



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

Relación de variables del proceso de flotación e influencia en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

Autores

Nick Steven Mendoza Mejia

Cain Isaias Albornoz Santamaria

Asesor

Dr. Joaquín José Abarca Rodríguez



JOAQUIN JOSE
ABARCA RODRIGUEZ
INGENIERO METALURGICO
Reg CIP N° 100833

Huacho - Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Nick Steven Mendoza Mejia	75928600	11 – 06 - 2026
Cain Isaias Albornoz Santamaria	76303721	11 – 06 - 2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Joaquín José Abarca Rodríguez	15740291	https://orcid.org/0000-0003-1004-3824
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Máximo Tomas Salcedo Meza	15602588	https://orcid.org/0000-0002-6190-3794
Víctor Raúl Coca Ramírez	15601160	https://orcid.org/0000-0002-2287-7060
Helen Analí Zapata Del Solar	44067559	https://orcid.org/0000-0002-5347-6155

2026-028291 Albornoza Santamaria 2026-028342 Men...

Relación de variables del proceso de flotación e influencia en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FIQyM - PREGRADO - 2026

Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Detalles del documento

Identificador de la entrega

tm:oid::1:3569177545

Fecha de entrega

13 may 2026, 4:14 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

13 may 2026, 4:19 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS_Mendoza_y_Albornoza.docx

Tamaño del archivo

3.2 MB

92 páginas

18.556 palabras

105.637 caracteres



Página 2 de 97 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega tm:oid::1:3569177545

10% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 9% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 5% 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 permitan 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.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a mis padres, Gelacio Albornoz y Gloria Angelica por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante durante mi formación académica y el desarrollo de este trabajo de investigación. Albornoz

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por brindarme salud, fortaleza y perseverancia para culminar esta importante etapa de mi vida profesional.

De manera especial, la dedico a mi madre Rosario y a mi padre Sosimo, por su amor incondicional, sacrificio constante y apoyo permanente a lo largo de toda mi formación académica.

Asimismo, dedico este trabajo a mis hermanos Billy, Ladhy y Nikolas, y a mi familia en general, quienes, con su comprensión, palabras de aliento y motivación constante fueron un pilar fundamental para alcanzar este gran logro.

Mendoza

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, por su orientación, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de esta investigación, así como a los docentes de la carrera de Ingeniería Metalúrgica por su contribución a mi formación profesional. Albornos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, por su orientación, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Agradezco también a los docentes de la carrera profesional, quienes con sus conocimientos y enseñanzas contribuyeron de manera significativa a mi formación académica y profesional.

De igual manera, agradezco a mi familia en general por el respaldo, apoyo moral y confianza brindados durante toda mi etapa universitaria, así como a mis compañeros y amigos, por el compañerismo y apoyo constante.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, hicieron posible la culminación de esta tesis. Mendoza.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTO	6
ÍNDICE GENERAL	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS	11
ANEXOS	12
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	17
1.2 Formulación del Problema.....	19
1.2.1 Problema General.....	19
1.2.2 Problemas Específicos.	19
1.3 Objetivos de la Investigación.....	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivo Especifico.....	19
1.4 Justificación de la Investigación	20
1.5 Delimitación del Estudio.....	21
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	23
2.1. Antecedentes de la investigación	23
2.1.1. Investigación internacional.	23

2.1.2. Investigación nacional.	24
2.2. Bases teóricas.	27
2.2.1. Fundamentos de la flotación de minerales.....	27
2.2.2. Variables del proceso de flotación y su interacción.....	28
2.2.3. Calidad del concentrado de plata	40
2.2.4. Planta Concentradora Mahuara (unidad minera chanca)– Panorama técnico	43
2.3. Bases filosóficas.....	45
2.4. Definiciones conceptuales.	47
2.5. Hipótesis de la investigación.	49
2.5.1. Hipótesis general.....	49
2.5.2. Hipótesis específicas.	49
2.6. Operacionalización de variables e indicadores.	50
CAPITULO III METODOLOGÍA	51
3.1. Diseño metodológico.	51
3.2. Población y muestra.....	52
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	52
3.4. Técnicas para el procesamiento de la información.	53
CAPITULO IV RESULTADOS.....	55
4.1. Análisis de resultados	55
4.1.1. Recopilación de datos	55
4.1.2. Resultados.	61
4.2. Contratación de hipótesis.....	66
4.2.1. Contrastación de hipótesis general.....	66

4.2.2. Contratación de hipótesis específicas.....	67
CAPITULO V DISCUSIÓN.....	70
5.1. Discusión de resultados.....	70
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
6.1. Conclusiones.	72
6.2. Recomendaciones.	73
CAPÍTULO VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
7.1. Referencias bibliográficas.....	74
ANEXOS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Influencia del pH en la ley de la plata en el concentrado	32
Figura 2	Influencia del pH en la recuperación de la plata en el concentrado	32
Figura 3	Calidad de concentrado de plata en relación de sulfurizante y metabisulfito de sodio .	63
Figura 4	Recuperación de plata en relación a la liberación %-200m y densidad de pulpa.....	64
Figura 5	Recuperación de plata en relación de MIBC y mezcla de Z-11 + Z-6.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Variables del proceso de flotación en minerales de plata 1	29
Tabla 2	Variables del proceso de flotación en minerales de plata 2	30
Tabla 3	Densidad de pulpa en la flotación de minerales	37
Tabla 4	Tipo de reactivo en la flotación de minerales de plata	40
Tabla 5	Ley de plata en el concentrado y su recuperación	43
Tabla 6	Operacionalización de las variables e indicadores	50
Tabla 7	Leyes de cabeza parámetro de control liberación y densidad de pulpa 1	55
Tabla 8	Datos de ley de cabeza, liberación, sulfurizante, depresor y promotor 2	56
Tabla 9	Datos activadores, depresore, espumantes y colectores 1	57
Tabla 10	Datos activadores, depresore, espumantes y colectores 2	58
Tabla 11	Datos de ley de concentrado, relave y recuperación de plata 1	59
Tabla 12	Datos de leyes concentrado, relave y recuperación de plata 2.....	60
Tabla 13	Descripción de la variable independiente en la flotación de minerales de plata	61
Tabla 14	Descripción de las leyes de plata y oro en los tres puntos cabeza, concentrado y relave	62
Tabla 16	Efecto de las variables en la calidad del concentrado de plata g/t Ag	66
Tabla 17	Análisis de la influencia del sulfurizante y depresor en la ley de plata en el concentrado	67
Tabla 18	Análisis del efecto de la densidad de pulpa y liberación en la recuperación de plata ..	68
Tabla 19	Análisis de la Recuperación de plata en el concentrado	69

ANEXOS

Anexo 1 localización.....	88
Anexo 2 Matriz de consistencia.....	89
Anexo 3 Flujo de mineral y leyes de cabeza.....	90
Anexo 4 Leyes y recuperación de plata	90
Anexo 5 Variación de la ley de plata en cabeza	91
Anexo 6 Variación de ley de concentrado de plata.....	91
Anexo 7 Variación de la recuperación de plata	92
Anexo 8 Variación de la ley de plata en el relave.....	92

RESUMEN

El propósito de este estudio fue entender cómo la conexión entre las variables operativas y de dosificación de reactivos afecta la calidad del concentrado de plata (g/t Ag) y la recuperación de plata (%Recup Ag) en el proceso de flotación de la Planta Mahuara (2025). El estudio es una investigación aplicada, cuantitativa y de alcance explicativo, desarrollada con datos operacionales ($N \approx 60$) y analizada mediante estadística inferencial, principalmente ANOVA, para contrastar hipótesis sobre el efecto de granulometría, densidad de pulpa y reactivos. Los resultados muestran que, para la calidad del concentrado de plata, las leyes de cabeza fueron los predictores más influyentes: El efecto presentado por Cab Ag fue altamente significativo ($p < 0,001$), al igual que el de Cab Au, que también lo fue ($p = 0,01$). Entre los reactivos evaluados, Z-11 mostró un efecto marginal ($p = 0,05$), mientras que MIBC, A-3418, A-208 y Z-11 + Z-6 (3:1) no fueron significativos ($p > 0,05$). Para la recuperación de plata, la granulometría %-200 m y la densidad de pulpa no mostraron un efecto significativo ($p = 0,23$ y $p = 0,41$), respectivamente. Sin embargo, el colector Z-11 + Z-6 (3:1) tuvo un efecto altamente significativo sobre %Recup Ag ($p < 0,001$) y el espumante MIBC también influyó ($p = 0,04$). Adicionalmente, el análisis realizado reveló que el agente sulfurizante Na_2S exhibió una influencia significativa ($p = 0,037$), mientras que el metabisulfito no mostró dicha influencia ($p = 0,597$). Concluye que la calidad depende de la cabeza y la recuperación depende de reactivos, especialmente del colector, del espumante y del Na_2S .

