación de remolinos dentro de la celda, los cuales pueden dificultar la formación de una capa estable de espuma en la superficie de la pulpa. El estator guía la pulpa hacia los lados, reduciendo la turbulencia en la parte baja de la celda y manteniendo la parte superior sin perturbaciones. Esto ayuda a mantener las partículas en suspensión y favorece la dispersión del aire. El diseño del tanque facilita que las partículas sólidas más gruesas fluyan hacia el rotor para su suspensión, dirigiendo la pulpa desde el fondo del tanque hacia el rotor y expulsándola radialmente por la parte superior.

Figura 4

Zonas de una celda Door Oliver



Nota: Tomado de South Service Engineers.

Figura 5*Mecanismo de una celda**Nota:* Recuperado de

https://www.youtube.com/watch?v=_SpIIDEJrE8&ab_channel=AntonioC%C3%A9sarBravoG%C3%A1lvez

El tiempo de residencia es esencial para optimizar los resultados metalúrgicos, y el diseño actual ha abordado eficazmente el problema de las corrientes cortocircuitadas. Como resultado, los tiempos de residencia en la planta se alinean de manera más precisa con los tiempos de diseño previstos.

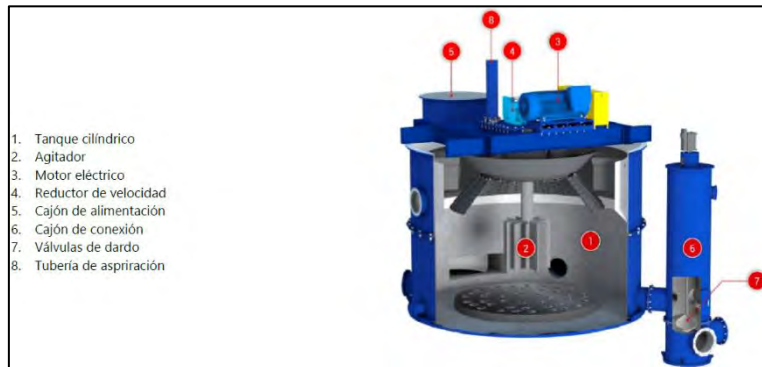
Máquina de Flotación Wemco: Es ampliamente empleada en el procesamiento de minerales debido a su diseño distintivo y eficiente. Desarrollada por la empresa Wemco, esta celda de flotación es conocida por su capacidad para manejar grandes volúmenes de pulpa y su eficacia en la separación de minerales valiosos de la ganga.

La celda de flotación Wemco, está equipada con un rotor y un estator que generan el movimiento de la pulpa y la dispersión del aire. El rotor se encarga de bombear la pulpa y mantener las partículas de mineral suspendidas, al mismo tiempo que dispersa el aire uniformemente en toda la celda. Este diseño asegura una adecuada suspensión de las partículas y mejora la flotación. El estator, por su parte, desvía el flujo de pulpa descargada por el rotor en corrientes radiales, favoreciendo la recirculación de la pulpa y

evitando la formación de remolinos dentro de la celda. Este diseño contribuye a mantener una capa de espuma estable en la superficie de la pulpa y mejora la dispersión del aire durante el proceso de flotación.

Figura 6

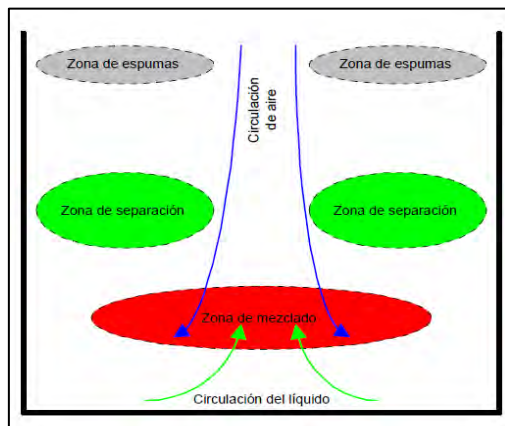
Partes de una celda de Flotacion Wemco



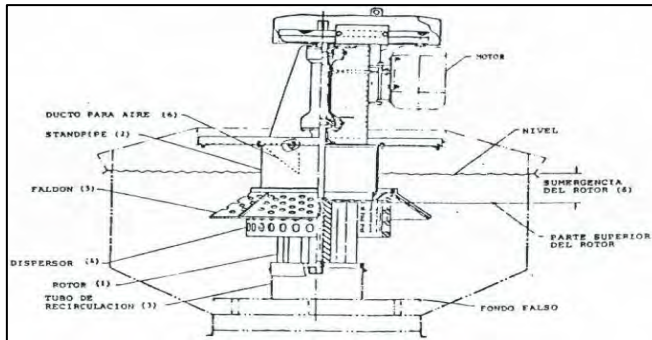
Nota: video.FLSmidth.com

Figura 7

Características hidrodinámicas de una celda de flotación Wemco.



Nota: Recuperado de South Service Enginiers.

Figura 8*Celda Wemco con autoareación*

Nota: Recuperado de South Service Engineers.

Celdas de Flotación Jameson: En los últimos años, el uso y la aplicación de celdas columna para la concentración y recuperación de minerales mediante flotación han aumentado considerablemente. Este crecimiento se atribuye al interés en métodos alternativos más económicos y eficientes. Como resultado, se ha visto un notable incremento en el número de unidades instaladas en la industria minero-metalúrgica a nivel mundial. A pesar del éxito de la tecnología de las celdas columna desde su introducción a principios de la década de 1960, ha competido con otras tecnologías, como las celdas flash, la flotación centrífuga y, más recientemente, la celda Jameson, desarrollada en 1988 en la Universidad de Newcastle, Queensland, Australia, por Jameson.

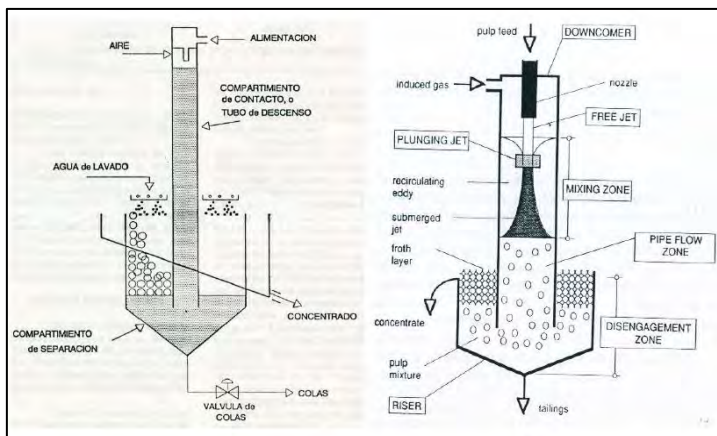
La celda Jameson ofrece varias ventajas, entre ellas:

- La capacidad de generar altas concentraciones de gas en el tubo de descenso, manteniendo un flujo constante.
- La ausencia de un sistema generador de burbujas.
- El uso de agua de lavado para la espuma.
- No requiere un compresor para la inyección de aire.
- Su operación es simple.

- La altura de la celda permite su instalación sin grandes modificaciones en plantas existentes.
- Estas características han favorecido el éxito y la adopción de la celda Jameson como una opción atractiva en la industria de flotación de minerales.

Figura 9

Esquema de una celda Jameson y sus varias zonas activas.



Nota: Recuperado de South Service Engineers.

Equipos de Flotación de Minerales

En la flotación de minerales, el equipo utilizado es crucial para garantizar la eficiencia del proceso de separación. Estos equipos permiten el contacto efectivo entre las burbujas de aire y las partículas minerales hidrofóbicas. Existen dos grandes tipos de dispositivos: celdas mecánicas y columnas de flotación, cada una con características y aplicaciones específicas.

a) Columnas de Flotación

Las columnas de flotación, como las que se observan en la imagen, representan una evolución tecnológica respecto a las celdas mecánicas tradicionales. Estas operan de manera continua y se caracterizan por tener una geometría cilíndrica alta y estrecha, lo

que permite un mejor control del tiempo de residencia y una mayor eficiencia de separación.

Principales componentes y funcionamiento:

Zona de contacto o mezcla (mixing/contact zone): Es donde se introduce la pulpa y el aire (o gas inducido) que genera la burbujeo. Aquí ocurre la adhesión de partículas minerales a las burbujas.

Zona de separación (pipe flow/disengagement zone): En esta parte inferior, las partículas no adheridas sedimentan y son evacuadas como colas (relaves).

Zona de espuma (froth layer): En la parte superior, las burbujas cargadas con mineral valioso ascienden y forman una espuma estable que se retira como concentrado.

Sistema de agua de lavado: Se incorpora desde la parte superior para eliminar partículas finas no deseadas arrastradas con la espuma, mejorando la ley del concentrado.

Las columnas tienen ventajas como menor consumo de energía, mejor recuperación en minerales finos y una mayor selectividad, especialmente en procesos de limpieza y recirculación de concentrados (Finch & Dobby, 1990).

b) Celda de Flotación Denver

La celda mecánica Denver es uno de los equipos más utilizados a nivel mundial en plantas concentradoras, especialmente en etapas de flotación rougher (primaria) y scavenger (limpieza de relaves). Su diseño consiste en un recipiente rectangular o cuadrado con un sistema de agitación mecánica y aireación forzada.

Características principales:

Rotor-estator: El sistema de agitación está compuesto por un rotor que gira a alta velocidad y un estator fijo que dispersa el aire inyectado, generando burbujas de tamaño adecuado para la flotación.

Caja de alimentación y descarga: Facilita la entrada de la pulpa y la extracción de concentrado y relave.

Sistema de regulación de nivel: Se emplea para controlar la altura de la espuma y mejorar la estabilidad operativa.

La celda Denver permite una buena mezcla entre partículas y burbujas, lo que mejora la cinética de flotación. Es muy versátil y se emplea tanto en plantas piloto como en operaciones industriales de gran escala.

c) Comparación y Aplicaciones

La elección entre ambos tipos de equipos depende del tipo de mineral, la etapa del proceso y los objetivos metalúrgicos. En muchas plantas, se emplea una combinación de celdas mecánicas y columnas de flotación para optimizar la recuperación y la ley del producto final

Tabla 1

Comparación entre celda Denver y Columna de Flotación

Característica	Celda Denver	Columna de Flotación
Tipo de agitación	Mecánica (rotor-estator)	Neumática (flujo ascendente de aire)
Tamaño de burbuja	Medio a grueso	Fino a ultrafino
Selectividad	Media	Alta (mejor calidad de concentrado)
Consumo de energía	Alto	Bajo

Aplicación principal	Flotación primaria y scavenger	Limpieza y recirculación de concentrados
Costo operativo	Moderado	Bajo a moderado

Nota. Fuente (2003). *Principles of Mineral Processing*. SME.

2.3.8. Variables Operacionales en el Proceso de Flotación de Plata

Las siguientes variables desempeñan un papel crucial en el proceso de flotación de plata y deben ser consideradas cuidadosamente:

Granulometría: La recuperación de plata está estrechamente relacionada con la liberación de las partículas valiosas de los compuestos complejos en los que suelen estar asociadas o encapsuladas. Por ello, es fundamental lograr una adecuada liberación de estas partículas.

Tipo de Reactivo: Hay diversos tipos de reactivos, como colectores, modificadores y espumantes. La eficiencia del proceso depende de la selección y dosificación óptimas de estos reactivos.

Densidad de la Pulpa: Un porcentaje adecuado de sólidos en la pulpa impacta significativamente la recuperación de plata durante la flotación y el tiempo de residencia del mineral en los circuitos, afectando la calidad del concentrado.

Aireación: La presencia de aire es crucial, ya que puede acelerar o retrasar la flotación, lo que influye en la recuperación y ley del concentrado de plata.

Regulación del pH: Cada fórmula de reactivos requiere un pH óptimo para obtener los mejores resultados. Además, el tipo de mineral en el circuito de flotación influye en el pH necesario para una flotación efectiva de la plata.

Tiempo de Residencia: Esta variable está vinculada a la cinética de flotación de los minerales, la cinética de los reactivos, el volumen de las celdas y el porcentaje de sólidos en el circuito.

Calidad del Agua: La calidad del agua usada en el proceso tiene un impacto significativo en la recuperación y el grado del concentrado de plata. La presencia de iones y sólidos en suspensión puede afectar la reacción entre los reactivos y los minerales.

Estos factores interactúan de manera interdependiente en un sistema complejo durante la flotación de plata, haciendo necesario un análisis detallado y la optimización de estas variables para lograr una flotación efectiva y eficiente.

2.3.9. Fases en el Proceso de Flotación

El proceso de flotación comprende una serie de etapas secuenciales que permiten la separación selectiva de minerales valiosos de la ganga, mediante la adhesión diferencial de partículas a burbujas de aire. Estas fases se desarrollan dentro de un medio acuoso con ayuda de reactivos específicos que modifican las propiedades superficiales de los minerales (Fuerstenau & Han, 2003; Wills & Finch, 2016). A continuación, se describen las principales fases del proceso:

a) Acondicionamiento

Esta fase inicial consiste en la preparación de la pulpa mineral mediante la adición de reactivos químicos como colectores, depresores, activadores, espumantes y reguladores de pH. El objetivo es modificar selectivamente la superficie de los minerales para inducir hidrofobicidad en los minerales valiosos, facilitando su adhesión a las burbujas, mientras que se mantiene hidrofílica la ganga para que se hunda y sea descartada (Gaudin, 1957).

“El acondicionamiento adecuado de la pulpa es esencial para lograr una flotación eficiente y selectiva, y depende del orden, tipo y tiempo de adición de los reactivos” (Wills & Finch, 2016, p. 312).

b) Formación de burbujas y contacto partícula-burbuja

Una vez acondicionada la pulpa, se introduce aire en las celdas de flotación. El aire se dispersa formando burbujas finas que contactan con las partículas hidrofóbicas del mineral valioso. La eficiencia de esta fase depende del tamaño de las burbujas, la energía de agitación y la viscosidad de la pulpa (Castro, 2012). El contacto exitoso permite que las partículas se adhieran a las burbujas gracias a fuerzas físicas como la tensión superficial y el trabajo de adhesión.

c) Ascenso y transporte de la partícula-burbuja

Tras el contacto, las burbujas cargadas con partículas valiosas ascienden a la superficie de la celda o columna. Durante este trayecto, pueden ocurrir colisiones, rupturas o desadherencias, por lo que se requiere una velocidad de burbujeo controlada y condiciones hidrodinámicas estables (Finch & Dobby, 1990). El tiempo de residencia de las partículas en la celda es clave para asegurar una recuperación efectiva.

d) Formación de espuma (froth layer)

En la superficie, las burbujas forman una capa de espuma o “froth”, que concentra los minerales flotados. Esta fase tiene un doble rol: primero, actúa como medio de separación adicional (espumas más estables mejoran la selectividad); segundo, permite la recolección física del concentrado (Fuerstenau, 2007). El tipo y la cantidad de espumante controlan la estabilidad y estructura de esta capa.

e) Recolección del concentrado

Finalmente, el concentrado mineral se extrae de la espuma mediante rebose o mediante rastras mecánicas, dependiendo del tipo de celda. Este producto es enviado a procesos posteriores como remolienda, limpieza o filtración. El residuo que no flota se descarga por el fondo de la celda como relave.