Palabras claves: Flotación de plata, reactivos de flotación, recuperación metalúrgica, calidad del concentrado.

ABSTRACT

The purpose of this study was to understand how the connection between operational and reagent dosage variables affects the quality of silver concentrate (g/t Ag) and silver recovery (%Ag recup) in the flotation process at the Mahuara Plant (2025). The study is an applied, quantitative, and explanatory investigation, developed with operational data (N = 60) and analyzed using inferential statistics, mainly ANOVA, to test hypotheses about the effect of particle size, pulp density, and reagents. The results show that, for silver concentrate quality, head grades were the most influential predictors: The effect presented by Cab Ag was highly significant ($p < 0.001$), as was that of Cab Au ($p = 0.01$). Among the reagents evaluated, Z-11 showed a marginal effect ($p = 0.05$), while MIBC, A-3418, A-208, and Z-11 + Z-6 (3:1) were not significant ($p > 0.05$). For silver recovery, the %-200 m particle size and pulp density did not show a significant effect ($p = 0.23$ and $p = 0.41$), respectively. However, the Z-11 + Z-6 (3:1) collector had a highly significant effect on %Ag recup ($p < 0.001$) and the MIBC frother also had an influence ($p = 0.04$). Additionally, the analysis revealed that the sulfurizing agent Na_2S exhibited a significant influence ($p = 0.037$), while metabisulfite did not show such an influence ($p = 0.597$). It concludes that quality depends on the head and recovery depends on reagents, especially the collector, the frother, and Na_2S .

Key words: Silver flotation, flotation reagents, metallurgical recovery, concentrate quality.

INTRODUCCIÓN

La flotación por espuma constituye la operación central para concentrar minerales de plata en plantas polimetálicas, donde la Ag rara vez se presenta como fase pura y, con frecuencia, se encuentra asociada a sulfuros de Pb–Zn–Cu y/o finamente diseminada. En este contexto, la recuperación y la ley del concentrado de plata dependen de la interacción entre las propiedades mineralógicas (liberación, oxidación superficial, asociaciones) y el control del circuito (dosificación de reactivos, densidad de pulpa, granulometría, aireación y tiempos de acondicionamiento). Por ello, es importante tener en cuenta que pequeñas variaciones operacionales pueden traducirse en pérdidas en relaves, en una disminución de la calidad del producto y en penalidades económicas, por lo que es fundamental prestar atención a estos aspectos para evitar tales consecuencias.

En la planta Mahuara, la variabilidad de la alimentación y los ajustes diarios de operación hacen necesario comprender qué variables influyen realmente en el desempeño metalúrgico del circuito, especialmente en dos indicadores clave: la calidad del concentrado (g/t Ag) y la recuperación de plata (%Recup Ag). En la realidad, se suele relacionar los cambios en recuperación y ley con varios factores a la vez; pero, sin datos estadísticos, es complicado dar prioridad a las acciones de control, mejorar el consumo de reactivos o establecer puntos de control robustos. El problema de investigación que surge de ahí es el siguiente: identificar, con base en datos reales, qué variables explican significativamente el rendimiento del proceso.

El objetivo de la presente investigación es evaluar la relación entre las variables operativas y de reactivos del circuito de flotación y su efecto sobre la calidad y la recuperación de la plata en 2025. Se analizan factores relacionados con la condición física de la pulpa (granulometría, %-200 m y densidad de pulpa) y con la química de la flotación (agentes sulfurizantes, depresores, paquete

colector-espumante), así como la influencia de las leyes de cabeza (Ag y Au) como condicionantes del potencial metalúrgico del sistema. Este enfoque permite contrastar hipótesis y distinguir entre variables críticas y variables cuyo efecto no puede demostrarse dentro del rango operativo estudiado.

Metodológicamente, desarrollamos el trabajo bajo un enfoque cuantitativo, aplicado, empleando una base de datos operacional con múltiples observaciones de cabeza–concentrado–relave y dosificación de reactivos. El análisis se basa en estadística inferencial (principalmente ANOVA) para determinar la significancia y sustentar las decisiones técnicas. Los hallazgos esperados aportan criterios para el control del proceso, la optimización de reactivos y la mejora de la estabilidad metalúrgica, contribuyendo así a elevar el rendimiento económico del circuito y a reducir pérdidas de plata en relaves, lo cual es una situación favorable para todas las partes involucradas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática.

La problemática que se aborda en esta investigación se centra en la influencia que tienen las variables del proceso de flotación en la calidad del concentrado de plata, específicamente en la Planta Mahuara en 2025. A nivel global, la minería del cobre y la plata representa una parte significativa de la economía, con la necesidad constante de optimizar procesos para maximizar la recuperación de estos metales. En este contexto, el proceso de flotación se presenta como una técnica clave para separar valiosos minerales de los residuos no deseados a través de la manipulación precisa de diferentes variables operativas.

Desde una perspectiva regional, se ha documentado que el pH y la dosificación de colectores son fundamentales para adaptar las características de superficie de los minerales, tocando directamente en la recuperación y calidad del concentrado de plata. Kong et al. (2025) destacan la relevancia del pH en las características fisicoquímicas que afectan la flotación de minerales de plata, donde un control inadecuado puede llevar a contaminantes indeseados y reducir la ley del concentrado (Ojeda-Villegas & Uribe Salas, 2023). Asimismo, el impacto del pH sobre la adsorción de colectores ha sido examinado, mostrando que la interferencia de contaminantes como calcio y magnesio en las aguas de flotación puede desestabilizar la calidad del proceso, lo cual se aborda en investigaciones recientes (Ojeda-Villegas & Uribe Salas, 2023). Esta problemática también ha sido confirmada en las experiencias relatadas por Iriarte et al., quienes enfatizan que diversas características mineralógicas afectan la flotación y, por ende, la recuperación de metales preciosos (Iriarte et al., 2022).

A nivel local, se ha identificado que la optimización de la granulometría de alimentación y la densidad de pulpa impactan significativamente en el rendimiento del proceso de flotación, lo que se traduce en variaciones en la recuperación de plata. Un estudio relevante indica que variaciones en la distribución de tamaño de partículas pueden influir en la eficiencia del proceso, dado que un tamaño óptimo favorece el contacto entre las burbujas de aire y los minerales, mejorando la recuperación (Reyes et al., 2020). Además, los trabajos de investigación sobre la flotación sin colector resaltan cómo la modificación de la tensión superficial dentro de la pulpa afecta la flotabilidad natural de los minerales presentes (Reyes et al., 2021).

El presente estudio también contempla la evaluación del espumante en el proceso de flotación y su influencia en la presencia de contaminantes metálicos en el concentrado final de plata. Existen indicios en la literatura que sugieren que la toxicidad de algunos contaminantes puede ser exacerbada por la acción de los espumantes, lo que complica aún más la calidad del concentrado obtenido (Reyes et al., 2021). Esta relación se complementa con la evidencia de que el uso de colectores específicos puede alterar la interacción entre los minerales y los contaminantes en presencia, resaltando la necesidad de investigar a fondo estas interacciones.

La importancia de esta investigación radica en la identificación de las variables que afectan la calidad del concentrado de plata, lo que no solo beneficia a la operación de la Planta Mahuara, sino que también contribuye al desarrollo sostenido de la minería en la región. Una mejor comprensión de estas relaciones ayudará a reducir el impacto ambiental y a maximizar las ganancias económicas al mejorar la eficiencia de los procesos de flotación.

1.2 Formulación del Problema.

1.2.1 Problema General.

¿De qué manera la relación de variables del proceso de flotación influye en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025?

1.2.2 Problemas Específicos.

¿Cómo la dosificación de sulfurizante y depresor influye en la ley del concentrado de plata obtenido en la Planta Mahuara?

¿En qué medida la granulometría de alimentación y la densidad de pulpa afecta a la recuperación de plata en el circuito de flotación?

¿Será posible que el colector y el espumante en la flotación influye en la recuperación de plata en el concentrado final?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General.

Explicar de qué manera la relación de variables del proceso de flotación influye en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025

1.3.2 Objetivo Especifico

Determinar cómo la dosificación de sulfurizante e depresor influye en la ley del concentrado de plata obtenido en la Planta Mahuara.

Analizar cómo la granulometría de alimentación y la densidad de pulpa afecta a la recuperación de plata en el circuito de flotación.

Evaluar como el colector y espumante en la flotación influye en la recuperación de la plata en el concentrado final.

1.4 Justificación de la Investigación

Justificación Teórica: La flotación constituye la principal ruta de concentración para minerales argentíferos sulfurados. La literatura describe la influencia individual de parámetros como pH, Eh, dosificación de colectores/espumantes, granulometría y aireación; sin embargo, son escasos los estudios in-situ, a escala industrial, que integren simultáneamente estas variables y correlacionen su sinergia con la ley y recuperación de plata. Esta tesis llenará ese vacío al generar modelos predictivos y coeficientes de interacción basados en datos reales de la Planta Mahuara, fortaleciendo el marco teórico de la flotación de plata.

Justificación Metodológica: El estudio aplicará un diseño factorial robusto y sistemático que incluye métodos estadísticos avanzados como análisis factorial y ANOVA, permitiendo determinar la significancia estadística e interacción entre las variables estudiadas. Esto garantiza resultados replicables y verificables, fortaleciendo la fiabilidad y validez interna del estudio y permitiendo establecer procedimientos estandarizados para futuras investigaciones relacionadas con flotación de plata.

Justificación Práctica: Identificar claramente cómo las variables del proceso afectan la calidad del concentrado permitirá implementar mejoras operativas concretas en la Planta Mahuara. Esto contribuirá directamente al incremento de la eficiencia en la recuperación de plata, optimizando el consumo de reactivos y recursos energéticos, así como reduciendo pérdidas de mineral valioso en los relaves.

Justificación Social: Mejorar la eficiencia del proceso de flotación en la Planta Mahuara tendrá implicaciones positivas en la estabilidad laboral y económica de la comunidad local, generando mayores ingresos para la empresa y, por consiguiente, mayores beneficios económicos indirectos para la región, fortaleciendo las oportunidades de empleo y desarrollo social.

Justificación Ambiental: Optimizar las condiciones del proceso permite reducir significativamente el consumo excesivo de reactivos químicos y recursos naturales como el agua, minimizando así la generación de residuos y vertimientos al medio ambiente. De esta forma, se contribuye con el cumplimiento de normativas ambientales vigentes y se promueve la sostenibilidad y responsabilidad ambiental del sector minero-metalúrgico.

Justificación Económica: Desde el punto de vista económico, determinar con precisión la relación entre variables del proceso y la calidad del concentrado de plata permitirá reducir costos operativos mediante una gestión más eficiente de insumos. Esto aumentará la rentabilidad económica del proceso, favoreciendo la competitividad y viabilidad financiera de la Planta Mahuara en un contexto global altamente competitivo.

1.5 Delimitación del Estudio

La Planta Concentradora Mahuara, perteneciente a Minera Chancas, se ubica en la provincia de Oyón, departamento de Lima, en la sierra central del Perú. Está situada a una altitud promedio de 3,800 metros sobre el nivel del mar, en un entorno de topografía andina accidentada. El clima de la zona es frío y semihúmedo, con temperaturas que oscilan entre 0 °C y 18 °C; se presentan dos estaciones bien definidas: una estación seca (de mayo a octubre) y una estación de lluvias (de noviembre a abril). La humedad relativa promedio es de 60% a 80%, especialmente elevada durante la temporada de precipitaciones, lo que influye en las condiciones operativas, almacenamiento de reactivos y estabilidad de las instalaciones.

El área se encuentra dentro de una región ecorregional de puna húmeda, con vegetación típica de páramo y suelos sujetos a heladas nocturnas frecuentes. Estas condiciones climáticas requieren adaptaciones técnicas en el diseño y operación de la planta, especialmente en el control

de humedad en los circuitos de molienda y flotación, así como en la conservación de equipos y reactivos sensibles a la corrosión.

El estudio se realizará entre abril y julio de 2025 en la Planta Mahuara, periodo que coincide con la estación seca en Oyón, favoreciendo condiciones estables para el proceso de flotación. Durante estos cuatro meses, se recolectarán datos operativos cada 2 horas, incluyendo pH, densidad de pulpa, dosificación de reactivos y granulometría. Las muestras se analizarán para determinar su influencia en la calidad del concentrado de plata, garantizando precisión y continuidad en la recolección bajo condiciones climáticas óptimas.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Investigación internacional.

Ramírez-Rodríguez et al. (2024) llevó a cabo una investigación cuyo objetivo fue mejorar la recuperación de plata contenida en un residuo metalúrgico procedente de la refinación de zinc, compuesto principalmente por jarosita, anglesita y franklinita. El estudio fue publicado en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) y corresponde a una investigación experimental aplicada. La metodología consistió en aplicar una etapa de acondicionamiento sulfurizante usando gas H_2S obtenido biológicamente, seguido de flotación. Se caracterizó la superficie del residuo mediante potencial ζ , ángulo de contacto y espectroscopía FT-IR. Se observó que, tras la sulfurización, el ángulo de contacto aumentó significativamente, evidenciando mayor hidrofobicidad y una mayor estabilidad de la gota (9 minutos). Además, la intensidad de señales de sulfatos en los espectros FT-IR disminuyó. La microflotación en celda Partridge, optimizada mediante un diseño Box-Behnken, permitió alcanzar una recuperación de 68.94 % de plata, con condiciones óptimas de 2 horas de sulfurización, pH 7.89 y 9.3×10^{-4} mol/L de colector. El estudio validó la efectividad del pretratamiento sulfurizante para residuos complejos.

Zhang et al. (2024) desarrollaron un estudio con el objetivo de proporcionar una revisión técnica y actualizada sobre los avances en la flotación de minerales de plata, especialmente aquellos asociados a sulfuros de plomo y zinc. El trabajo fue publicado en la revista *Minerals Engineering* (ScienceDirect) y corresponde a una investigación de tipo documental y sistemática. Se analizó la naturaleza mineralógica y superficial de la plata, destacando que su recuperación

suele ser compleja debido a su asociación con minerales base. Tradicionalmente, la recuperación de plata se descuidaba al priorizar los metales principales. En esta revisión se detallan los mecanismos de flotación, el comportamiento de la plata en sistemas complejos y el papel de reactivos específicos. Además, se compararon procesos como flotación preferencial, flotación a granel de zinc y azufre, y flotación a granel de plomo y azufre. El estudio concluye que una comprensión integral de estos métodos permite optimizar la recuperación de plata refractaria, sirviendo como guía técnica para futuras mejoras en plantas de beneficio.

Ángeles et al. (2023) realizaron un estudio orientado a evaluar la eficiencia de la flotación iónica como alternativa innovadora para la recuperación de plata (I) desde soluciones acuosas, con especial atención al tratamiento de residuos metalúrgicos. La investigación fue publicada en la revista científica *Minerals* de MDPI, y corresponde a un estudio experimental aplicado, desarrollado en celdas subaereadas. El objetivo fue analizar el efecto de diversas variables fisicoquímicas, como las concentraciones de xantato, espumante y ditiofosfato, el pH, la velocidad superficial del gas (J_g), la fracción de retención gaseosa (E_g), el diámetro de burbuja (Db), y el tipo de generador de burbujas (sparger), sobre la recuperación de $Ag(I)$. Los mejores resultados se alcanzaron con un 93 % de recuperación a pH 8, utilizando un sparger rígido, [espumante] 1.25×10^{-4} M, y un J_l de 0.19 cm/s. También se logró 90.7 % con xantato 3.77×10^{-4} M y burbujas de 0.11 cm. Se concluye que el control combinado de parámetros hidrodinámicos y químicos mejora significativamente la flotación iónica de plata.

2.1.2. Investigación nacional.

García & López (2024) desarrollo su investigación con el objetivo principal de este estudio fue caracterizar relaves antiguos de plata de baja ley, provenientes de una antigua mina polimetálica ubicada en Cerro de Pasco, con la finalidad de diseñar un proceso eficiente para

recuperar la plata contenida. La investigación, se encuentra publicada en el *Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP)*, corresponde a un estudio aplicado de tipo experimental, desarrollado en laboratorio. Se recolectaron y analizaron 88 muestras de relaves mediante técnicas químicas y mineralógicas, encontrando un promedio de 148 ppm de plata, mayormente presente como plata nativa, acantita y asociada a pirita. Para la recuperación, se ensayó flotación por espuma utilizando colectores como ditiofosfato, xantato de butilo y otros, ajustando parámetros como pH (8.5), tamaño de partícula (63 μm), dosis de reactivos y tiempo (8 min). Bajo condiciones optimizadas, se logró una recuperación de plata del 84% con una ley de 1745 ppm. Finalmente, los relaves tratados mostraron comportamiento ambiental inerte según ensayos TCLP, confirmando su viabilidad técnica y ecológica.