2.3.10. Cinética de flotación

Esta etapa se centra en analizar la velocidad y los mecanismos de la flotación, investigando los procesos que ocurren en la interfaz entre las burbujas de aire y las partículas de mineral en suspensión. Se busca entender cómo los reactivos se adhieren a la superficie del mineral y cómo se forma la espuma que contiene los minerales valiosos. Factores que afectan esta cinética incluyen la concentración de reactivos, el tamaño de las partículas, la agitación, el tiempo de flotación y las propiedades superficiales de las partículas y burbujas. El objetivo principal es maximizar la velocidad y eficiencia del proceso para obtener la mayor recuperación de minerales valiosos.

La cinética se enfoca en estudiar cómo varía el contenido de partículas metálicas finas recuperadas en el concentrado con el tiempo, observando la adhesión de partículas hidrofóbicas a las burbujas de aire. También se analiza cómo cambia con el tiempo la cantidad de especies valiosas transportadas por la espuma hacia el rebose de una celda de flotación, lo que permite correlacionar el tiempo de flotación con la cantidad de producto obtenido.

La velocidad de flotación está influenciada por diversas variables mecánicas y químicas. Los criterios químicos y termodinámicos que determinan la hidrofobicidad de los minerales son fundamentales para el proceso. Este proceso se puede dividir en subprocesos como el transporte de la espuma y la pulpa, la adhesión de partículas a las burbujas y la separación del producto de flotación a través de los relaves.

Cuando una burbuja se mueve hacia la interfaz entre la espuma y la pulpa, la ganga queda por debajo de la espuma, mientras que los minerales hidrofílicos se precipitan lentamente en la capa líquida. Las nuevas burbujas que se forman empujan a las anteriores hacia la zona de espuma para cargarlas con minerales valiosos. La fase espumosa juega un papel crucial en la optimización del grado y la recuperación de sulfuros de cobre durante la flotación. Por lo tanto, los parámetros que controlan la velocidad de flotación están determinados por los efectos que ocurren en la pulpa del proceso. Esta teoría de la cinética de flotación de minerales se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dC_p}{dt} = k \cdot C_p^n \cdot C_b^m$$

Donde:

C_p : Concentración de las Partículas

C_b : Concentración de las Burbujas

t: Tiempo de Flotación

k: Constante de la Razón de Flotación

n y m: Orden de la Ecuación

En el caso en el que el suministro de aire sea constante, se observa una tendencia de cambio mínima en la concentración de burbujas, lo que hace que C_b sea pequeño. En esta situación, la ecuación de velocidad se simplifica a:

$$\frac{dC_p}{dt} = k \cdot C_p^n$$

Cuando el valor de n es igual a 1, la ecuación de velocidad se simplifica a:

$$\frac{dC_p}{dt} = k \cdot C_p$$

Al aplicar las condiciones límite, se obtiene:

$$C = C_o \text{ cuando } t = 0$$

$$C = C_t \text{ cuando } t = 1$$

Finalmente, se puede expresar:

$$\ln \frac{C_1}{C_0} = -kt$$

Después de despejar la ecuación:

$$C_1 = C_0 \exp(-kt)$$

2.3.11. Termodinámica de flotación

Esta etapa se centra en el análisis del equilibrio en los sistemas de flotación y la energía involucrada en el proceso de flotación de minerales. Se investigan las fuerzas impulsoras y los equilibrios químicos entre los reactivos, las partículas minerales y las burbujas de aire. Se estudia cómo los reactivos se adhieren a las superficies minerales y se determinan las condiciones energéticas que favorecen la flotación. Esto incluye la evaluación de la adsorción de reactivos en las partículas y la estabilidad de las burbujas en la pulpa.

Para que una burbuja se adhiera a una partícula mineral durante la flotación, deben cumplirse ciertas condiciones termodinámicas e hidrodinámicas. Primero, se debe garantizar que haya una colisión entre la partícula mineral y la burbuja. Durante esta colisión, es crucial que la película de líquido que las separa se debilite y rompa brevemente, creando una nueva interfase entre el mineral y el aire. La eficacia y la estabilidad de esta adhesión dependen de la hidrofobicidad del mineral (Orihuela, F., 2019).

En esencia, la flotación implica la adhesión de una partícula mineral parcialmente hidrofóbica a una burbuja de gas. La hidrofobicidad está influenciada por la tensión superficial. Desde una perspectiva termodinámica, la tensión superficial y la energía libre superficial se definen como:

$$(\gamma) = (\partial G / \partial A)_{t,p,n}$$

Donde:

A: Es el área interfacial.

n: El número de moles presentes en el sistema.

p y t: La presión y temperatura absoluta, respectivamente.

La flotación ocurre cuando las tensiones superficiales están balanceadas en los sistemas mineral-gas-líquido, lo cual se expresa en la siguiente ecuación termodinámica:

$$\Delta G_{adh} = \gamma_{SG} - (\gamma_{SG} + \gamma_{LG})$$

Donde:

ΔG_{adh} : Es la variación de energía libre durante la adhesión partícula mineral/burbuja., $\gamma_{SG}, \gamma_{SL}, \gamma_{LG}$: Son las tensiones interfaciales sólido/gas, sólido/líquido y líquido/gas, respectivamente.

En conclusión, la adhesión entre una partícula mineral y una burbuja durante la flotación está influenciada por la hidrofobicidad del mineral y por el equilibrio de las tensiones superficiales en el sistema mineral-gas-líquido. Estos aspectos termodinámicos son cruciales para comprender y gestionar eficazmente el proceso de flotación en la separación de minerales valiosos de la ganga.

La integración de la cinética y la termodinámica en el proceso de flotación es vital para optimizar el rendimiento, asegurar una recuperación efectiva de los minerales

valiosos y reducir los problemas operativos y ambientales asociados con la flotación en la industria minera.

Dosificación: La dosificación se refiere al proceso de determinar y controlar con precisión la cantidad adecuada de una sustancia, ya sea un reactivo, medicamento o aditivo, en una mezcla o proceso, con el fin de alcanzar un objetivo específico. En el ámbito de la flotación de minerales, la dosificación implica calcular y administrar de manera exacta los reactivos químicos que se usan para promover la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire durante el proceso de flotación, con el propósito de maximizar la recuperación de los minerales deseados.

Las fórmulas para la dosificación de reactivos en la flotación de minerales pueden variar según el tipo de reactivo y el diseño experimental utilizado. Sin embargo, en términos generales, estas fórmulas se relacionan con la preparación de soluciones de reactivos y la determinación de las cantidades adecuadas a añadir.

Algunas fórmulas básicas para la dosificación en la flotación incluyen:

a. Cálculo de la concentración de una solución de reactivo:

$$\text{Concentración (C)} = (\text{Masa del reactivo} / \text{Volumen del disolvente})$$

b. Cálculo de la dosis de reactivo por tonelada de mineral:

$$\text{Dosis de reactivo} = (\text{Cantidad de reactivo utilizado} / \text{Toneladas de mineral en el proceso})$$

Es crucial tener en cuenta que las dosis óptimas de reactivos se determinan a través de pruebas experimentales y pueden variar según las condiciones específicas del mineral, el tipo de reactivos utilizados y los objetivos de la flotación. Por lo tanto, es importante realizar pruebas de laboratorio y experimentos para ajustar las dosis y lograr la máxima

eficiencia y recuperación de los minerales valiosos en el proceso de flotación. Los procedimientos para llevar a cabo la dosificación incluyen:

- **Diseño Experimental:** Se realiza una planificación detallada de las pruebas de flotación mediante un diseño experimental que permita evaluar distintas combinaciones de reactivos y sus dosis.
- **Selección de Reactivos:** Se seleccionan cuidadosamente los reactivos para la flotación, incluyendo colectores, modificadores y espumantes, adaptándolos específicamente a la flotación de los minerales de plata del yacimiento.
- **Establecimiento de Rangos de Dosificación:** Se determinan los rangos de dosificación para cada reactivo, desde dosis mínimas hasta dosis máximas, que son pertinentes para el estudio.
- **Preparación de Soluciones:** Se prepara con precisión las soluciones de reactivos en diversas concentraciones dentro de los rangos establecidos, utilizando agua destilada o soluciones apropiadas para la flotación.
- **Realización de Pruebas de Flotación:** Se llevan a cabo las pruebas de flotación empleando las combinaciones de reactivos y dosis previstas en el diseño experimental.
- **Análisis de Resultados:** Se evalúan detalladamente los resultados de las pruebas de flotación para determinar la eficacia de cada dosis de reactivo en relación con la recuperación y calidad de los concentrados de plata.
- **Identificación de la Dosificación Óptima:** A partir de los resultados obtenidos, se determina la dosificación óptima de reactivos que maximiza la recuperación y calidad de los concentrados de plata.

Es crucial tener en cuenta que la dosificación óptima puede variar dependiendo de las características específicas del mineral, la composición de la ganga y las condiciones particulares de la planta de flotación.

2.3.12. Reactivos utilizados en el proceso de flotación de minerales

En el proceso de flotación de minerales, los reactivos tienen dos objetivos principales: facilitar que ciertos minerales presentes en la pulpa se adhieran a las burbujas de gas y garantizar la estabilidad de las películas formadas en dichas burbujas.

Los reactivos se dividen en tres categorías:

Colectores (o promotores): Estos reactivos, como el xantato sódico NaS (CS)OR, se adhieren a la superficie de las partículas sólidas, formando películas muy delgadas. Esta adsorción aumenta el ángulo de contacto entre el sólido y las burbujas, lo que hace que las partículas sean más hidrofóbicas y menos propensas a ser mojadas por el agua. Se les denomina "promotores" cuando el material adsorbido forma una película gruesa y "colectores" cuando genera una película delgada. Un ejemplo común de colector es el petróleo, aunque este puede generar una espuma grasosa que resulta difícil de romper en la etapa de sedimentación posterior (Hidalgo, 2015, pág. 20).

- **Colector MT-6100:** Se trata de una solución acuosa que contiene un colector de dos componentes a base de alqui ditiofosfato, diseñado para su aplicación en la flotación de sulfuros de cobre, plomo, plata y zinc, así como para cobre metálico y sulfuros de hierro en circuitos ácidos. Sus principales usos incluyen la flotación de cobre, plata, plomo y sulfuros de zinc activados, además de cobre metálico en ambientes alcalinos. También es eficaz para sulfuros de cobre, cobre metálico y sulfuros de hierro en circuitos ácidos. Es particularmente adecuado cuando se emplea en combinación con xantato

amílico para la flotación de sulfuros de níquel, como la pentlandita y la pirrotita níquel-serosa, en circuitos ácidos con carbonato de sodio. Se recomienda para flotación lenta y para sulfuros con manchas, y puede ser utilizado de manera individual o junto con xantatos.

Espumantes: Estos reactivos son esenciales para evitar la fusión de las burbujas de aire en la superficie del agua, asegurando así una espuma estable y con la selectividad necesaria. Un espumante eficaz debe poder moverse con facilidad en la interfase entre el agua y el aire. Los espumantes más comunes son compuestos heteropolares y surfactantes, los cuales tienen una parte polar que se une al agua y una parte no polar que se adhiere al aire. En la interfase agua-aire, los espumantes se disponen de manera que su parte polar se orienta hacia el agua y la parte no polar hacia el aire (Hidalgo, 2015).

- **Espumante MT-342:** Este espumante está compuesto por una mezcla de alcoholes, aldehídos pesados y ésteres, incluyendo etil hexanol, butanol, un complejo oxigenado, hidrocarburos, 2-etil hexanol, y una mezcla de alcoholes residuales.
- **MIBC:** Metil Isobutil carbinol, espumante de característica fuerza débil, utilizado en la flotación de sulfuros polimetálicos para flotación selectiva.

Modificadores: Estos reactivos se emplean para activar o alterar la capacidad de adsorción de los colectores o promotores. Pueden funcionar de diversas maneras:

- **Depresantes:** Bloquean o reducen la adsorción del colector en las partículas minerales, impidiendo su flotación.
- **Activadores:** Incrementan la capacidad de adsorción de los colectores o promotores.

- Agentes reguladores de pH: El pH del agua es crucial, ya que controla la formación de películas y, en muchos casos, la flotación solo es efectiva dentro de un rango específico de pH.

En resumen, los reactivos empleados en la flotación de minerales desempeñan roles específicos que facilitan la separación y concentración de los minerales valiosos mediante la creación de una espuma selectiva.

2.3.13. Diseño Experimental

Montgomery (1991) sostiene que un experimento diseñado consiste en llevar a cabo pruebas planificadas en las que se modifican de manera intencionada las variables de entrada de un proceso o sistema. Esta metodología permite observar y comprender las razones detrás de las variaciones en la respuesta de salida. El diseño experimental es una parte clave del proceso científico y sirve para adquirir conocimiento sobre el funcionamiento de sistemas y procesos. Generalmente, se sigue una serie de pasos en los que se plantean hipótesis sobre un proceso, se realizan experimentos para recopilar datos relevantes y estos datos se utilizan para formular nuevas hipótesis, lo que impulsa la realización de nuevos experimentos, y así sucesivamente.

En el campo de la ingeniería, el diseño experimental es esencial tanto para mejorar procesos de fabricación existentes como para desarrollar nuevos procesos. Aplicar esta metodología en las etapas iniciales del desarrollo de un proceso puede traer numerosos beneficios, tales como optimización del rendimiento, reducción de costos, cumplimiento de requisitos, acortamiento del tiempo de desarrollo y disminución de costos generales.

En el diseño de ingeniería, los métodos de diseño experimental son cruciales para evaluar y comparar configuraciones de diseño básicas, explorar materiales alternativos, seleccionar parámetros de diseño que aseguren un buen rendimiento del producto en

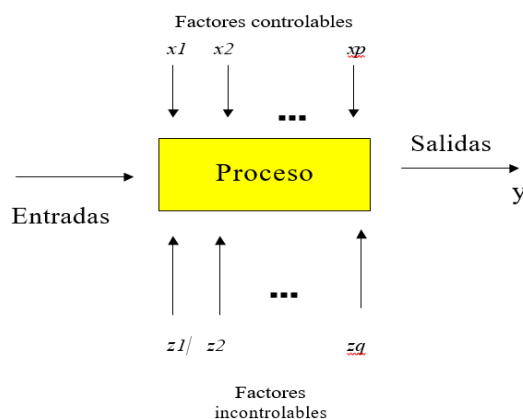
diversas condiciones, y determinar los parámetros críticos que afectan negativamente al rendimiento del producto.