Dulanto (2024) llevo a cabo un estudio con el propósito de evaluar la flotación de minerales sulfurados provenientes de relaves, enfocado en la recuperación de plata y oro. La investigación, es de tipo preexperimental y realizada a nivel laboratorio, y fue publicada en el *Repositorio Institucional de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión (UNJFSC)*. Para ello, se empleó un mineral con ley promedio de 2.447 oz/t Ag y 0.414 g/t Au, procesado a pH 7, densidad de pulpa de 1250 g/L y con 65.58 % pasante a la malla 200. Se evaluaron condiciones de molienda, acondicionamiento y flotación, tanto con agua recirculada ácida como con agua fresca. En el resultado de la prueba 5 con agua recirculada se alcanzó un concentrado de 22.72 oz/t Ag y 4.74 g/t Au. Mientras que, con agua fresca, la prueba 16 logró 8.73 oz/t Ag y 3.33 g/t Au, con recuperaciones del 56.53 % Ag y 30.61 % Au. Se concluyó que los reactivos MTB y MT-6200 influyen significativamente en la calidad del oro, según análisis estadístico ($p < 0.05$).

Linares (2024) realizó un estudio orientado a evaluar el impacto de reactivos alternativos en la flotación de minerales sulfurados de plata, provenientes de una mina de mediana escala

ubicada en Arequipa. El trabajo, es de tipo preexperimental, fue desarrollado en laboratorio metalúrgico y publicado en el *Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA)*. El objetivo fue comparar el desempeño de los colectores alternativos AR-G105 y AR-G315 (comercializados por RENASA), frente a reactivos convencionales como A3418 y E668, manteniendo constantes las condiciones de flotación (pH, granulometría, sólidos, tiempo de acondicionamiento y flotación), pero variando las dosis de los reactivos. Se evaluó la recuperación de plata, su velocidad de flotación y la selectividad frente a otros metales (Pb, Zn, Cu, Fe, As) y la ganga. A condiciones estándar, la recuperación no superó el 91%. Sin embargo, con los reactivos AR-G105 y AR-G315, se observó una mejora significativa en la recuperación y selectividad de plata, contribuyendo positivamente al rendimiento técnico y económico del proceso metalúrgico.

Sebastian & Aldave (2024) desarrollaron un estudio cuyo objetivo fue establecer el control estadístico en la flotación de minerales auríferos y de plata, y determinar los límites de control operacional en la planta concentradora de Beneficio Nueva Esperanza S. A. C. La investigación, es de tipo no experimental y transversal, se llevó a cabo directamente en la planta y se publicó en el repositorio institucional de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión (UNJFSC). Durante dos meses, se recogieron 61 datos en turnos rotativos y se evaluaron variables como la densidad de pulpa, el porcentaje pasante a malla 200, las leyes de cabeza, el concentrado y el relave de oro, plata y cobre. El procesamiento estadístico se realizó con los programas informáticos Excel y Minitab. Los resultados mostraron que la densidad de pulpa, el porcentaje de malla 200, la ley de cabeza de oro y la recuperación de este metal cumplen los criterios estadísticos (P_p y $P_{pk} > 1$). Sin embargo, las leyes de cabeza de plata y cobre, así como sus leyes en concentrado y relave, no las cumplieron (P_p y $P_{pk} < 1$). Se concluye que no todas las variables operacionales están bajo control, lo que evidencia oportunidades de mejora en la eficiencia del proceso.

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. Fundamentos de la flotación de minerales

La flotación de minerales es un proceso fisicoquímico de concentración selectiva basado en las diferencias de hidrofobicidad entre los minerales valiosos y los minerales de ganga. Este proceso es ampliamente utilizado en la industria minera para separar minerales metálicos y no metálicos, especialmente cuando se trata de minerales finamente diseminados o complejos. La flotación permite concentrar obtenciones de alta ley a partir de menas de baja ley, mejorando así la eficiencia del procesamiento metalúrgico.

Principios fisicoquímicos de la flotación. La flotación separa partículas según diferencias de mojabilidad creadas por la adsorción de colectores (p.ej., xantatos) sobre superficies minerales; la burbuja se adhiere a partículas hidrofóbicas, favoreciendo su transporte a la espuma. Variables pH/Eh, potencial de pulpa, carga superficial, tipo/dosis de colector y espumante con un control de la colisión-adhesión burbuja-partícula y la estabilidad de la espuma. En los textos y estudios modernos detallan estos fundamentos y muestran, por ejemplo, la sensibilidad de galena y esfalerita al pH y al tipo de colector (Fuerstenau et al., 2007; Wills & Napier-Munn, 2006).

Tipos de flotación: diferencial, selectiva, colectiva. Entre los tipos de flotación se tiene, Selectiva/diferencial: se flota un mineral a la vez (p.ej., $\text{Cu} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{Zn}$) regulando activadores/depresores y pH; es el esquema clásico para menas complejas Pb-Zn-Cu (Wills & Napier-Munn, 2006). Colectiva (bulk): se flotan juntos varios sulfuros valiosos (p.ej., $\text{Cu} + \text{Pb}$ o $\text{Pb} + \text{Zn}$) para luego re-flotar/separar; su elección depende de mineralogía y economía de fundición. Casos industriales muestran uso alternado de bulk y diferencial según la planta (Bulatovic, 2007).

Relevancia de la flotación en minerales argentíferos. La mayor parte de la plata se recupera como subproducto de depósitos polimetálicos (Pb-Zn-Cu). En estos, la flotación es el método principal de concentración de minerales portadores de Ag; se emplean esquemas selectivos o bulk según la distribución de la plata (en sulfuros base o en sulfosales) (Drif et al., 2018).

Composición típica de minerales de plata. Los portadores de Ag más comunes incluyen: plata nativa, acantita/argentita (Ag_2S), sulfosales como pyrargyrita (Ag_3SbS_3), proustita (Ag_3AsS_3) y stephanita (Ag_5SbS_4); además, tetraedrita-tennantita suele alojar plata, y en zonas oxidadas domina clorargirita (AgCl). Con frecuencia la Ag está isomórficamente incorporada en galena o esfalerita, afectando su flotabilidad y la estrategia (selectiva vs. bulk) (Diallo et al., 2021).

2.2.2. Variables del proceso de flotación y su interacción

Las variables en la flotación de plata incluyen: tamaño de partícula, pH, tipo/dosis de reactivos (colectores, espumantes, modificadores), potencial redox, tiempo de residencia y velocidad de agitación. Su interacción óptima maximiza la recuperación y selectividad del mineral argentífero (Castro & Laskowski, 2011).

Tabla 1*Variables del proceso de flotación en minerales de plata 1*

Variable	Descripción	Influencia principal	Interacciones clave	Referencia
pH del sistema	Controla la carga superficial de las partículas minerales y la estabilidad de especies metálicas en solución.	Influye en la adsorción de colectores y en la flotabilidad selectiva de la plata.	Interactúa con la dosificación de colectores, mineralogía y especies solubles.	(Fuerstenau et al., 2007; Özçelik & Ekmekçi, 2024)
Dosificación de colectores	Define la cantidad de reactivo que modifica la superficie mineral para volverla hidrofóbica.	Afecta la ley del concentrado y la recuperación de plata.	Depende del pH, tipo de mineral y tiempo de acondicionamiento.	(Wills & Finch, 2016)
Granulometría de alimentación	Tamaño de partícula con el que se alimenta la celda, relacionado a la liberación del mineral valioso.	Influye directamente en la recuperación y en el arrastre de ganga.	Interactúa con espumante, densidad y mineralogía.	(Castro & Laskowski, 2011; Taggart, 1927)
Densidad de pulpa	Porcentaje de sólidos suspendidos en la pulpa durante el proceso de flotación.	Modula el contacto entre partículas y burbujas, y la dispersión de reactivos.	Afecta la velocidad de agitación, tamaño de burbuja y rendimiento metalúrgico.	(Wills & Finch, 2016)
Espumante (tipo y dosis)	Reactivo que regula el tamaño, la movilidad y la estabilidad de las burbujas.	Incide en la estabilidad de la espuma y el arrastre de partículas finas.	Influye con la granulometría, agitación y densidad.	(Fuerstenau et al., 2007; Zhang et al., 2024)

Tabla 2*Variables del proceso de flotación en minerales de plata 2*

Variable	Descripción	Influencia principal	Interacciones clave	Referencia
Mineralogía	Composición y asociación de los minerales valiosos y de ganga.	Condiciona la flotabilidad de la plata y la respuesta al colector.	Se relaciona con la granulometría, pH y reactivos usados.	(Bulatovic, 2007; Wills & Finch, 2016)
Tiempo de acondicionamiento	Tiempo durante el cual los minerales están en contacto con los reactivos antes de la flotación.	Mejora la adsorción de colectores y la uniformidad del proceso.	Depende de la dosificación, pH y velocidad de agitación.	(Ángeles et al., 2023; Wills & Finch, 2016)
Tiempo de flotación	Tiempo total en que se desarrolla la separación del mineral valioso mediante burbujas.	Influye en la recuperación final y la ley del concentrado.	Se ajusta según tipo de mineral, espuma y agitación.	(Castro & Laskowski, 2011; Ramírez-Rodríguez et al., 2024)
Velocidad de agitación	Intensidad con que se agita la pulpa durante acondicionamiento y flotación.	Mejora el contacto entre partículas y burbujas, y dispersa reactivos.	Relacionada con densidad, tiempo de flotación y tipo de espumante.	(Wills & Finch, 2016)

2.2.2.1. pH de flotación de minerales de plata

El pH es una de las variables más influyentes en el proceso de flotación de minerales de plata, ya que controla tanto la química superficial de los minerales como la estabilidad de los reactivos utilizados. Su adecuado control permite optimizar la selectividad, mejorar la adsorción de colectores y evitar la formación de especies solubles no deseadas que dificulten la recuperación del metal valioso. En sistemas polimetálicos, como ocurre frecuentemente con minerales argentíferos, el pH también regula la interacción con otros sulfuros (como galena, esfalerita o pirita), afectando la ley y la calidad del concentrado final.

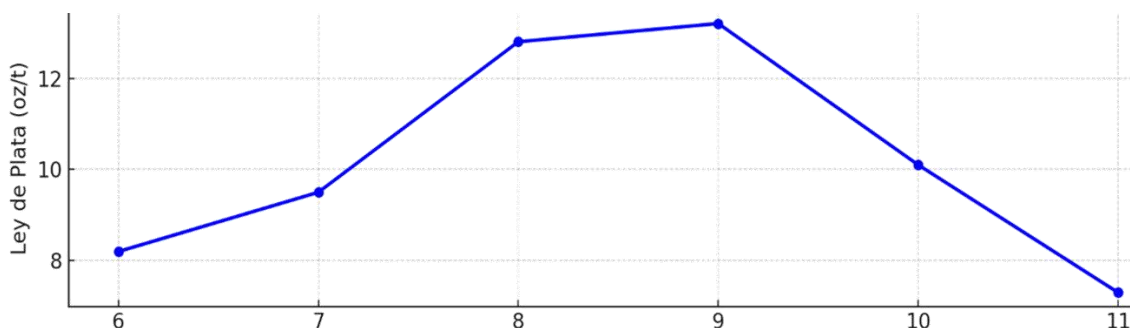
Efecto del pH sobre la carga superficial de los minerales. El pH del medio acuoso determina la carga superficial de los minerales a través de reacciones de hidrólisis y adsorción de iones H^+ y OH^- . En minerales como la acantita (Ag_2S), galena (PbS) o pirita (FeS_2), el punto isoeléctrico varía, y por ello la modulación del pH puede favorecer o dificultar la adsorción de reactivos colectores. A valores de pH ligeramente alcalinos (8–9), los sulfuros de plata tienden a adquirir una carga superficial negativa, lo cual mejora la atracción electrostática con colectores aniónicos como los xantatos o ditiofosfatos (Ozçelik & Ekmekçi, 2024). Sin embargo, valores muy altos de pH (>10) pueden provocar la formación de películas pasivadoras que inhiben la flotabilidad.

Influencia del pH en la adsorción de colectores. La eficacia de un colector en la flotación de plata depende en gran medida del pH. A pH neutro o levemente alcalino, los xantatos y ditiofosfatos presentan una mayor estabilidad en solución y se adsorben más eficientemente sobre la superficie del mineral. Esto genera una capa hidrofóbica que facilita la adherencia del mineral a las burbujas de aire. Por otro lado, un pH ácido puede favorecer la disolución de la superficie del mineral, disminuyendo su flotabilidad. Estudios en plantas piloto han demostrado que un pH de

entre 8.0 y 9.0 proporciona mejores recuperaciones de plata sin comprometer la selectividad frente a sulfuros de hierro (Wills & Finch, 2016).

Figura 1

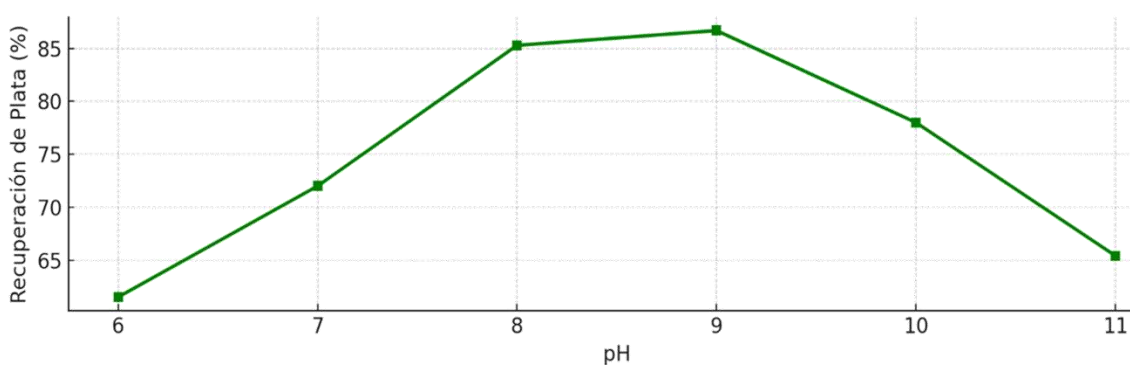
Influencia del pH en la ley de la plata en el concentrado



Para la ley de la plata en la figura 1 varía la ley del concentrado (oz/t Ag) en función del pH. Se observa que a pH entre 8.0 y 9.0 se alcanza la mayor concentración de plata en el concentrado, debido a una mejor selectividad frente a sulfuros de ganga.

Figura 2

Influencia del pH en la recuperación de la plata en el concentrado



En la figura 2 refleja la recuperación metalúrgica de plata (%), que también presenta un comportamiento óptimo en el rango de pH ligeramente alcalino (8.0 a 9.0), donde la flotabilidad y la hidrofobicidad de las partículas se maximizan.

Control de especies solubles (iones, precipitados). El pH también afecta la solubilidad de iones metálicos (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+}) y su posible precipitación como hidróxidos o complejos

que interactúan con los reactivos. En medio alcalino, por ejemplo, pueden precipitarse iones como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ o $\text{Zn}(\text{OH})_2$, los cuales interfieren con la acción de los colectores y contaminan la espuma. Del mismo modo, a valores de pH mal controlados se pueden formar especies coloidales que recubren la superficie de la plata, disminuyendo su respuesta al reactivo y provocando pérdidas metalúrgicas. El uso adecuado de reguladores de pH, como cal viva (CaO) o carbonato de sodio (Na_2CO_3), permite mantener el equilibrio químico del sistema y maximizar la flotación efectiva de la plata (Fuerstenau et al., 2007).

2.2.2.2. Dosificación de colectores

La dosificación de colectores en la flotación de minerales de plata es un aspecto crítico que influye en la eficacia del proceso de separación. Los colectores son sustancias químicas que se adhieren a las partículas minerales, aumentando así su hidrofobicidad y permitiendo que floten en la espuma. Para los minerales de plata, particularmente aquellos que se encuentran en formas complejas, como en el caso de sulfuros o en combinación con otros metales, el tipo y la cantidad de colector pueden determinar significativamente la recuperación del metal precioso.