Implementar el diseño experimental en estas áreas puede llevar a la producción de productos más simples, con mejor rendimiento y confiabilidad en condiciones reales, reducción de costos de producción, y tiempos de diseño y desarrollo más cortos.

En síntesis, el diseño experimental es una parte fundamental del proceso científico y una herramienta vital para adquirir conocimiento sobre sistemas y procesos. Su aplicación en diversas disciplinas, incluyendo la ingeniería, ofrece múltiples beneficios como la mejora del rendimiento, reducción de costos y tiempos de desarrollo más breves.

Figura 10

Modelo general de un proceso o sistema.



Nota: Tomado de Diseño y Análisis de Experimentos. México, por (Montgomery, 1991, pág. 2)

El diseño experimental ²³ es una herramienta estadística fundamental para optimizar procesos metalúrgicos como la flotación, ya que permite evaluar simultáneamente el efecto de tres factores, cada uno con dos niveles (alto y bajo), sobre una o más variables de respuesta. Este enfoque proporciona una visión clara de cómo

interactúan los factores y permite identificar combinaciones óptimas con un mínimo de ensayos (Montgomery, 2017).

En un diseño 2^3 , se realizan 8 experimentos ($2^3 = 8$ combinaciones), lo que permite evaluar los efectos principales y las interacciones de primer y segundo orden. En el caso de la flotación, este tipo de diseño es especialmente útil para estudiar variables como pH, tipo o dosis de reactivos, tiempo de flotación, velocidad de agitación, entre otros (Myers, Montgomery & Anderson-Cook, 2016).

En el contexto del beneficio de minerales mediante flotación, el diseño 2^3 permite explorar de forma sistemática los efectos de los factores sobre variables de respuesta como la recuperación de metal valioso (%), la ley del concentrado (%), la relación de enriquecimiento, etc.

Por ejemplo, un estudio típico podría considerar los siguientes factores:

Tabla 2

Factores y Niveles Considerados en el Estudio de Flotación

Factor	Variable	Niveles
A	pH de la pulpa	Bajo (9) / Alto (11)
B	Dosificación de colector	Bajo (20 g/t) / Alto (40 g/t)
C	Tiempo de flotación	Corto (6 min) / Largo (12 min)

Nota, Adaptado de Gutiérrez Pulido, F., & De la Vara, J. (2008). Estudio experimental sobre flotación

Las combinaciones experimentales se organizan en una matriz factorial que permite estimar los efectos individuales de cada factor (A, B, C), así como las interacciones dobles (AB, AC, BC) y la triple interacción (ABC). Esta estructura permite maximizar la información obtenida con un número reducido de ensayos (Gutiérrez Pulido & De la Vara, 2008).

Ventajas del diseño 2^3 :

- Evaluación simultánea de variables operativas clave. Reducción significativa en el número de ensayos requeridos.
- Identificación rápida de factores significativos y sus interacciones.
- Ideal para procesos complejos con múltiples parámetros como la flotación de minerales polimetálicos.

Análisis de resultados

El análisis estadístico del diseño 2^3 se realiza mediante ANOVA (análisis de varianza), que permite determinar la significancia estadística de cada efecto y sus interacciones. Posteriormente, se utilizan herramientas gráficas como los gráficos de Pareto, efectos principales, interacciones, y análisis de residuos para validar el modelo (Montgomery, 2017).

2.4. Definición de términos Básicos

- a) **Diseño:** Se refiere al proceso de concebir, planificar y crear algo con un objetivo específico en mente. En contextos científicos o técnicos, esto implica la formulación de un plan detallado para desarrollar un producto, sistema o experimento.
- b) **Yacimiento:** Es un área geológica que contiene una acumulación natural de minerales, rocas o fósiles con valor económico. Estos yacimientos albergan recursos minerales que pueden ser extraídos y procesados para su aprovechamiento.
- c) **Concentrado:** Producto obtenido al procesar y separar los minerales valiosos de la ganga durante el proceso de beneficio. El concentrado posee una alta

concentración de los minerales deseados y está preparado para su procesamiento adicional o comercialización.

- d) **Reactivo:** Sustancia química empleada en procesos industriales o experimentos para inducir una reacción química específica. Los reactivos pueden modificar las propiedades de las sustancias y facilitar la separación o transformación de sus componentes.
- e) **Mineral:** Sustancia sólida e inorgánica que se encuentra de manera natural en la Tierra, con una composición química definida y una estructura cristalina ordenada. Los minerales son los componentes básicos de las rocas y pueden tener valor económico debido a sus propiedades físicas o químicas.
- f) **Balance metalúrgico:** Método de cálculo utilizado para evaluar la eficiencia de un proceso metalúrgico y analizar el comportamiento de los materiales y las corrientes de productos a lo largo del proceso. Se utiliza para medir la recuperación de minerales y valorar la efectividad de la separación y concentración.
- g) **Cabeza o mineral de alimentación:** Material original o crudo introducido en un proceso de tratamiento o beneficio. En minería y metalurgia, se refiere a la mezcla de minerales y ganga que será sometida a procesos de molienda, separación y concentración.
- h) **Ensayos:** Pruebas o experimentos realizados para obtener información o resultados científicos o técnicos. Los ensayos se realizan de manera controlada y sistemática para evaluar las propiedades, características o comportamiento de un material, sistema o proceso.
- i) **Recuperación:** En minería y metalurgia, se refiere al porcentaje de minerales valiosos que se logra extraer o recuperar con éxito en comparación con la

cantidad total presente en el mineral de alimentación. Esta medida de eficiencia se expresa como un porcentaje.

- j) **Relave:** residuos sólido generado después del tratamiento de minerales para extraer los minerales valiosos, que incluye la ganga y el agua utilizada durante el proceso.

CAPÍTULO III: HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1.Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

La evaluación sistemática de los reactivos de flotación mediante diseño experimental mejora significativamente la recuperación de plata.

3.1.2. Hipótesis Específicas

- El colector MT-6100 Influye directamente en la recuperación de plata del mineral del yacimiento.
- Las variables operativas pH, tiempo influyen significativamente en la recuperación y ley del concentrado de plata.
- La adecuada dosificación y combinación de reactivos incrementan la recuperación de Ag, corroborado por el software MINITAB a través de un modelo matemático predictivo.

3.1.2.1.Variable Dependiente

- Porcentaje de Recuperación de plata.

3.1.2.2.Variable Independiente

- pH
- Tiempo
- Dosificación

3.1.2.3.Variables Intervinientes

Granulometría

Densidad de pulpa

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES:

EVALUACION DE REACTIVOS DE FLOTACIÓN POR DISEÑO EXPERIMENTAL PARA INCREMENTAR LA RECUPERACION DE PLATA DEL YACIMIENTO DE ALPAYANA UBICADO EN HUAROCHIRI – LIMA

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Unidades	Instrumentos
Dependiente:	Proporción del metal valioso (plata) que se logra extraer del mineral	Porcentaje de plata recuperada en el	Rendimiento metalúrgico	%	Balanza de precisión, ICP, fórmulas metalúrgicas
Recuperación de plata	tratado, expresado como porcentaje del contenido original presente en la muestra.	concentrado respecto al total contenido en la alimentación de flotación.			
Independientes	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Unidades	Instrumentos
pH	Medida de la concentración de iones hidrógeno en una solución; afecta la interacción de reactivos con los minerales.	Valor medido del pH en la pulpa durante el proceso de flotación.	Condición fisicoquímica de la pulpa	Escala numérica (0–14)	Potenciómetro, tiras indicadoras
Tiempo	Tiempo de residencia o agitación durante la etapa de flotación, que influye en la cinética de recuperación del mineral.	Intervalo de tiempo en que se realiza la prueba de flotación batch desde el inicio hasta el final.	Duración del proceso	Minutos	Cronómetro, software de control
Dosificación	Cantidad específica de reactivo (colector, espumante, depresor, etc.) añadida al proceso, que influye en la eficiencia de separación del mineral.	Cantidad de reactivo agregado por tonelada de mineral durante la flotación.	Tipo y concentración del reactivo usado	g/t (gramos por tonelada)	Balanza analítica, manual de procedimiento

Nota: Elaboración propia con base a estructura de tesis

CAPÍTULO IV: METODOLOGIA

4.1 Localización geográfica y política de Alpayana

Alpayana, antes conocida como Compañía Minera Casapalca, se encuentra ubicada en la provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima, Perú, específicamente a la altura del kilómetro 115 de la Carretera Central. Geográficamente, está situada en la sierra central del país, a una altitud de 4,200 metros sobre el nivel del mar. Políticamente, pertenece a la provincia de Huarochirí, que a su vez forma parte del departamento de Lima.

Figura 11

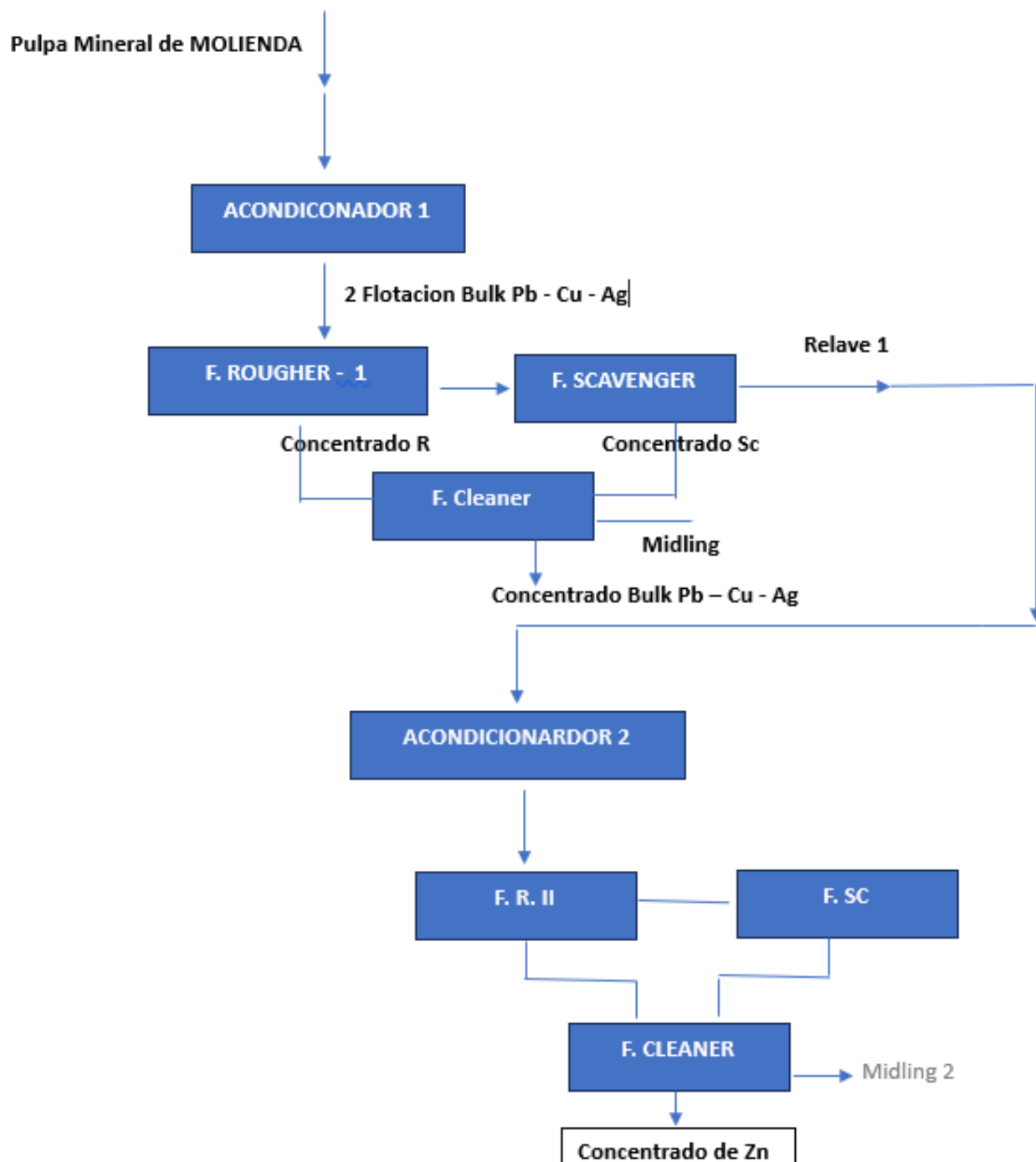
Ubicación geográfica y política



Nota: Extraído de https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_Huarochir%C3%AD

Figura 12

Flow sheet de trabajo en planta y en laboratorio metalúrgico de la Empresa



Nota. Elaboración propia

4.2 Tipo, nivel y Diseño de Investigación

4.2.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación tiene un enfoque cuantitativo de tipo experimental, puesto que realiza pruebas a nivel de laboratorio para evaluar el mejor performance del reactivo que brinde mejor tratamiento tanto ley y recuperación al cuerpo mineralógico a estudiar.

4.2.2 Nivel de investigación

El alcance de investigación es explicativo, porque permite caracterizar en cada etapa las fenomenologías del proceso y será explicativo, porque realizaremos cálculos de las variables dependientes e independientes para optimizarlas a través de un DOE.

4.2.3 Método de investigación

De acuerdo con Hernández, Sampiere y Batista (2018), se utilizará el método de investigación analítica y aplicada. Debido a las diversas etapas del proceso el cual desembocará en un análisis de los resultados a obtener y es aplicada por su característica experimental.

4.2.4 Diseño de Investigación

El diseño experimental de tipo causa-efecto es uno de los enfoques más rigurosos y sistemáticos dentro de la investigación científica, cuyo objetivo principal es establecer relaciones de causalidad entre variables. En este diseño, el investigador manipula una o más variables independientes (causas) y observa los cambios o efectos resultantes en una o más variables dependientes (efectos), bajo condiciones controladas (Kerlinger & Lee, 2002).

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), este tipo de investigación “se utiliza cuando se quiere conocer el efecto que una o varias variables independientes ejercen sobre una o

más variables dependientes”. De esta forma, permite no solo describir fenómenos, sino predecir y controlar comportamientos, lo que es esencial en campos aplicados como la ingeniería, la metalurgia o la química.

Características principales:

Manipulación intencional de variables: El investigador controla las condiciones y modifica deliberadamente las variables independientes.

Control de variables externas: Se aíslan o minimizan los efectos de factores ajenos al experimento para asegurar la validez interna.

Asignación aleatoria: Los sujetos o unidades experimentales se asignan de manera aleatoria a los diferentes grupos o tratamientos, lo que garantiza la equivalencia inicial.