Tipos de colectores utilizados en flotación de plata. Los colectores más comúnmente utilizados en la flotación de minerales de plata son los xantatos, tales como el xantato isopropílico de sodio (Z-11), que ha demostrado ser efectivo en la recuperación de plata de concentrados complejos (Azañero, 2015). La efectividad de estos colectores se debe a su capacidad para adsorberse en la superficie de los minerales de plata, lo que mejora su separación de los minerales no valiosos. En numerosas pruebas experimentales se ha comprobado que la variación en la dosificación de este colector impacta tanto la ley de concentrado como la recuperación global del metal (Reyes et al., 2021). Además, la interacción de estas sustancias con otros reactivos y la

influencia de las condiciones ambientales, como el pH del medio (Chen et al., 2020), es fundamental para optimizar el proceso de flotación.

Los minerales de plata, especialmente aquellos asociados a sulfuros, responden bien a colectores de tipo aniónico, siendo los más comunes. Xantatos (como el xantato de butilo o amilo)(Azañero, 2015; Wills & Finch, 2016): Son los más utilizados por su bajo costo y eficiencia sobre sulfuros de plata, galena y esfalerita. Ditiofosfatos y ditiofosfinatos, Ofrecen mejor selectividad, especialmente frente a piritita y sulfuros de hierro. También mejoran la recuperación en presencia de minerales complejos (cytec, 2007). Tionocarbamatos, usados para mejorar la recuperación en condiciones específicas donde los xantatos muestran baja eficiencia(Bulatovic, 2007). Colectores modificados (AR-G105, AR-G315) de uso reciente, mejoran la recuperación de plata como subproducto en concentrados de cobre o plomo.

Mecanismo de acción y selectividad. El mecanismo de acción de los colectores se basa en la modificación de las propiedades superficiales de los minerales, lo que incrementa su hidrofobicidad y propicia su flotación. La adsorción de colectores en la superficie de los minerales de plata crea una capa que impide la wettabilidad por agua, favoreciendo que pequeñas burbujas de aire se adhieran y, a su vez, arrastren los minerales hacia la superficie del concentrado de flotación (Reyes et al., 2021). La selectividad de los colectores hacia minerales específicos depende de múltiples factores como el pH del medio, la naturaleza química del mineral, y la naturaleza del colector mismo. Por ejemplo, se ha encontrado que el pH influye significativamente en la flotación sin colector de minerales de plata, evidenciando la importancia del control químico en la recuperación selectiva(Reyes et al., 2021).

Relación entre dosis, ley del concentrado y recuperación. Una dosificación adecuada del colector es esencial para alcanzar un balance entre alta recuperación y buena ley del concentrado.

Una dosis baja puede generar pérdidas de plata por flotabilidad insuficiente, mientras que un exceso puede provocar arrastre de ganga o flotación de sulfuros no deseados, reduciendo la ley del producto. Estudios en plantas y laboratorios han demostrado que dosis entre 60 a 100 g/t de colector (como xantato de butilo) permiten obtener leyes superiores a 1000 ppm de Ag con recuperaciones superiores al 80%, dependiendo de la mineralogía y del espumante empleado (García & Lopez, 2024; Sebastian & Aldave, 2024).

2.2.2.3. Granulometría de alimentación

La granulometría de alimentación, entendida como el tamaño de partícula con el que el mineral entra al proceso de flotación, es una variable crítica que influye directamente en la eficiencia de recuperación y en la calidad del concentrado. En el caso de minerales de plata, que comúnmente se encuentran finamente diseminados y asociados a sulfuros de plomo, zinc y hierro, un adecuado control del tamaño de partícula es esencial para lograr una buena liberación mineralógica sin caer en el exceso de finos, lo cual afectaría la flotabilidad y aumentaría el arrastre de ganga.

Influencia del tamaño de partícula en la cinética de flotación. El tamaño de partícula influye directamente en la cinética de flotación. Cuesta et al. reportaron que un tamaño de 84 μm logró 76.54 % de recuperación en minerales auríferos, destacando que partículas más grandes dificultan la flotación por falta de liberación adecuada durante la molienda (Cuesta et al., 2020). Partículas excesivamente finas pueden generar aglomeración y lodos, reduciendo la eficiencia de flotación. En minerales de plata, estudios indican que un tamaño óptimo de d_{80} entre 75 y 90 μm mejora la recuperación y la cinética del proceso, equilibrando liberación y flotabilidad (Wills & Finch, 2016).

Efectos sobre la selectividad y arrastre mecánico. La selectividad en la flotación se ve profundamente afectada por la granulometría. Moreno et al. discuten cómo el uso de depresores puede mejorar la selectividad, especialmente cuando se manipulan adecuadamente los tamaños de partícula. En la flotación de minerales mixtos, como la calcopirita y la molibdenita, el tamaño de las partículas y la selección de depresores son factores sinérgicos que determinan la eficiencia del proceso (Gallegos et al., 2025). Por otro lado, el arrastre mecánico se refiere a la capacidad de las partículas de ser transportadas junto con la espuma de flotación. Se ha demostrado que un tamaño de partícula inapropiado puede aumentar el arrastre de finos y reducir el rendimiento de recuperación de los minerales deseados.

Control de liberación mineralógica en la molienda. El control de la liberación mineralógica en la molienda es clave para optimizar la flotación de plata. Técnicas como difracción de rayos X y microscopía permiten identificar tamaños óptimos de liberación (Iriarte et al., 2022). Una liberación adecuada reduce la presencia de ganga y minerales detríticos que afectan la eficiencia y recuperación (Santamaría-Galvis et al., 2023). Además, la composición del mineral influye en la estrategia de molienda, siendo la dureza y plasticidad factores determinantes para ajustar el proceso (Iriarte et al., 2022). Estos elementos permiten mejorar el rendimiento metalúrgico en plantas industriales.

2.2.2.4. Densidad de pulpa.

La densidad de pulpa de mineral en la flotación de minerales de plata para optimizar el proceso se debe de tener en consideración una mayor densidad que permite mejorar la interacción entre partículas y burbujas, resultando una mejor recuperación de plata. Sin embargo, densidades excesivas pueden incrementar la viscosidad, afectando negativamente en la eficiencia de flotación (Reyes et al., 2018; Reyes et al., 2021). En estudios, se ha observado que la densidad de pulpa en

la flotación de minerales de plata influye en la dispersión de reactivos, estabilidad de espuma y eficiencia de recuperación, siendo óptima entre 25 % y 35 % sólidos (Fuerstenau et al., 2007).

Tabla 3
Densidad de pulpa en la flotación de minerales

Estudio	Mineral tratado	Densidad de pulpa (%)	Recuperación de plata o similar (%)	Observaciones
Du et al. (2021)	Relaves de zinc con plata	30 %	80 % Ag, 43 % Zn	Recuperación óptima en 30 % sólidos tras lixiviación y flotación (Du et al., 2021)
Runge et al. (2012, citado en Rhosonics 2023)	Flotación genérica de sulfuros	25–35 %	Mejora recuperación de fase espuma	Densidad óptima favorece estabilización de espuma (Rhosonics, 2023)
Dehghani (2022)	Circuito de flotación Red Dog	50 %	Máxima recuperación según sólido: muestra	Estrategias para optimizar recuperación en densidad altas (Dehghani, 2022).

Efecto sobre la dispersión de reactivos. El efecto sobre la dispersión de reactivos es importante, ya que la densidad de pulpa influye en la distribución de los reactivos en el medio de flotación. Una pulpa más densa puede dificultar la dispersión uniforme de colectores y espumantes, impidiendo la formación adecuada de la espuma necesaria para la separación efectiva de los minerales (Escalante & Lovera, 2023; Ojeda-villegas & Uribe-salas, 2023). Esto subraya la necesidad de ajustar la densidad para asegurar un óptimo rendimiento de los reactivos en el proceso de flotación (Martínez et al., 2020)(Rojo et al., 2020).

Impacto en la formación de espuma y contacto burbuja-mineral. El impacto en la formación de espuma y el contacto burbuja-mineral está vinculado a la interacción de los reactivos

de flotación y las características de la pulpa. Una densidad inadecuada puede alterar la estabilidad de la espuma, lo que a su vez afecta la eficacia de la separación de los minerales deseados, como la plata (Valderrama et al., 2024); (Reyes et al., 2021) . Estudios han demostrado que condiciones de pulpa correctamente ajustadas propician una mejor interacción burbuja-mineral, aumentando la recuperación de plata(Ordoñez & Alfaro, 2023).