Aplicación en procesos metalúrgicos

En la ingeniería metalúrgica, el diseño experimental causa-efecto es ampliamente utilizado en la optimización de procesos como la flotación, donde se analiza cómo factores como el pH, el tipo y dosis de reactivos, o el tiempo de flotación afectan la recuperación de un mineral específico (Montgomery, 2017).

Por ejemplo, en un diseño 2^3 , se evalúan tres factores (como el pH, la dosificación del colector y el tiempo de flotación), cada uno con dos niveles (alto y bajo), generando combinaciones que permiten observar sus efectos individuales y combinados sobre la recuperación de plata. Esta estructura permite inferir cuál variable tiene mayor influencia causal y bajo qué condiciones se maximiza la respuesta (Myers, Montgomery & Anderson-Cook, 2016).

4.3 Población de estudio

4.3.1 Población

Está constituida por todos los minerales del yacimiento polimetálico tipo 'Cordillerano' que contiene minerales de plata, plomo, zinc y cobre cuya mineralogía varía con respecto a los zoneamientos verticales y horizontales. Debido a la naturaleza mesotermal de las vetas, tendrán una gran extensión vertical que llegará por debajo de los 3.900 m s. n. m.

Los cuerpos mineralizados se disponen de manera muy irregular, producto de soluciones hidrotermales reemplazando una matriz calcárea, y existe alteración y solidificación que va desde muy leve a regular

4.3.2 Muestra

Se tomará unas muestras de compósito del mineral denominado “cuerpos” que representa el mineral con menor ley en plata esto con asegurar un mejor tratamiento al mineral problema, cuyo tamaño será de 40 kilogramos y será enviado a los laboratorios de Certimin para proceder con las pruebas metalúrgicas más adecuadas según al tipo de mineral tratado.

4.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En el presente estudio, se aplicaron técnicas e instrumentos adecuados al enfoque cuantitativo-experimental, con el propósito de recolectar datos válidos y confiables para evaluar el comportamiento del proceso de flotación.

4.4.1. Técnicas

- Análisis documental: Se revisaron fuentes científicas, técnicas y académicas relacionadas con la flotación de minerales, recuperación de plata y diseño experimental, con el fin de establecer un marco teórico y contextual sólido (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

- Observación directa: Se realizó un seguimiento detallado del proceso en planta, considerando condiciones reales de operación, parámetros metalúrgicos y variables de control.

4.4.2. Instrumentos

- Guía de observación: Se utilizó una hoja de registro para documentar, de manera sistemática, las condiciones del proceso y las variaciones observadas durante la recolección de datos.

- Recipiente de recolección de muestras: Se empleó un contenedor plástico con capacidad de 200 mL para la toma de muestras de pulpa y concentrados, facilitando su análisis posterior.

- Equipos de planta: Se utilizaron instrumentos propios de la planta de flotación como pH-metros, balanzas analíticas, cronómetros, medidores de flujo y celdas mecánicas tipo Denver, necesarios para la ejecución del experimento.

4.5 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

4.5.1 Procesamiento de Datos

Para el procesamiento y organización de los datos experimentales, se utilizaron los programas Microsoft Excel 2019 y MINITAB 18. Estas herramientas permitieron generar tablas, gráficos y diagramas de tendencia que facilitaron una visualización clara del comportamiento del proceso. Según Gutiérrez Pulido y De la Vara (2008), el uso de software estadístico es esencial para modelar, representar y optimizar procesos experimentales de forma precisa y reproducible.

4.5.2 Análisis de Datos

El análisis de los resultados se realizó mediante el examen de gráficos de líneas, tablas comparativas y diagramas de Pareto. Se identificaron patrones de comportamiento, correlaciones

y anomalías. El método más importante fue el Análisis de Varianza (ANOVA), empleado para determinar la significancia estadística de los factores evaluados y validar las hipótesis planteadas (Montgomery, 2017).

4.5.3 Tratamiento Estadístico

Los datos generados fueron de naturaleza cuantitativa continua, por lo que se aplicó estadística descriptiva e inferencial. En paralelo, se verificó la existencia de valores atípicos (outliers) y su posible influencia en la media y la dispersión. Se aplicaron pruebas de normalidad, gráficos de caja, ANOVA y análisis factorial completo 2^3 para determinar los efectos principales e interacciones. Este enfoque brindó el soporte estadístico necesario para evaluar el comportamiento del proceso y validar la hipótesis central del estudio (Myers et al., 2016; Montgomery, 2017).

4.5 4 Selección, Validación y Confiabilidad de los Instrumentos

La validez y confiabilidad de los instrumentos empleados fueron evaluadas en función de su congruencia con los objetivos del experimento. Un instrumento es válido cuando mide lo que se propone medir, y confiable cuando produce resultados consistentes en condiciones similares (Hernández et al., 2014). Según López y Gonzáles (2014), la validez interna se refiere a que los resultados se atribuyen exclusivamente a la manipulación de la variable independiente, mientras que la validez externa alude a la posibilidad de generalizar los resultados a otros contextos similares.

Aunque existe una tensión entre ambas, se procuró maximizar la validez interna sin comprometer completamente la validez externa. Esto se logró mediante un control riguroso de las condiciones experimentales y una selección adecuada de factores y niveles.

4.5.5 Orientación Ética

La presente investigación se desarrolló bajo principios éticos fundamentales, evitando cualquier forma de plagio o conducta científica inapropiada. Se aplicaron normas de citación y parafraseo según el estilo APA (7.^a ed.), asegurando el reconocimiento adecuado de las ideas y aportes de otros autores. Como señalan Hernández et al. (2014), la ética en la investigación implica responsabilidad intelectual, veracidad en los resultados y respeto a los derechos autorales. Asimismo, se promovió la transparencia, integridad y rigor en todas las fases del estudio.

CAPÍTULO V: PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

5.1. Procedimientos experimentales:

Las pruebas de investigación metalúrgica se realizaron en los laboratorios de Investigaciones Químicas y Metalúrgicas de Certimin. Con la finalidad de optimizar el tratamiento de las pruebas de flotación y aplicar un diseño experimental que minimice los errores y reduzca la repetibilidad de los ensayos, se utilizaron cuarteadores, paletas colectoras de las espumas mineralizadas.

5.1.1. Recolección de muestras

Para el presente trabajo se realizó la toma de muestra de la faja transportadora alimento que va al stock pile, esta consiste en realizar una toma fresca del mineral problema pasante, para evitar error en la muestra se toma de varios puntos distintos de la faja transportadora acumulándolo en unos cilindros que posteriormente será trasladado por un montacargas a la zona de apilamiento de muestras, se juntan todas las muestras que fueron retirados de la faja para formar una sola muestra homogénea, posterior a esto, se lleva el mineral de $-\frac{1}{4}$ de pulgada al laboratorio metalúrgico de la Empresa.

5.1.2. Preparación de muestras para las pruebas experimentales

Para esta etapa del trabajo, el mineral $-\frac{1}{4}$ ", se lleva a la sección de preparación mecánica del laboratorio metalúrgico, los 100 Kg del mineral se pasa por la chancadora cónica REXON y una malla 10, se obtiene 100% - 10 M.

a) Muestreo

Una vez obtenido el mineral chancado a 100 – 10M se vierte todo el contenido de la muestra a un cuarteador rotatorio, esto con la finalidad de obtener divisiones precisas con un error del (+/- 0.5 %), de la muestra representativa; el cuarteador rotatorio tiene una tolva de alimentación de 50 a 100 libras por hora donde se llena el mineral, se enciende el motor y la velocidad es variable para fines del proceso investigativo se trabajó con 35% de la velocidad normal con 12 RPM, con un tipo de alimentación super lenta.

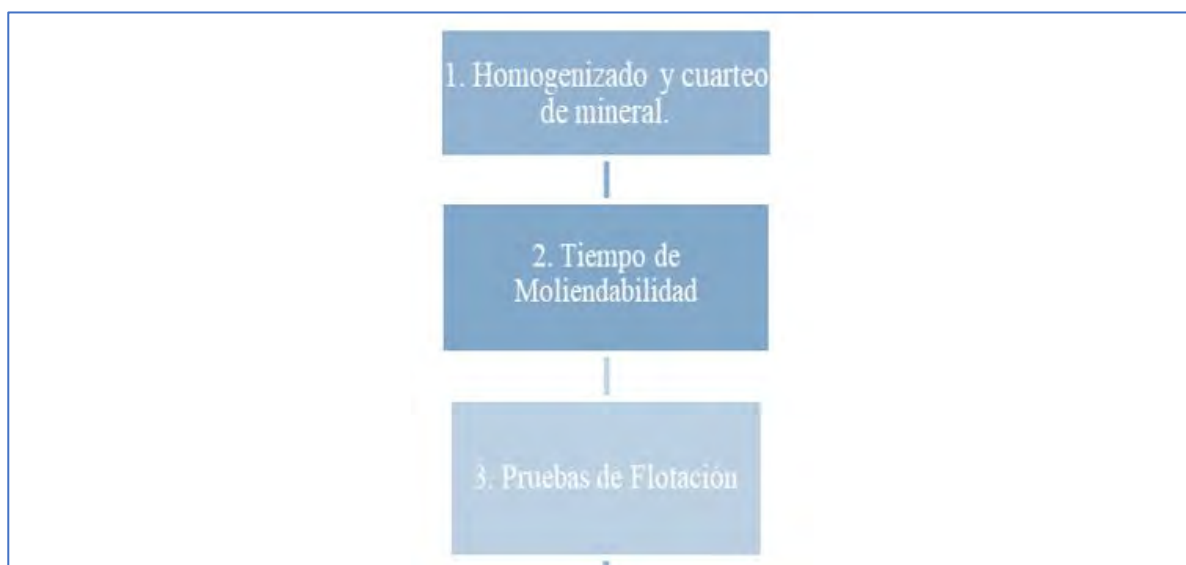
Se obtuvo 11 muestras de peso 1709 g para ser llevadas a la sección de flotación del laboratorio metalúrgico, también muestras para análisis químico y mineralógico y otras muestras para ser estudiadas en la misma Empresa más muestras testigo.

El siguiente Flow sheet de trabajo se muestra a continuación.

5.1.3. Flow sheet de trabajo preparación de muestras

Figura 13

Flow sheet de trabajo en planta y en laboratorio metalúrgico de la Empresa:



Nota: Elaboración propia

5.1.4. Análisis químico de la muestra

Tabla 3

Análisis Químico ley de Cabeza ensayada por duplicado

				Grado				
Test	Tipo	Referencia	Peso	Cu	Zn	Pb	Ag	
1	Mineral	Cabeza	G	%	%	%	%	ppm
		Ensayada 1	100	100	0.33	1.90	0.28	34.76
2	Mineral	Cabeza	G	%	%	%	%	ppm
		Ensayada 2	100	100	0.32	1.88	0.29	33.46

Nota. Laboratorios analíticos del Sur

5.1.5. Determinación de la gravedad específica o peso específico de la muestra

a) Materiales y equipos

- Muestra de mineral (5 g. malla -100)
- Horno Mufla
- Balanza analítica
- Embudo
- Pizeta
- Agua destilada
- Fiola de 100 ml

b) Procedimiento

- Realizar un tamizado de la muestra a trabajar, el 100% pasa la malla N°10 (-10M).

- Realizar el homogenizado y cuarteado (100g) de la muestra.
- Secar la muestra en la estufa a una temperatura de 105°C durante 5h.
- Seleccionar la fiola y asegurarse que las mismas a usar estén secas y limpias de lo contrario eliminar todo tipo de suciedad y usar el soplete de aire a presión hasta lograr el secado.
- Rotular la fiola para tenerla identificada.
- Pesar la fiola limpia y seca en la balanza de 0.01g de sensibilidad. Anotar el peso obtenido como peso de fiola vacía (A).
- Con la ayuda del embudo se agrega la muestra de mineral, la masa mínima deberá ser el 10% de la capacidad de la fiola.
- Pesar el conjunto peso de la fiola + muestra, anotar como masa (B).
- A la fiola que contiene muestra de mineral añadir agua destilada hasta alcanzar la cuarta parte de la capacidad total, agitar ligeramente el contenido hasta formar una pulpa homogénea.
- Agregar agua hasta alcanzar la mitad del volumen total, se procede a sacar el aire atrapado por medio de una bomba de vacío, que se conecta a la fiola mediante un tubo succionador, durante un lapso de 15 minutos o en su defecto hasta no observarse ningún burbujeo.
- Una vez terminado de extraer los vacíos agregar agua destilada hasta lograr el aforo (cada fiola posee una marca de aforo).
- Eliminar todo tipo de humedad en el exterior de la fiola y en el interior encima de la marca de aforo para ello emplear papel toalla.
- Se procede a pesar el conjunto fiola + muestra + agua. Anotar como masa (C).

Nota: tener en cuenta que la prueba se realiza por duplicado para tener mayor confiabilidad en el resultado obtenido.

Tabla 4*Elementos para determinar gravedad específica*

Datos	Simbología
Masa de fiola limpia y seca	A
Masa de fiola + muestra.	B
Masa de fiola + muestra + agua.	C
Volumen de fiola (ml)	D

Nota. Elaboración propia

$$G.e = \frac{B - A}{D - (C - B)}$$

Tabla 5*Determinación de la Gravedad Específica del Mineral*

Medición	W(g)	Vpc (ml)	A(g)	B(g)	C(g)	T (°C)	GE
1	5.460	50.000	43.510	66.820	109.650	25	3.25
2	5.010	50.000	43.870	62.550	106.800	25	3.25
GE (g/ml)							3.25

Nota. Elaboración propia**5.1.6. Cálculo del tiempo óptimo de molienda en seco**

La molienda se realizó por vía seca en el laboratorio de Preparación Mecánica de Minerales de CERTIMIN. En esta etapa, se determinó el tiempo óptimo de molienda a nivel de laboratorio, con el objetivo de definir el grado de liberación más adecuado para el tipo de material en estudio, así como la granulometría óptima para el siguiente proceso: la flotación.

Para las pruebas de molienda, se establecieron tres tiempos diferentes, con el fin de evaluar el efecto del tiempo de molienda sobre la granulometría y la distribución de los productos obtenidos.

Se detallan los criterios utilizados para definir el tiempo óptimo de molienda:

Alcanzar al menos un 60 % del producto bajo la malla 200, con el propósito de minimizar la presencia de valores retenidos en la malla 60, donde no es posible su recuperación eficiente.