Relación en la recuperación de la plata. La relación con la recuperación de la plata es evidente al analizar los datos de flotación. Estudios ilustran que un control adecuado de la densidad de pulpa permite mejorar significativamente la recuperación mediante un balance en la viscosidad y la efectividad de los reactivos(Castillo et al., 2022; Iriarte et al., 2022). La optimización de los parámetros operativos, incluidos la densidad de pulpa y la química involucrada, este se traduce en un aumento en la eficiencia de recuperación en el proceso minero (Santamaría-Galvis et al., 2023).

2.2.2.5. Tipo y dosificación de espumante

Los espumantes son compuestos orgánicos tensoactivos que se añaden a la pulpa de mineral para generar una fase espumosa estable y controlable. Su función principal es reducir la tensión superficial del agua en la interfaz aire-agua, permitiendo la formación de burbujas de aire finas y uniformes, y estabilizando estas burbujas para que puedan transportar adecuadamente las partículas hidrofóbicas (mineral valioso) hacia la superficie y formar una capa de espuma robusta (Wang et al., 2016; Wiese & Harris, 2012).

Existen varios tipos de espumantes, y su elección depende de factores como la mineralogía del mineral, el pH de la pulpa, la dureza del agua, la presencia de sales disueltas y los objetivos de recuperación y calidad del concentrado. Los espumantes más comunes en la flotación de minerales de plata, a menudo asociados con sulfuros, incluyen:

- **Alcoholes alifáticos (ej. metil isobutil carbinol - MIBC, dietilenglicol - DEG):** Son espumantes "débiles" o de "baja potencia" que producen espumas frágiles y de rápida ruptura, adecuadas para minerales que flotan rápidamente y cuando se requiere una alta selectividad. Son muy utilizados en la flotación de sulfuros (Kursun, 2017; Wang et al., 2016).
- **Poliglicoles (ej. polipropilenglicol - PPG):** Son espumantes más "fuertes" o de "alta potencia" que generan espumas más estables y tenaces, adecuados para minerales de flotación lenta o cuando se necesita una mayor capacidad de carga de sólidos en la espuma (Dey et al., 2014; Wang et al., 2016).
- **Éteres y ésteres:** También se utilizan, ofreciendo propiedades intermedias entre los alcoholes y los poliglicoles (Wang et al., 2016).
- **Mezclas de espumantes:** A menudo se utilizan combinaciones de diferentes tipos de espumantes para optimizar las propiedades de la espuma, aprovechando las ventajas de cada uno y compensando sus limitaciones (Wang et al., 2016).

La **dosificación** del espumante es crítica y se expresa en gramos por tonelada de mineral (g/t) o en partes por millón (ppm) en la pulpa. Una dosificación adecuada asegura una capa de espuma estable sin ser excesivamente rígida (Wiese & Harris, 2012).

- **Baja dosificación:** Puede resultar en una espuma insuficiente, frágil y de corta vida, lo que lleva a una baja recuperación del mineral valioso debido a que las burbujas no tienen la estabilidad necesaria para transportarlo (Khoshdast et al., 2023).
- **Alta dosificación:** Genera una espuma excesivamente tenaz y voluminosa, que puede atrapar partículas de ganga (mineral no deseado) y arrastrarlas al concentrado,

disminuyendo su calidad (Chique, 2020; Khoshdast et al., 2023). Además, puede dificultar el control del proceso y el flujo de la espuma, y aumentar el consumo de reactivos.

La dosificación óptima se determina experimentalmente en laboratorio (pruebas de flotación) y se ajusta en planta a través de la monitorización continua del rendimiento de la espuma (altura, textura, estabilidad y capacidad de carga) (Wiese & Harris, 2012).

Tabla 4

Tipo de reactivo en la flotación de minerales de plata

Tipo de espumante	Ejemplos	Rango típico de partida (g/t)	Comentarios de selección
Alcoholes ramificados	MIBC, isooctanol	20–50	Reducen tensión superficial, buen control de tamaño de burbuja hasta alcanzar CCC; selectividad razonable (Chegini et al., 2024; Drif et al., 2018).
Poliglicoles / éteres de polipropilenglicol	Dowfroth 200/250/400 series	10–30	“Más fuertes”: estabilizan espuma y reducen coalescencia a bajas dosis; usar menos que alcoholes (Drif et al., 2018).
Aceites de pino (terpénicos)	Pine oil	20–80	Espuma más “seca”, útil en circuitos con arcillas; menos predecible (Medeiros et al., 2014).

2.2.3. Calidad del concentrado de plata

La calidad del concentrado de plata se evalúa mediante parámetros metalúrgicos como ley, recuperación y pureza, los cuales determinan su viabilidad comercial y procesamiento posterior

(Wills & Finch, 2016). Estos aspectos están influenciados por la selectividad del proceso de flotación, la mineralogía del yacimiento y la presencia de impurezas metálicas, que pueden generar penalidades económicas significativas (Bulatovic, 2007). La optimización de estos factores requiere un balance entre recuperación y ley, así como el control de contaminantes mediante reactivos específicos y ajustes operativos (Gupta & Yan, 2016).

Parámetros de calidad (ley, recuperación, pureza). La calidad de un concentrado de plata en flotación se evalúa mediante tres parámetros clave: ley, recuperación y pureza. La ley (expresada en g/t o % Ag) determina el contenido metálico y su valor económico, donde concentrados con más de 1,000 g/t son considerados de alta calidad (Wills & Finch, 2016). La recuperación refleja la eficiencia del proceso, buscando maximizar la extracción de plata sin comprometer la ley (Gupta & Yan, 2016; Wills & Finch, 2016). Finalmente, la pureza indica la ausencia de impurezas que puedan afectar la refinación, siendo crucial para evitar penalidades comerciales (Reyes-Tagle & Guajardo, 2023).

Efecto de las impurezas metálicas (Pb, Zn, Fe, As, Cu). Las impurezas metálicas en los concentrados de plata, como Pb, Zn, Fe, As y Cu, impactan negativamente en la calidad y valor comercial. El plomo (Pb) puede ser beneficioso si forma parte de minerales como la argentita (Ag_2S), pero en exceso genera penalidades (Chegini et al., 2024). El zinc (Zn) interfiere en la flotación selectiva, reduciendo la eficiencia del proceso (Bulatovic, 2007). El hierro (Fe) aumenta los costos de refinación y puede requerir tratamientos adicionales (Wang et al., 2016). El arsénico (As) es altamente penalizado por su toxicidad y dificultades en el procesamiento (Zhao et al., 2021), mientras que el cobre (Cu) compite con la plata en la adsorción de reactivos, disminuyendo la selectividad (Panayotov & Panayotova, 2023).

Relevancia comercial de un concentrado de alta ley y bajo penalidades. Un concentrado de plata con alta ley ($>1,000$ g/t) y bajas penalidades por impurezas tiene mayor valor en el mercado, ya que reduce costos de transporte, fundición y refinación (Wills & Finch, 2016). Las penalidades por elementos como As, Sb y Bi disminuyen el precio final, ya que requieren procesos adicionales de purificación (Tianzu, 2024). Además, estándares internacionales, como los de la London Bullion Market Association (LBMA), exigen altos niveles de pureza para su comercialización, lo que refuerza la importancia de optimizar la flotación para obtener un producto competitivo (Zhang et al., 2024).

Tabla 5
Ley de plata en el concentrado y su recuperación

Estudio / Proyecto	Material	Esquema de prueba	Recuperación Ag (%)	Ley del concentrado (si reportan)	Comentarios claves
Zgounder (Marruecos)	Relaves antiguos con Ag	Flotación (abierto, optimizado)	83–84	1,745 g/t Ag	Mejoras con D ₉₀ 62–63 µm, pH 6–8, Bx + ditiotfosfato; CuSO ₄ 200 g/t óptimo (Drif et al., 2018).
Complejo Pb–Ag (China)	Mina Pb–Ag, baja ley, mixto óxido–sulfuro	Flotación (laboratorio e industrial, circuito cerrado)	87.8 (lab); 87.6 (industrial)	1,988 g/t Ag (ejemplo de etapa)	Aerophine 3418A selectivo; sulfidización + xantato/MIBC (Drif et al., 2018).
Cordero (México) – Discovery Silver	Sulfuros Ag–Pb–Zn	Locked-cycle (flotación diferencial Pb/Zn)	80–89	2,886–3,774 g/t Ag en conc. Pb	~90 % de la Ag va a conc. de Pb; mejores recuperaciones a P ₈₀ 175–200 µm (Singh et al., 2021).
Santa Ana (Colombia) – Outcrop	Vetas Ag–Au (alta ley)	Locked-cycle (flotación); y gravedad + flotación	92.9 (flotación); 96.3 (global)	hasta 9,488 g/t Ag (conc.)	Secuencia gravedad + flotación maximiza recuperación global. (Harris, 2024)
Gaspé Copper (Canadá) – Osisko Metals	Cu–Mo con crédito Ag	Locked-cycle (Cu–Mo bulk / separación)	71 (promedio)	120 g/t Ag (conc. Cu)	Circuito Cu–Mo convencional; Ag reporta mayoritariamente al conc. Cu (Osisko Metals, 2024).
Boumadine (Marruecos) – Aya Gold & Silver	Polimetálica Ag–Au–Pb–Zn	Flotación (fase I) + oxidación Albion + cianuración (fase II)	89 (total)	—	Fase I recupera parte de Ag; el resto se libera tras oxidación del conc. Pirítico (Aya Gold & Silver Inc, 2023).