Lograr que el 90 % de los contenidos de interés se encuentren por debajo de la malla 100, garantizando que los tamaños de partícula sean adecuados y factibles para su recuperación en el proceso de flotación. Evitar la sobre molienda, ya que esta genera un exceso de lamas, lo cual puede causar impurezas en el concentrado final debido al arrastre mecánico de partículas finas no deseadas.

a) Materiales y equipos

- Muestra de mineral (1038 g)
- Balanza analítica
- Balanza convencional
- Molino de bolas 8"x10"
- Ro-Tap
- Juego de mallas (MALLA 200 Y MALLA 100) del sistema A.S.T.M.
- Software Moly-cop Tools

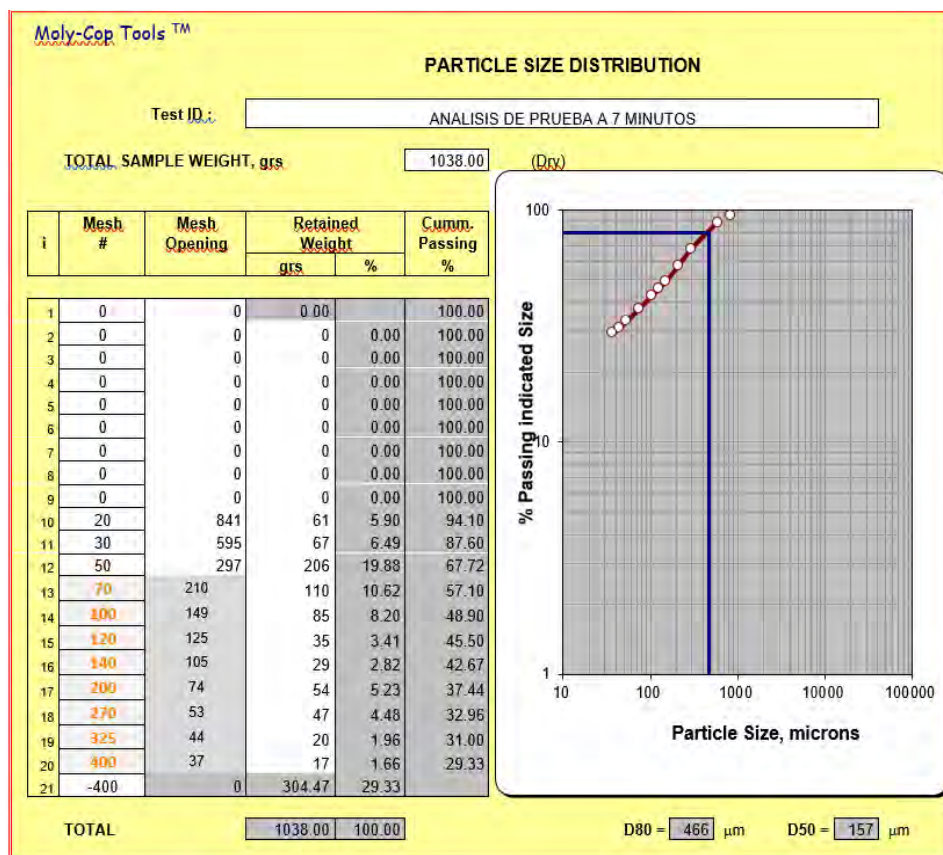
b) Procedimiento

- Tener listo 4 muestras de 1038 g de mineral para alimentación al molino.

- Proceder a cerrar el molino y empezar con la molienda en diferentes tiempos (7, 14 y 27 minutos respectivamente para cada carga de mineral)
- Finalizado la etapa de molienda deslamar en la malla de corte (#400) y el retenido en la malla +400 secar por un tiempo de 5 horas.
- Luego llevarlo al Ro-Tap con agitación de 10 minutos para cada muestra usando las mallas #20, #30, #50, #70, #100, #120, #140, #200, #270, #325, y #400. De la serie ASTM.
- Terminado esta etapa con ayuda de la balanza analítica pesar el pasante como retenido.
- Realizar los cálculos correspondientes con el software Molycop Tools.

Figura 14

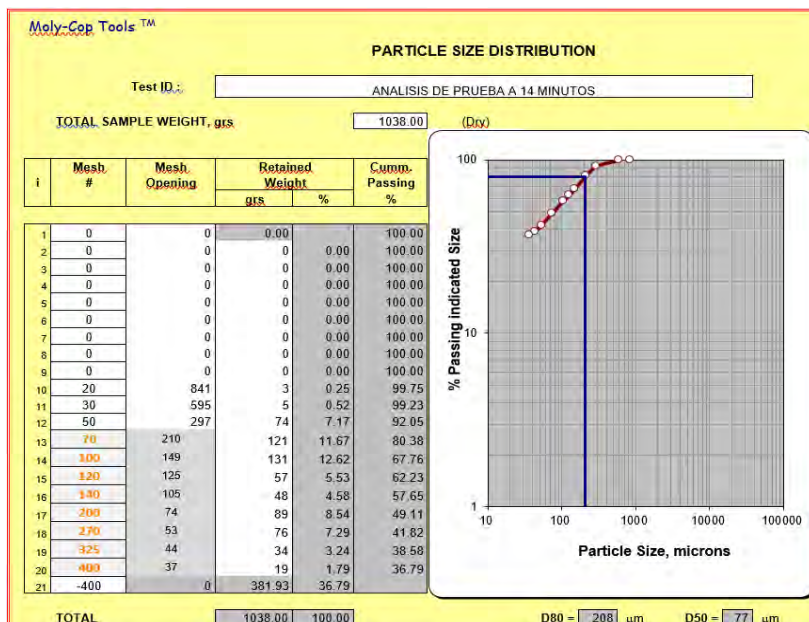
Distribución granulométrica de muestra seca molida a 7 minutos.



Nota: Elaboración propia

Figura 15

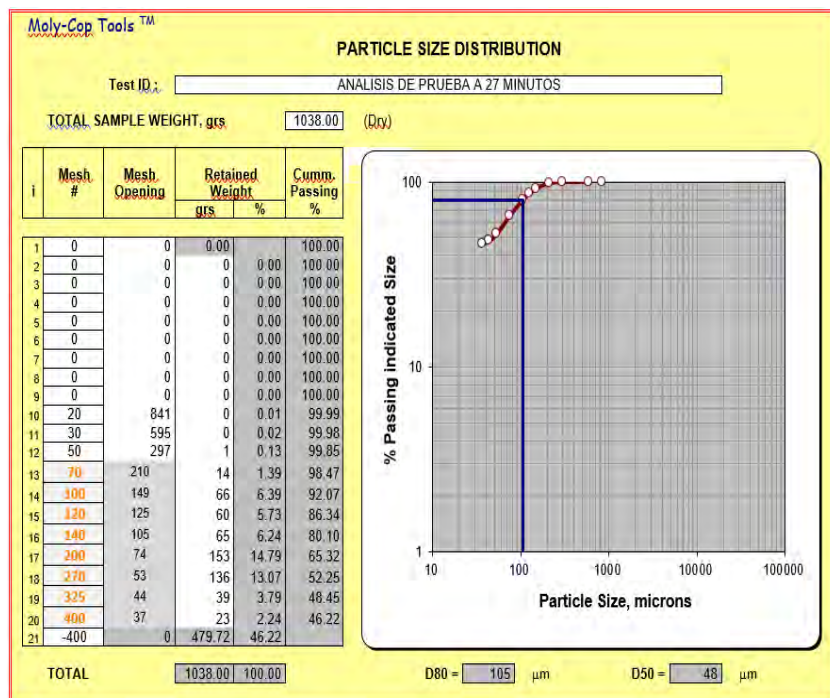
Distribución granulométrica de muestra seca molida a 14 minutos.



Nota: Elaboración propia

Figura 16

Distribución granulométrica de muestra seca molida a 27 minutos



Nota: Elaboración propia

La liberación del mineral por medio de la molienda se realizó a diferentes tiempos y luego se realizó la distribución para ver el % en peso en cada malla y calculando el porcentaje pasante encontramos el p80 deseado para esta prueba fue de 150 micrones y el grado de liberación fue de 0.90 o 90 % de liberación en un tiempo de molienda de 12 minutos.

5.1.7. Preparación de la pulpa para la alimentación a la celda de flotación

La pulpa mineral para cada una de las 11 pruebas experimentales del diseño factorial se prepara según los cálculos realizados en la siguiente hoja de Excel:

Tabla 6

Cálculos de Consistencia y Preparación de la Pulpa

Consistencia de pulpa: Está dado por W, P o D.					
Cuadro de pulpas:					
W=	1262,13745	g/lt	CONCEPTO	PESO (g)	VOLUMEN
S=	3,25	g/cc	Sólido	w	w/S
w: peso de sólidos en un litro de pulpa			Agua	1262.14-w	1262.14-w
Peso seco muestra:	1709	gramos	Pulpa	1262,13745	1000

Nota. Elaboración propia.

Tabla 7

Detalle de la Composición de la Pulpa para la Alimentación a la Celda de Flotación

	Para un litro pulpa			P. Exprim.		
CONCEPTO	PESO	VOLUMEN	P	D	peso	vol. Mc
Sólido	378.6429833	116.5055333	30.00013852		1	1709
Agua	883.4944667	883.4944667	69.99986148	2.333317942	3987.640363	3987.640363
Pulpa	1262.13745	1000	100	3.333317942	5696.640363	4513.486517

Nota. Elaboración propia.

Se puede observar, que para un peso de muestra de 1709 g se debe agregar 3987.64 cm³ de agua; resultando un % de sólidos (P) de 30% y una densidad de pulpa de 1262.14 g/l. Esta pulpa, se lleva a la celda de flotación, donde se adicionará los reactivos químicos, luego se acondiciona un tiempo y se procede con la flotación.

a) Materiales y equipos

- Probeta de 1000 ml.
- Piseta
- Balanza
- Celda de flotación
- Paleteador Automático
- Muestra de mineral
- Agua de proceso
- Reactivos Químicos
- Cronómetro

5.1.8. Preparación de reactivos

Tabla 8

Concentración de Reactivos

Concentraciones de reactivos	
[ZnSO ₄ /NaHSO ₃] %:(4/1)	1
[NaCN]: %	1
[Z-6/Z-11]: (1/1) %	1
[MT-6100] :(Puro)	Puro
[MIBC]:(Puro)	Puro
[CuSO ₄ .5H ₂ O]: %	5

Nota: Elaboración propia

Tabla 9*Dosificación de Reactivos*

Modificador de pH: Cal apagada:		
pH 10	1.5	g de cal
pH 8	1.0	g de cal
pH 9	1.3	g de cal
Reactivo colector principal: MT-6100		
— Dosis: 30:	1.14	gotas
— Dosis 60:	1.52	gotas
— Dosis: 40:	1.01	gotas

Nota: Elaboración propia**Tabla 10***Reactivos evaluados en el diseño factorial*

Variables Evaluadas			Agregación de Reactivos Constantes				
CAL	colector: MT-6100 gotas	Tiempo	ZnSO4/NaHSO3(3/1)	NaCN	Z-11/Z-6 (1/1)	MIBC (gotas)	CuSO4.5H2O
0.33	1.14	6	4.6	0.69	0.8	4.5	1.15
0.33	1.14	6	4.6	0.69	0.8	4.5	1.15
0.4	1.52	6	4.6	0.69	0.8	4.5	1.15
0.4	1.52	6	4.6	0.69	0.8	4.5	1.15
0.3	1.14	12	7.45	1.12	0.8	6	1.86
0.3	1.14	12	7.45	1.12	0.8	6	1.86
0.4	1.52	12	7.45	1.12	0.8	6	1.86
0.4	1.52	12	7.45	1.12	0.8	6	1.86
0.4	1.01	9	5.97	0.9	0.8	5.1	1.49
0.4	1.01	9	5.97	0.9	0.8	5.1	1.49
0.4	1.01	9	5.97	0.9	0.8	5.1	1.49

Nota: Elaboración propia

Tabla 11

Condiciones de Flotación

Condiciones de flotación		
W(mineral) (g)	1.709	g
Sólido	30	%
Velocidad impeler (Rougher)		
RPM	720	RPM
Velocidad Impeler (Scv.)	720	RPM
P80 (-µm)	150	µm
V(pulpa) (L)	4.51	lt
Muestreo:	Faja de alimento	

Nota: Elaboración propia**a) Colectores**

Xantato amílico de potasio (Z-6): Este Xantato, es ampliamente utilizado en operaciones de flotación que requieren un alto poder colector. Su eficacia lo convierte en uno de los reactivos más empleados en la flotación de minerales sulfurados de cobre, plomo, zinc, hierro, níquel, cobalto, entre otros. Su fuerte afinidad por las superficies minerales lo hace especialmente útil en circuitos donde se busca maximizar la recuperación de sulfuros valiosos.

Además, este Xantato es considerado un colector de referencia para la flotación de minerales parcialmente oxidados o manchados, especialmente aquellos de cobre y plomo, cuando se emplea juntamente con agentes sulfidizantes como el sulfuro de sodio (Na_2S). Esta combinación permite activar la superficie del mineral oxidado para que responda favorablemente al reactivo colector.

Cabe destacar su aplicación exitosa en la flotación de pirita aurífera, donde actúa eficientemente promoviendo la recuperación del oro contenido en la matriz sulfurada. Su alto poder colector, aun en condiciones de pH moderadamente alcalino, permite obtener concentrados de buena ley, aunque debe manejarse con precaución para evitar la flotación excesiva de ganga y otros sulfuros indeseables.

Xantato isopropílico de sodio (Z-11): Este Xantato, gracias a su elevado poder colector, es ampliamente utilizado en la flotación de minerales complejos como los de plomo-zinc y cobre-hierro, en los cuales predominan minerales sulfurados tales como calcopirita, calcocita, enargita, galena, esfalerita, marmatita, pirita y pirrotita. Su acción efectiva sobre estos minerales permite una recuperación significativa en circuitos donde coexisten varios sulfuros metálicos, siendo especialmente útil en minerales de baja ley y de mineralogía complicada.

Adicionalmente, este reactivo encuentra aplicación en la concentración de minerales de cobre nativo, plata y oro, así como en sulfuros de hierro que contienen metales valiosos como cobalto y níquel. También es utilizado en la recuperación selectiva de pirita de hierro, especialmente cuando esta contiene valores metálicos asociados como el oro.

Es importante tener en cuenta que los xantatos tienden a descomponerse en soluciones con pH ácido (menor a 6.0), lo cual puede afectar su eficiencia y selectividad durante el proceso de flotación. Por ello, el control del pH es un factor crítico en su aplicación.

MT 6100: Es un reactivo químico utilizado en la recuperación de plata que mejora la captación de plata fina o disuelta, especialmente en procesos de lixiviación con cianuro; actúa eficazmente en pH alcalino (8-10), es compatible con otros reactivos como el cianuro y el zinc,

reduce pérdidas metálicas, tiene baja toxicidad y es fácil de dosificar, lo que lo hace ideal para optimizar procesos

Modificadores

Sulfato de Zinc más metabisulfito: Es un depresor en la flotación Pb-Cu, controla la activación del Zn normalmente se dosifica en molienda para deprimir iones de Fe, Zn y menas de pirita.

b) Activadores

Sulfato de Cobre $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: Es una sal de cobre soluble en agua: Su reacción es ácida en solución acuosa (pH 3.5 en solución 10% w/v). Es un activador

c) Espumantes

MIBC: Metil Isobutil carbinol, espumante de característica fuerza débil, utilizado en la flotación de sulfuros polimetálicos para flotación selectiva.

5.1.9. Pruebas de Flotación Estándar (Línea Base)

Antes de ejecutar el diseño experimental, se realizaron pruebas bajo condiciones estándar de planta para establecer una línea base de comparación. Estas pruebas reflejan el rendimiento actual utilizando reactivos convencionales y parámetros sin optimizar.

Prueba	pH	Dosificación Colector	Tiempo (min)	% Recuperación Ag
Estándar 1	9.0	Convencional	8.0	70.10%
Estándar 2	9.0	Convencional	8.0	72.20%
Promedio	9.0		8.0	71.15%

5.1.10. Procedimiento de las 11 pruebas experimentales de flotación en laboratorio

La flotación de minerales es un proceso de separación utilizado en la industria minera para concentrar minerales valiosos a partir de minerales de menor valor o ganga. Este proceso se basa en las propiedades físicas y químicas de los minerales y utiliza burbujas de aire para separar selectivamente los minerales valiosos de la ganga.

Cada prueba sigue el siguiente procedimiento:

- a) Preparación de la pulpa: A la celda de flotación se agrega el mineral molido más el agua con un % de sólidos del 30 %.
- b) Agregación de los reactivos de flotación: De acuerdo a cálculos realizados en función del peso de muestra y la dosis de cada reactivo, se agregan a la pulpa en la celda de flotación.
- c) Acondicionamiento: Se da un tiempo de acondicionamiento de 4 minutos, solamente con agitación, pero sin ingreso de aire.
- d) Flotación rougher: Se apertura el ingreso de aire, estando la pulpa agitada y acondicionada, dándose un tiempo de flotación entre 8 y 12 minutos según sea el número de prueba y desde el primer momento se separa las espumas de celda con una paleta a una bandeja de concentrados.
- e) Flotación scavenger: Es una flotación barredora o agotadora que se aplica al relave rougher, recogiendo también los concentrados con una paleta a otra bandeja y dura un tiempo determinado.

- f) Flotación Cleaner: Se flotan los concentrados rougher y scavenger en otra celda más pequeña, el concentrado obtenido, es el concentrado bulk Pb-Cu-Ag y su relave es el midling.
- g) Flotación Rougher de Zinc: A esta flotación se agrega el reactivo activador para flotar los sulfuros de Zinc y de plata que todavía quedaron, es un tiempo menor que la flotación rougher para el bulk.
- h) Flotación scavenger y cleaner para Zinc: Se procede casi idéntico que para la flotación del bulk, solamente los tiempos son menores y la dosis de reactivos son también nulos o menores.

a) Materiales y equipos

- Mineral previamente preparado para la flotación
- Reactivos de flotación (AR-1404, Z-6, Z-11, MIBC, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, NaCN, NaHSO_3)
- Celda de flotación de 6000 ml (6.00 litros)
- Balanza digital
- Cronometro
- Probeta de vidrio de 1000 ml
- Bandejas de acero inoxidable
- Paletas de madera
- pHchimetro
- Picetas
- Jeringas (5 ml)

b) Procedimiento

- Descargar la pulpa de la molienda en la celda de flotación
- Colocar la celda en la base del agitador.
- Bajar el impulsor en forma lenta hasta el tope.
- Agregar agua de acuerdo a nuestros cálculos realizados previamente para cada etapa de flotación.
- Encender el agitador y verificar la medida del pH de la pulpa.
- Después acondicionar la pulpa con los reactivos por un tiempo de 4 minutos periodo de acondicionamiento se agrega espumante MIBC y colectores primarios mezcla de Z6 y Z11. Además adicionamos el colector MT6100, que se evalúa en el diseño experimental. Seguidamente, agregamos 0.9 ml de la mezcla sulfato de zinc con metabisulfito de sodio en dilución 4:1 al 5%.
- Flotación rougher I: Se Abre seguidamente la válvula de ingreso de aire y flotar por un periodo de programado en minutos.

Empezar a jalar y recolectar en las bandejas las espumas 10 veces con la paleta cada minuto. Seguidamente, agregamos 0.9 ml de la mezcla sulfato de zinc con metabisulfito de sodio en dilución 4:1 al 5%. Acondicionar por 4 minutos y flotar por un tiempo programado.
- En la flotación se debe controlar el agua de reposición a la celda para la estabilidad de la pulpa y colección.
- En la flotación rougher II, agregamos el reactivo activador del Zinc que es el $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ que está preparado al 5%. En caso de faltar colectores y espumantes se agrega lo necesario.

Tabla 12*Parámetros para la realización de las pruebas.*

Condiciones para la realización de las pruebas de flotación	
Granulometría:	80% (malla -100)
pH:	10
Densidad de pulpa:	1262.14 g/l
Peso de pulpa en flotación:	5696.64 g
Peso de agua flotación	3987.64 g
R.P.M.	720
% de solidos:	30
Tiempo de flotación:	De acuerdo a programación.
Tiempo de acondicionamiento:	4 minutos

Nota. Datos obtenidos en pruebas experimentales de flotación realizadas en laboratorio

Se realizarán seis pruebas preliminares (a priori), con el objetivo de evaluar los colectores y espumantes más adecuados que puedan mejorar el rendimiento metalúrgico del proceso de flotación. Como consecuencia de las voladuras, el mineral extraído arrastra este contaminante, generando un efecto colateral significativo: el aumento del pH natural del mineral, que normalmente es de aproximadamente 7, elevándose hasta valores cercanos a 9. Este incremento del pH puede influir negativamente en la eficiencia de los reactivos colectores y espumantes, modificando la química de la superficie de los minerales y afectando la selectividad del proceso de flotación.

5.2. Diseño Experimental del trabajo de investigación

A continuación, presento los resultados del diseño experimental que explicará la investigación. Para ello, hemos tomado una data que es común para todos los resultados del diseño.

Tabla 13

Diseño factorial respecto a pesos de cabeza, concentrados y relave del mineral (yacimiento Alpayana)

DATOS PARA EL ENSAYO										
Peso de mineral: 1709 g; % en peso: 30%					G.E: 3.25					
X1: pH: 8 – 10					Vol. De agua: 3987.66667 ml					
X2: Dosis de reactivo: Colector 30 – 50 g/Tm					Vol. De mineral: 525.846154 ml					
X3: Tiempo de flotación: 6 -12 min.					Vol. De pulpa: 4513.51282 ml					
pesos de cabeza, concentrado y relave										
N.º de prueba	pH	D. Colector	Tiempo	pH	D. Colector	Tiempo	Y	g de cab	g de conc	g de relave
PRUEBA 1	-	-	-	8	30	6	72.2	1709	83.96	1625.04
PRUEBA 2	+	-	-	10	30	6	70.1	1709	81.28	1627.72
PRUEBA 3	-	+	-	8	50	6	74	1709	87.92	1621.08
PRUEBA 4	+	+	-	10	50	6	75.6	1709	93.92	1615.08
PRUEBA 5	-	-	+	8	30	12	74.2	1709	93.2	1615.8
PRUEBA 6	+	-	+	10	30	12	75	1709	95.26	1613.74
PRUEBA 7	-	+	+	8	50	12	76.9	1709	101.45	1607.55
PRUEBA 8	+	+	+	10	50	12	76.7	1709	99.15	1609.85
PRUEBA 9	0	0	0	9	40	9	76.6	1709	99.86	1609.14
PRUEBA 10	0	0	0	9	40	9	76.4	1709	99.74	1609.26
PRUEBA 11	0	0	0	9	40	9	76.5	1709	99.91	1609.09

Nota: Elaboración propia

Tabla 14

Diseño factorial respecto al análisis químico de la cabeza del mineral (yacimiento Alpayana)

DATOS PARA EL ENSAYO											
Peso de mineral: 1709 g; % en peso: 30%						G.E: 3.25					
X1: pH: 8 – 10						Vol. De agua: 3987.66667 ml					
X2: Dosis de reactivo: Colector 30 – 50 g/Tm						Vol. De mineral: 525.846154 ml					
X3: Tiempo de flotación: 6 -12 min.						Vol. De pulpa: 4513.51282 ml					
análisis químico de la cabeza											
Nº de prueba	pH	D. Colector	Tiempo	pH	D. Colector	Tiempo	Y	%Cu	%Pb	%Zn	ppm Ag
PRUEBA 1	-	-	-	8	30	6	72.2	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 2	+	-	-	10	30	6	70.1	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 3	-	+	-	8	50	6	74	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 4	+	+	-	10	50	6	75.6	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 5	-	-	+	8	30	12	74.2	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 6	+	-	+	10	30	12	75	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 7	-	+	+	8	50	12	76.9	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 8	+	+	+	10	50	12	76.7	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 9	0	0	0	9	40	9	76.6	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 10	0	0	0	9	40	9	76.4	0.33	0.28	1.9	34.76
PRUEBA 11	0	0	0	9	40	9	76.5	0.33	0.28	1.9	34.76

Nota: Elaboración propia

Tabla 15

Diseño factorial respecto al análisis del contenido metálico de cabeza del mineral (yacimiento Alpayana)

DATOS PARA EL ENSAYO									
Peso de mineral: 1709 g; % en peso: 30%					G.E: 3.25				
X1: pH: 8 – 10					Vol. De agua: 3987.66667 ml				
X2: Dosis de reactivo: Colector 30 – 50 g/Tm					Vol. De mineral: 525.846154 ml				
X3: Tiempo de flotación: 6 -12 min.					Vol. De pulpa: 4513.51282 ml				
contenidos metálicos de la cabeza									
D. Colector	Tiempo	pH	D. Colector	Tiempo	Y	g Cu	g Pb	g Zn	mg Ag
-	-	8	30	6	72.2	5.64	4.79	32.47	59.4
-	-	10	30	6	70.1	5.64	4.79	32.47	59.4
+	-	8	50	6	74	5.64	4.79	32.47	59.4
+	-	10	50	6	75.6	5.64	4.79	32.47	59.4
-	+	8	30	12	74.2	5.64	4.79	32.47	59.4
-	+	10	30	12	75	5.64	4.79	32.47	59.4
+	+	8	50	12	76.9	5.64	4.79	32.47	59.4
+	+	10	50	12	76.7	5.64	4.79	32.47	59.4
0	0	9	40	9	76.6	5.64	4.79	32.47	59.4
0	0	9	40	9	76.4	5.64	4.79	32.47	59.4
0	0	9	40	9	76.5	5.64	4.79	32.47	59.4

Nota: Elaboración propia

Tabla 16

Diseño factorial respecto al análisis químico del concentrado del mineral (yacimiento Alpayana)

DATOS PARA EL ENSAYO											
Peso de mineral: 1709 g; % en peso: 30%						G.E: 3.25					
X1: pH: 8 – 10						Vol. De agua: 3987.66667 ml					
X2: Dosis de reactivo: Colector 30 – 50 g/Tm						Vol. De mineral: 525.846154 ml					
X3: Tiempo de flotación: 6 -12 min.						Vol. De pulpa: 4513.51282 ml					
análisis químico del concentrado											
N.º de prueba	pH	D. Colector	Tiempo	pH	D. Colector	Tiempo	Y	%Cu	%Pb	%Zn	ppm Ag
PRUEBA 1	-	-	-	8	30	6	72.2	4.76	4.1	25.56	510.84
PRUEBA 2	+	-	-	10	30	6	70.1	4.29	4.06	24.49	512.32
PRUEBA 3	-	+	-	8	50	6	74	4.57	4.08	26.59	500
PRUEBA 4	+	+	-	10	50	6	75.6	4.51	3.87	25.38	478.18
PRUEBA 5	-	-	+	8	30	12	74.2	4.48	3.8	24.56	472.94
PRUEBA 6	+	-	+	10	30	12	75	4.52	3.77	25.33	467.7
PRUEBA 7	-	+	+	8	50	12	76.9	4.61	3.73	25.36	450.3
PRUEBA 8	+	+	+	10	50	12	76.7	4.58	3.69	24.56	459.54
PRUEBA 9	0	0	0	9	40	9	76.6	4.55	3.63	24.56	455.68
PRUEBA 10	0	0	0	9	40	9	76.4	4.37	3.56	24.03	455.05
PRUEBA 11	0	0	0	9	40	9	76.5	4.36	3.57	24.02	454.85

Nota: Elaboración propia

Tabla 17

Diseño factorial respecto al análisis del contenido metálico del concentrado del mineral (yacimiento Alpayana)

DATOS PARA EL ENSAYO											
Peso de mineral: 1709 g; % en peso: 30%						G.E: 3.25					
X1: pH: 8 – 10						Vol. De agua: 3987.66667 ml					
X2: Dosis de reactivo: Colector 30 – 50 g/Tm						Vol. De mineral: 525.846154 ml					
X3: Tiempo de flotación: 6 -12 min.						Vol. De pulpa: 4513.51282 ml					
contenido metálico del concentrado											
N.º de prueba	pH	D. Colector	Tiempo	pH	D. Colector	Tiempo	Y	g Cu	g Pb	g Zn	mg Ag
PRUEBA 1	-	-	-	8	30	6	72.2	4	3.45	21.46	42.89
PRUEBA 2	+	-	-	10	30	6	70.1	3.49	3.3	19.9	41.64
PRUEBA 3	-	+	-	8	50	6	74	4.02	3.59	23.38	43.96
PRUEBA 4	+	+	-	10	50	6	75.6	4.24	3.64	23.83	44.91
PRUEBA 5	-	-	+	8	30	12	74.2	4.17	3.54	22.89	44.08
PRUEBA 6	+	-	+	10	30	12	75	4.31	3.59	24.13	44.55
PRUEBA 7	-	+	+	8	50	12	76.9	4.68	3.64	24.94	45.68
PRUEBA 8	+	+	+	10	50	12	76.7	4.54	3.66	24.35	45.56
PRUEBA 9	0	0	0	9	40	9	76.6	4.38	3.66	24	45.5
PRUEBA 10	0	0	0	9	40	9	76.4	4.35	3.56	23.96	45.39
PRUEBA 11	0	0	0	9	40	9	76.5	4.36	3.56	24	45.44

Nota: Elaboración propia

Tabla 18

Diseño factorial respecto al análisis químico del relave del mineral (yacimiento Alpayana)

DATOS PARA EL ENSAYO											
Peso de mineral: 1709 g; % en peso: 30%						G.E: 3.25					
X1: pH: 8 – 10						Vol. De agua: 3987.66667 ml					
X2: Dosis de reactivo: Colector 30 – 50 g/Tm						Vol. De mineral: 525.846154 ml					
X3: Tiempo de flotación: 6 -12 min.						Vol. De pulpa: 4513.51282 ml					
análisis químico del relave											
N.º de prueba	pH	D. Colector	Tiempo	pH	D. Colector	Tiempo	Y	%Cu	%Pb	%Zn	ppm Ag
PRUEBA 1	-	-	-	8	30	6	72.2	0.68	4.1	0.68	10.16
PRUEBA 2	+	-	-	10	30	6	70.1	0.77	4.06	0.77	10.91
PRUEBA 3	-	+	-	8	50	6	74	0.56	4.08	0.56	9.53
PRUEBA 4	+	+	-	10	50	6	75.6	0.53	3.87	0.53	8.97
PRUEBA 5	-	-	+	8	30	12	74.2	0.59	3.8	0.59	9.49
PRUEBA 6	+	-	+	10	30	12	75	0.52	3.77	0.52	9.2
PRUEBA 7	-	+	+	8	50	12	76.9	0.47	3.63	0.47	8.54
PRUEBA 8	+	+	+	10	50	12	76.7	0.5	3.69	0.5	8.6
PRUEBA 9	0	0	0	9	40	9	76.6	0.52	3.66	0.52	8.64
PRUEBA 10	0	0	0	9	40	9	76.4	0.53	3.56	0.53	8.71
PRUEBA 11	0	0	0	9	40	9	76.5	0.53	3.57	0.53	8.68

Nota: Elaboración propia

Tabla 19

Diseño factorial respecto al análisis del contenido metálico del relave del mineral (yacimiento Alpayana)

DATOS PARA EL ENSAYO											
Peso de mineral: 1709 g; % en peso: 30%						G.E: 3.25					
X1: pH: 8 – 10						Vol. De agua: 3987.66667 ml					
X2: Dosis de reactivo: Colector 30 – 50 g/Tm						Vol. De mineral: 525.846154 ml					
X3: Tiempo de flotación: 6 -12 min.						Vol. De pulpa: 4513.51282 ml					
contenido metálico del relave											
N.º de prueba	pH	D. Colector	Tiempo	pH	D. Colector	Tiempo	Y	g Cu	g Pb	g Zn	mg Ag
PRUEBA 1	-	-	-	8	30	6	72.2	11.01	1.34	11.01	16.51
PRUEBA 2	+	-	-	10	30	6	70.1	12.57	1.48	12.57	17.76
PRUEBA 3	-	+	-	8	50	6	74	9.09	1.2	9.09	15.45
PRUEBA 4	+	+	-	10	50	6	75.6	8.64	1.15	8.64	14.49
PRUEBA 5	-	-	+	8	30	12	74.2	9.58	1.24	9.58	15.33
PRUEBA 6	+	-	+	10	30	12	75	8.35	1.2	8.35	14.85
PRUEBA 7	-	+	+	8	50	12	76.9	7.53	1.1	7.53	13.72
PRUEBA 8	+	+	+	10	50	12	76.7	8.12	1.16	8.12	13.84
PRUEBA 9	0	0	0	9	40	9	76.6	8.44	1.13	8.44	13.9
PRUEBA 10	0	0	0	9	40	9	76.4	8.51	1.23	8.51	14.02
PRUEBA 11	0	0	0	9	40	9	76.5	8.47	1.22	8.47	13.96

Nota: Elaboración propia

Tabla 20

Diseño factorial respecto al análisis químico de las recuperaciones del mineral (yacimiento Alpayana)

DATOS PARA EL ENSAYO											
Peso de mineral: 1709 g; % en peso: 30%						G.E: 3.25					
X1: pH: 8 – 10						Vol. De agua: 3987.66667 ml					
X2: Dosis de reactivo: Colector 30 – 50 g/Tm						Vol. De mineral: 525.846154 ml					
X3: Tiempo de flotación: 6 -12 min.						Vol. De pulpa: 4513.51282 ml					
Recuperaciones											
N.º de prueba	pH	D. Colector	Tiempo	pH	D. Colector	Tiempo	Y	%R de Cu	%R de Pb	%R de Zn	%R de Ag
PRUEBA 1	-	-	-	8	30	6	72.2	70.9	72	66.1	72.2
PRUEBA 2	+	-	-	10	30	6	70.1	61.9	69	61.3	70.1
PRUEBA 3	-	+	-	8	50	6	74	71.2	75	72	74
PRUEBA 4	+	+	-	10	50	6	75.6	75.1	76	73.4	75.6
PRUEBA 5	-	-	+	8	30	12	74.2	74	76	74.3	74.2
PRUEBA 6	+	-	+	10	30	12	75	76.4	75	74.5	76
PRUEBA 7	-	+	+	8	50	12	76.9	83	75	76	76.9
PRUEBA 8	+	+	+	10	50	12	76.7	80.5	75	75	76.7
PRUEBA 9	0	0	0	9	40	9	76.6	77	75	73	76.6
PRUEBA 10	0	0	0	9	40	9	76.4	77.2	74.3	73.8	76.4
PRUEBA 11	0	0	0	9	40	9	76.5	77.3	74.5	73.9	76.5

Nota: Elaboración propia

5.3. Evaluación estadística de las pruebas de laboratorio

Se realizaron un total de 11 pruebas experimentales siguiendo un diseño factorial, variando los factores de pH, dosificación de colector (MT-6100) y tiempo de flotación. La variable de respuesta principal fue la recuperación de plata (%Re-Ag).

Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) y modelo de regresión para determinar la significancia estadística de los factores y sus interacciones. Los resultados del software MINITAB 18 mostraron lo siguiente:

Tabla 21

Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		74.927	0.443	169.21	0	
pH	0.025	0.012	0.519	0.02	0.981	1
Colector	2.925	1.462	0.519	2.82	0.026	1
Tiempo	2.725	1.363	0.519	2.62	0.034	1

Nota: Elaboración propia

El Valor P es la medida principal de significancia estadística. Con valores P de 0.26 y 0.034, el colector y el tiempo de flotación son los factores más influyentes en el proceso. Por otro lado, un valor P de 0.981 para el pH indica que, de forma independiente, este factor no tiene un efecto lineal significativo en la recuperación.

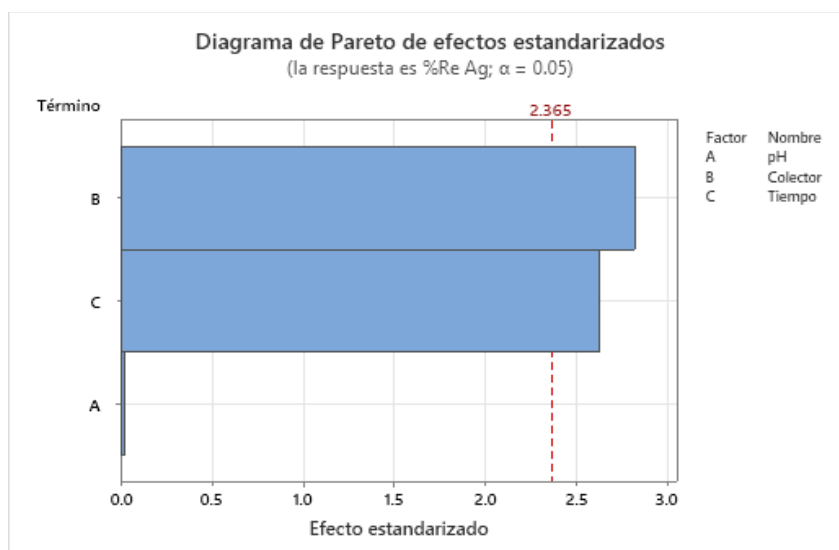
Ecuación de Regresión:

La ecuación que permite predecir la recuperación de plata (%Re Ag) en función de los factores es:

$$\%Re\ Ag = 74.927 + 2.925\ Colector + 2.725\ Tiempo + 0.025\ pH$$

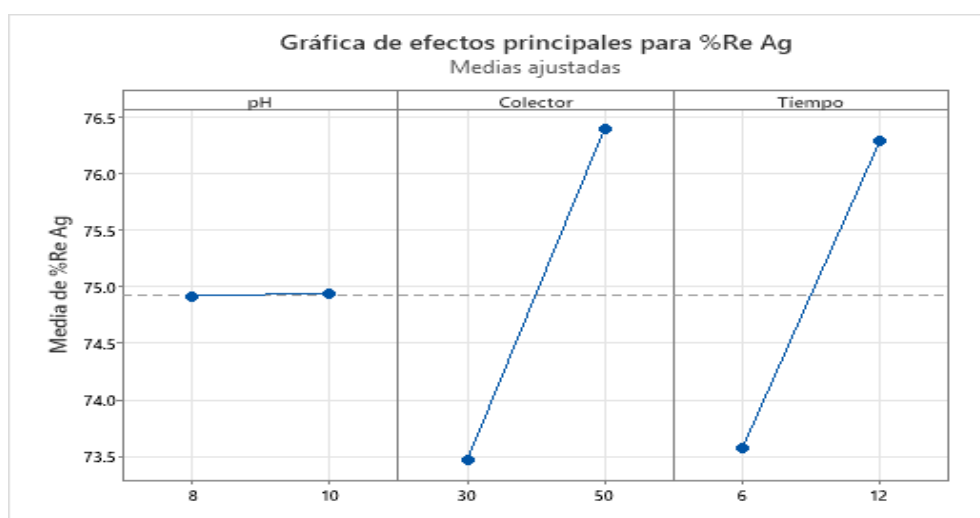
Esta ecuación valida que los coeficientes del colector y el tiempo son los de mayor magnitud, lo que confirma su influencia en la variable de respuesta.

Figura 17
Diagrama de Pareto



Nota: Elaboración propia

Figura 18
Gráfica de efectos principales



Nota: Elaboración propia

Las gráficas de efectos principales refuerzan el análisis estadístico:

La línea del colector muestra una pendiente ascendente pronunciada, indicando que, a mayor dosificación, mayor es la recuperación.

De manera similar, la línea del tiempo también tiene una pendiente ascendente, mostrando una relación positiva.

La línea del pH es casi horizontal, confirmando su falta de efecto lineal en el rango evaluado.

5.4. Discusión de hipótesis

En el presente trabajo, se presentaron de acuerdo con la Matriz de consistencia, 4 hipótesis con sus respectivas problemáticas ubicados durante el proyecto, en este sentido; se realizará el análisis de cada una de ellas.

5.3.1 Respecto a la hipótesis general

Se aplicó un diseño factorial 2^3 para estudiar el efecto combinado de tres reactivos (xantato, espumante y depresor) en la recuperación metalúrgica de plata en un mineral polimetálico complejo.

Resultados: La combinación óptima de reactivos incrementó la recuperación de plata de un 74% a un 76.9% aproximadamente. El diseño experimental permitió identificar interacciones significativas entre los reactivos.

Conclusión general: El uso de metodologías estadísticas en la evaluación de reactivos mejora sustancialmente la eficiencia de flotación, y permite reducir pruebas empíricas aisladas.

Hernández, J. & Petricca, F. (2021), de la Universidad de Concepción, Chile. Optimizó la recuperación de metales preciosos, principalmente plata y plomo, mediante el uso de diseños experimentales factoriales aplicados a la selección y dosificación de colectores y espumantes. Logrando la recuperación de plata de un 62% a un 78%, que nos hace pensar que estamos en la ratio.

5.3.2 Respecto a las hipótesis específicas

"El colector MT-6100 logro mayor recuperación de plata en el tratamiento de minerales del yacimiento".

La hipótesis propuesta se sustenta en la premisa de que la selección de reactivos de flotación debe estar directamente relacionada con las características mineralógicas del yacimiento. En el caso del yacimiento polimetálico de Alpayana, donde predominan sulfuros complejos de plomo, zinc y plata (como galena, esfalerita y sulfosales argentíferas), se requiere un enfoque diferenciado y específico para maximizar la recuperación metalúrgica de la plata.

Según Hernández y Petricca (2021), el uso de colectores especializados como los tiocarbamatos (similares al MT-6100) mejora la recuperación de plata en sulfuros complejos debido a su mayor afinidad con especies argentíferas. Estos colectores muestran selectividad sobre la esfalerita cuando se usan en conjunto con depresores de zinc como el sulfato de zinc plus, que actúa evitando la activación secundaria de la esfalerita y favorece la flotación preferencial de la galena y minerales portadores de plata.

"Las variables operativas pH y tiempo influyen significativamente en la recuperación y ley del concentrado de plata."

La hipótesis se fundamenta en estudios que evidencian cómo el pH del medio y el tiempo de flotación afectan de manera directa los mecanismos fisicoquímicos involucrados en la separación selectiva de minerales valiosos, como la plata, frente a la ganga o minerales no deseados. El pH es importante en su funcionalidad con respecto al medio aportando a la no degradación de los reactivos.

En el proceso de flotación de minerales polimetálicos, el pH regula la especiación de los iones metálicos en solución, la adsorción de colectores sobre la superficie mineral, y la selectividad entre sulfuros. Según Muñoz y González (2020), trabajar en un rango de pH ligeramente alcalino (9–10,5) favorece la flotación de galena y sulfuros de plata, al mismo tiempo que deprime la esfalerita, especialmente cuando se utiliza sulfato de zinc como depresor. En nuestro caso utilizamos pH dentro del rango de 8 a 10, lo que se demuestra alta recuperación de plata.

En cuanto al tiempo de flotación, investigaciones como la de Campos et al. (2021) destacan que tiempos insuficientes no permiten la captura eficiente de partículas finas y valiosas, mientras que tiempos excesivos pueden provocar arrastres de ganga o recirculación de partículas previamente flotadas. En su estudio, optimizaron el tiempo de flotación para una celda Denver y encontraron un punto ideal de 9 minutos para lograr la máxima recuperación sin sacrificar la ley del concentrado. En nuestro caso el tiempo de flotación fluctúa entre 09 a 14 minutos.

"La adecuada dosificación y combinación de reactivos incrementan la recuperación de Ag, corroborado por el software MINITAB a través de un modelo matemático predictivo."

La hipótesis se basa en la premisa de que una correcta dosificación de reactivos —colector MT-6100, es fundamental para alcanzar niveles óptimos de recuperación, siempre que dicha

optimización sea realizada de manera sistemática utilizando herramientas estadísticas como MINITAB.

La flotación de minerales polimetálicos requiere un balance preciso entre reactivos para lograr la selectividad deseada. El colector MT-6100, perteneciente a la familia de tiocarbamatos, ha demostrado alta afinidad por sulfuros de plata y plomo. Sin embargo, su eficacia depende de su concentración relativa frente a los depresores y espumantes. Torres y Márquez (2020) evidenciaron que una sobredosificación de colectores puede reducir la ley del concentrado por arrastre de ganga, mientras que una subdosificación disminuye la recuperación.

La aplicación de MINITAB y métodos como el diseño de superficie de respuesta (RSM) o los diseños factoriales permiten modelar estas interacciones entre reactivos. Rodríguez y Sánchez (2022) aplicaron esta técnica para determinar las dosis ideales de reactivos y lograron incrementar la recuperación de plata en un 70 % a 74% y la ley en un 34.7 % validando la utilidad del software para procesos de optimización química en planta.

CONCLUSIONES

El uso de metodologías estadísticas en la evaluación de reactivos mejora sustancialmente la eficiencia de flotación, y permite reducir pruebas empíricas aisladas. La dosificación optimizada de reactivos mejora la recuperación de plata y se observa que en las pruebas con recuperación de plata superior al 76% (hasta 76.90%), también se alcanzan altos valores en la recuperación de Pb ($\geq 76\%$) y Cu ($\geq 77\%$), lo que indica un efecto positivo de la combinación de reactivos aplicados.

Los resultados experimentales evidencian que el uso de MT -6100 (colector especializado para sulfuros de plata), permite alcanzar recuperaciones de plata superiores al 75% en la mayoría de las pruebas, siendo el valor máximo registrado 76.90%. Este comportamiento confirma que la selección de reactivos en función de la mineralogía del yacimiento polimetálico —donde la plata se encuentra asociada mayormente a sulfuros de plomo y sulfosales— es una estrategia efectiva para potenciar la recuperación metalúrgica. Por tanto, se valida la hipótesis planteada, ya que la aplicación de este reactivo, alineada con el conocimiento mineralógico del yacimiento de Alpayana, aumenta significativamente la recuperación de plata, en comparación con condiciones no optimizadas. Este resultado destaca la importancia del enfoque técnico en la selección de reactivos, más allá de criterios generales o empíricos.

Los resultados muestran variaciones en la recuperación de plata entre 70.10% y 76.90%, lo cual refleja una influencia directa de las condiciones operativas, específicamente la dosificación del colector y el tiempo de flotación, sobre el rendimiento del proceso.

Se observa que las menores recuperaciones de plata (70.10% y 72.20%) coinciden con condiciones que no fueron óptimas en cuanto a pH usado frecuentemente en 8 o con tiempos de flotación insuficientes de 8 minutos. Por el contrario, las recuperaciones más altas ($\geq 76.9\%$) están asociadas a pruebas donde es probable que el tiempo de flotación y la dosificación del reactivo

hayan sido ajustados adecuadamente para favorecer la flotación de minerales portadores de plata (como galena y sulfosales).

Estos resultados confirman la hipótesis planteada, ya que se evidencia que las variables operativas pH y tiempo influyen significativamente en la eficiencia metalúrgica, tanto en la recuperación como en la ley del concentrado de plata. El control riguroso de estas variables permite optimizar la acción de los reactivos y mejorar la selectividad del proceso, lo que se traduce en mayores recuperaciones y concentrados de mejor calidad.

Los datos experimentales muestran que la recuperación de plata alcanzó valores de hasta 76.90%, superando el umbral del 75% en 8 de 11 pruebas, lo que valida que la combinación de los reactivos con el propuesto en la investigación el MT-6100 . Estas condiciones reflejan una mejora significativa frente a las pruebas iniciales, donde la recuperación era de solo 70.10%–72.20%, lo cual indica una dosificación no optimizada.

Por lo tanto, se confirma la hipótesis, ya que la aplicación adecuada y combinada de estos reactivos, posiblemente guiada por herramientas como MINITAB, permitió mejorar la eficiencia del proceso, elevando tanto la recuperación. Este resultado resalta la importancia de optimizar los parámetros operativos y las dosis de reactivos con base en metodologías estadísticas, más allá de simples ajustes empíricos. De acuerdo con el modelo matemático es el siguiente:

$$\%Re\ Ag = 74.927 + 2.925\ Colector + 2.725\ Tiempo + 0.025\ pH$$

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la empresa Alpayana aplicar diseños experimentales sistemáticos (como el método de superficie de respuesta en MINITAB) para ajustar de forma precisa la dosificación de reactivos MT-6100. Esto permitirá maximizar simultáneamente la recuperación y la ley del concentrado de plata.

Asegurar que la selección de reactivos se base en un análisis mineralógico detallado del yacimiento, priorizando colectores específicos para sulfuros de plata y plomo, y depresores selectivos que controlen la flotación no deseada de otros sulfuros como la esfalerita.

Controlar rigurosamente las variables operativas críticas como el pH, el tiempo de flotación y dosificación de reactivos, manteniéndolos dentro de los rangos óptimos (pH 8–10 y tiempos entre 8–14 minutos), ya que se ha demostrado que estas condiciones influyen directamente en la recuperación y calidad del concentrado.

Implementar monitoreos y ajustes en planta piloto o planta industrial basados en las condiciones óptimas identificadas en los ensayos de laboratorio, con el objetivo de validar los resultados obtenidos a escala y mejorar la eficiencia operativa de forma continua.

Se recomienda implementar un estudio de geoestadística aplicada para modelar la variabilidad espacial de las leyes de plata en el yacimiento Alpayana. Este enfoque facilitará la caracterización de zonas mineralógicas, permitiendo que la planta anticipe cambios en la alimentación del mineral. Al integrar esta técnica con los parámetros metalúrgicos establecidos, se logrará un control de procesos dinámico y preventivo. Esto permitirá ajustar la dosificación de los colectores MT-6100 y MT-342 según el bloque de extracción específico. Finalmente, dicha integración garantizará una recuperación máxima, estable y eficiente de la plata a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ávila Huaranga, L. (2019). Evaluación de flotación a nivel de planta con colectores secundarios para mejorar la recuperación de plata en la Unidad Minera Recuperada – Huachocolpa – Huancavelica – 2019 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Ballester, A. (2014). Principios de metalurgia extractiva. Madrid: Síntesis.
- Bravo, A. (2004). Manual de flotación de minerales. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Campos, R., Vega, L., & Ortiz, J. (2021). Optimización del tiempo de flotación en celdas Denver para minerales polimetálicos. *Revista de Metalurgia Aplicada*, 56(3), 45–59.
- Castro, S. (2012). Fundamentos de flotación de minerales. Santiago: Universidad de Chile.
- Eulate, J. (2012). Mejoramiento de la recuperación de plata de los minerales de mina Poopó [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Oruro].
- Finch, J. A., & Dobby, G. S. (1990). Column flotation. Pergamon Press.
- Fuerstenau, D. W. (2007). Principles of flotation. SME.
- Fuerstenau, D. W., & Han, K. N. (2003). Principles of mineral processing. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Gaudin, A. M. (1957). Flotation. McGraw-Hill.
- García, P., López, R., & Salazar, M. (2021). Influencia del sulfato de zinc en la flotación diferencial de sulfuros. *Boletín Técnico Minero*, 48(2), 33–47.
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (2.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.

- Hernández, J., & Petricca, F. (2021). Optimization of reagents in the flotation of complex sulphide ores through experimental design techniques. Universidad de Concepción.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Huaraca, R., & Pérez, J. (2019). Optimización del proceso de flotación de galena en la Planta Concentradora Santander mediante la metodología de superficie de respuesta y el método Taguchi [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- Kemp, A. (2018). Análisis crítico de las eficiencias de pulpa y espuma en experimentos de flotación a escala de laboratorio. Universidad de Chile.
- López, M., & Gonzáles, A. (2014). Validez y confiabilidad en estudios experimentales. *Revista de Ciencias Sociales Aplicadas*, 22(1), 15–28.
- Montgomery, D. (2017). Design and analysis of experiments (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Muñoz, C., & González, H. (2020). Efecto del pH en la flotación selectiva de sulfuros. *Minería y Desarrollo*, 39(4), 77–90.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Orihuela, M. (2010). Investigación metalúrgica aplicada a sulfuros complejos. Lima: UNMSM.
- Rodríguez, V., & Sánchez, T. (2022). Optimización de reactivos en flotación mediante diseño de superficie de respuesta. *Journal of Mining Processes*, 61(2), 102–118.

- Salager, J. L., & Forgiarini, A. (2007). Surfactants in flotation: A critical review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 311(1–3), 1–12.
- Sutulov, A. (1963). *Flotación de minerales*. Santiago de Chile: Ediciones Universitarias.
- Torres, L., & Márquez, D. (2020). Evaluación de colectores tiocarbamatos en la flotación de sulfuros de plomo-plata. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 40(2), 95–108.
- Valencia, F., & Vergara, A. (2019). *Concentración de oro mediante flotación en columna* [Tesis de licenciatura, Universidad del Azuay].
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Zúñiga, C. (2018). *Obtención de un concentrado final de plata a partir de un mineral polimetálico Pb-Ag-Zn-Au contaminado con cemento mediante métodos de cinética de flotación y diseño experimental* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Zhao, Y., Li, J., & Chen, K. (2022). Effect of polyglycol-type frothers on silver recovery in fine-grained ores. *International Journal of Mineral Processing*, 174, 1–12.

ANEXOS

Anexos 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA: EVALUACION DE REACTIVOS DE FLOTACIÓN POR DISEÑO EXPERIMENTAL PARA INCREMENTAR LA RECUPERACION DE PLATA DEL YACIMIENTO DE ALPAYANA UBICADO EN HUAROCHIRI – LIMA

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables	Metodología
¿Cómo influye la evaluación de reactivos de flotación mediante diseño experimental en la recuperación de plata del yacimiento de Alpayana?	Evaluar el desempeño de reactivos de flotación mediante diseño experimental para incrementar la recuperación de plata en Alpayana.	La evaluación sistemática de los reactivos de flotación mediante diseño experimental mejora significativamente la recuperación de plata.	Dependiente: Recuperación de plata Dimensión: Porcentaje	Método de investigación: Inductivo y Aplicada Tipo de Investigación: Aplicada
Problemas Específicos ¿Como influye la variación en la dosificación del colector 6100 en la recuperación de plata según la mineralogía del yacimiento?	Objetivos Específicos Determinar la influencia en la variación de la dosificación del colector 6100 para las características mineralógicas del yacimiento	Hipótesis Especificas El colector MT-6100 Influye directamente en la recuperación de plata del mineral del yacimiento	Independiente: pH Tiempo Dosificación	Nivel de Investigación: Explicativa Diseño de Investigación: Cuantitativo experimental Población: Los minerales del Yacimiento Alpayana
¿Cuál es el efecto de las variables operativas sobre la eficiencia de flotación?	Determinar el efecto de las variables: pH, tiempo, para mejorar la eficiencia del proceso de flotación.	Las variables operativas pH y tiempo influyen significativamente en la recuperación y ley del concentrado de plata.	Dimensiones: Ácido/básico Minutos	Tamaño de Muestra: Se selecciona 40 kg al azar y por conveniencia
¿Cómo optimizar la dosificación de reactivos para incrementar la recuperación y ley del concentrado?	Optimizar la dosificación de los reactivos MT6100, Sulfato de Zn plus, MT342 para incrementar la recuperación y ley del concentrado de plata.	La adecuada dosificación y combinación de reactivos incrementan la recuperación de Ag, corroborado por el software MINITAB a través de un modelo matemático predictivo.	Concentración Intervinientes: Granulometría Porcentaje de sólidos	Técnicas: Flotación batch Análisis químico, Estadística Instrumentos: Celda Denver, ICP Balanza, Software estadístico

Nota: Elaboración propia con base a la estructura de la tesis

Anexos 2

Informe de ensayo Certimin



Página 1 de 3

INFORME DE ENSAYO
N° NOV5010.R24
 06-Nov-2024

INFORME DE ENSAYO
N° NOV5010.R24

Solicitante :	Mireya Brigitte Ucsa Villafuerte
Dirección :	Av.El Derby 055 , Torre 3 , Piso 4, Surco, Lima
Solicitado por :	Mireya Brigitte Ucsa Villafuerte
Referencia :	COT. SM 0223 00 22/CERTIMIN
Proyecto / Prospecto :	-
Tipo(s) de Muestra(s) :	Metalúrgicas
Estado de la Muestra :	Se recibieron muestras de tipo pulpa en sobre de papel
Número de muestras :	11
Fecha de Recepción :	Sábado, 26 de Octubre de 2024
Lugar de Recepción :	S.J. de Miraflores, Lima
Fecha de Ejecución de Ensayo :	2024-10-26 al 2024-11-06
Fecha de reporte :	Miércoles, 06 de Noviembre de 2024

Los resultados corresponden al ensayo solicitado en la(s) muestra(s) recibida(s)

Los ensayos han sido realizados en:

CERTIMIN S.A.
 Av. Las Vegas 845.
 San Juan de Miraflores - Lima.
 Perú.
 Teléfonos: (51-1) 205-5858.
 Fax: (51-1) 205-5858.
 Correo Electronico: certimin@certimin.pe

SANTOS OROYA ROJAS
Gerente de Laboratorios

Lima, 06 de Noviembre de 2024



INFORME DE ENSAYO
N° NOV5010.R24
06-Nov-2024

RESULTADOS

Análisis químico de la vahoza	
%Cu	0.33
%Pb	0.28
%Zn	1.9
ppm Ag	34.76

Análisis químico Concentrado, %				
Item	%Cu	%Pb	%Zn	ppm Ag
1	4.76242452	4.10	25.5636576	510.84
2	4.29485112	4.06	24.4882415	512.32
3	4.56722545	4.08	26.5916089	500
4	4.50965918	3.87	25.3769547	478.18
5	4.47783445	3.80	24.5620772	472.94
6	4.52307342	3.76743383	25.3261254	467.7
7	4.61410923	3.6319896	24.581629	450.3
8	4.57886678	3.69205069	24.5619619	459.54
9	4.34866642	3.66102606	24.0622786	455.68
10	4.36532153	3.56478086	24.0268012	455.05
11	4.36335381	3.56813519	24.0173471	454.85

Análisis químico relativo, %				
Item	%Cu	%Pb	%Zn	ppm Ag
1	0.67737848	4.10	0.67737848	10.1625491
2	0.77201843	4.06	0.77201843	10.9122438
3	0.56085297	4.08	0.56085297	9.52775337
4	0.53478956	3.87	0.53478956	8.97464496
5	0.59283016	3.80	0.59283016	9.48536725
6	0.51712499	3.76743383	0.51712499	9.20298213
7	0.46861781	3.6319896	0.46861781	8.53628591
8	0.50425514	3.69205069	0.50425514	8.59790042
9	0.52465658	3.66102606	0.52465658	8.63860864
10	0.52865204	3.56478086	0.52865204	8.71177786
11	0.52669138	3.56813519	0.52669138	8.67580408

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin autorización escrita de CERTIMIN S.A."
 "Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce".

Anexos 3

Preparación Mecánica



Anexos 4

Microscopia



Anexos 5

Cuarteado



Anexos 6

Sección de reactivos



Anexos 7
Área de Flotación