2.2.4. Planta Concentradora Mahuara (unidad minera chanca)– Panorama técnico

La Planta Concentradora Mahuara es parte de la Unidad Minera Chanca y se dedica exclusivamente a la recuperación de metales preciosos (plata y oro) presentes en minerales de veta

y diseminados, mayormente asociados a sulfuros metálicos como pirita, galena y tetraedrita. La capacidad nominal de tratamiento es de 200 toneladas métricas secas por día (TMSD), operando en un esquema de flotación selectiva con enfoque en la maximización de la recuperación de Ag y Au.

Descripción del circuito de flotación. El circuito de flotación de la Planta Mahuara se basa en la recuperación conjunta de oro y plata en un concentrado bulk. El mineral, una vez triturado y molido, es acondicionado con cal para controlar el pH y con reactivos colectores de alta selectividad para metales preciosos, como ditiofosfatos y xantatos modificados. En la etapa rougher, el concentrado bulk se obtiene separando la ganga compuesta por cuarzo y carbonatos. Posteriormente, este concentrado pasa por dos o tres etapas de limpieza, cuyo objetivo es incrementar la ley y reducir impurezas metálicas como plomo, zinc y hierro. Finalmente, el concentrado limpio se espesa, filtra y despacha a fundición, mientras que el relave final se dispone en la relavera con tratamiento ambiental adecuado.

Equipos principales y flujograma del proceso. La planta cuenta con un sistema de chancado primario mediante trituradora de quijadas, seguido de molienda en molino de bolas operando en circuito cerrado con ciclones para alcanzar un D80 de aproximadamente 75 micras. El área de flotación está equipada con celdas mecánicas tipo Denver para la etapa rougher y celdas adicionales para las etapas de limpieza y relimpieza. El espesamiento de concentrados y relaves se realiza en espesadores de alta capacidad, mientras que la deshidratación del concentrado se lleva a cabo en filtros prensa, garantizando un producto con humedad reducida apto para transporte

Características del mineral tratado. Mineralogía principal: Pirita, galena argentífera, tetraedrita, electrum (Au–Ag), y ganga de cuarzo y calcita. Leyes promedio de cabeza: Plata (Ag): 160–280 g/t, Oro (Au): 15–26 g/t. Liberación óptima: Molienda a D80 de 75 μm garantiza una

adecuada liberación de Au y Ag. Asociación mineralógica: La plata se presenta mayormente como argentita y en solución sólida con galena y tetraedrita; el oro está presente como inclusiones finas en pirita y electrum.

Variables críticas operativas actuales. Las condiciones operativas actuales están ajustadas para maximizar la recuperación y selectividad de los metales preciosos. El pH de flotación bulk se mantiene en un rango de 8,5 a 9,0 mediante la adición de cal. Los colectores principales incluyen ditiofosfato (30–40 g/t), xantato isopropílico (20–25 g/t) y Aerophine (10–15 g/t), mientras que como espumante se emplea MIBC en dosis de 15–20 g/t. Se usan depresores como sulfato de zinc y bisulfito para minimizar la flotación de impurezas metálicas. El tiempo de residencia en la etapa rougher es de 10 a 12 minutos, complementado con dos a tres etapas de limpieza según la variabilidad del mineral. Con estas condiciones, la planta alcanza recuperaciones promedio de 85–88 % para la plata y 80–83 % para el oro.

2.3. Bases filosóficas.

La investigación se fundamenta filosóficamente en varios paradigmas que engloban la filosofía contemporánea y sus aportes al método científico, destacando la importancia del positivismo y del carácter crítico de la investigación científica en la comprensión de los fenómenos naturales y sociales.

Uno de los pilares fundamentales que se puede apreciar en la investigación es la corriente positivista, que aboga por la observación y la experiencia como fuentes del conocimiento. Según Pavajeau et al., esta corriente ha sido crucial en el desarrollo del conocimiento científico, proponiendo que las teorías deben ser probadas empíricamente y deben ser sometidas a una revisión crítica continua (Pavajeau et al., 2024). En el contexto de la flotación del mineral de plata, el uso de técnicas estadísticas y metodologías experimentales para evaluar la influencia de

variables como el pH y los reactivos químicos empleados en el proceso de flotación es vital para asegurar la calidad del concentrado.

Por otro lado, la investigación también se apoya en paradigmas críticos que buscan una visión holística de las relaciones entre variables. Este enfoque sugiere que la interacción entre el investigador y el fenómeno de estudio es recíproca y compleja, lo cual es relevante en el análisis de cómo diferentes factores influyen en la calidad del concentrado de plata. Aunque la relación entre el paradigma crítico y el contexto puede ser importante, no se encontró una referencia relevante que apoye este aspecto en el contexto específico de la flotación del mineral de plata y por tanto, eliminaré la cita (Rios et al., 2020).

A su vez, la incorporación de métodos estadísticos para el análisis, como se propone en el trabajo de Escobedo et al., permite optimizar la recuperación del concentrado mediante un enfoque experimental riguroso que implica el modelado de variables influyentes (Escobedo et al., 2023). Este enfoque es recomendado por la comunidad científica, ya que brinda una estructura que permite evaluar y validar los resultados obtenidos en un entorno controlado. La capacidad de ajustar las variables del proceso de flotación para maximizar la calidad del concentrado es, por lo tanto, una aplicación práctica del conocimiento científico y filosófico contemporáneo.

Finalmente, un aspecto ético que vale la pena considerar es la responsabilidad en la investigación. La integridad en la investigación y la ética juegan un rol fundamental en la validez de los resultados. Siguiendo las especificaciones de la ética de la investigación, en este estudio se debe tener un compromiso de transparencia y rigor, asegurando así que los resultados no solo sean representativos, sino que también contribuyan de manera significativa al avance del conocimiento en el campo de la minería y metalurgia (Espinoza & Alger, 2020).

2.4. Definiciones conceptuales.

- a. **Flotación:** Proceso fisicoquímico que permite la separación de minerales a partir de su adhesión a burbujas de aire, impulsando su recuperación en el concentrado. Este proceso es crítico para la extracción selectiva de plata (Valverde et al., 2024).
- b. **Concentrado de plata:** Producto resultante de la flotación que contiene una alta ley de plata, obtenido mediante la separación de minerales valiosos de la ganga. Su calidad depende directamente de las condiciones del proceso de flotación (Flores-Campos et al., 2024).
- c. **pH en flotación:** El control del pH influye significativamente en la ionización de los reactivos y, por ende, en la eficiencia de la flotación. Valores óptimos pueden incrementar la recuperación de metales como la plata (Kamran et al., 2024).
- d. **Colectores de flotación:** Sustancias químicas que se adsorben en la superficie de los minerales, mejorando su adhesión a las burbujas de aire. La dosificación adecuada de colectores es fundamental para maximizar la ley del concentrado (Geng et al., 2024).
- e. **Granulometría de alimentación:** Se refiere al tamaño de las partículas de mineral en la mezcla alimentada a la celda de flotación. Una granulometría adecuada puede sustancialmente afectar la recuperación de plata (Zhang & Chen, 2021).
- f. **Densidad de pulpa:** Relación de sólidos a líquidos en la suspensión utilizada en la flotación. Una densidad óptima es crítica para asegurar una mejor separación y recuperación de la plata del mineral tratado (Geng et al., 2024).
- g. **Espumante:** Adyuvante que se utiliza en el proceso de flotación para estabilizar las burbujas de aire, permitiendo la concentración efectiva de metales en el concentrado. La

elección del espumante es vital para evitar la contaminación del concentrado (Štirbanović et al., 2022).

- h. **Recuperación de plata:** Porcentaje del metal valioso que se logra extraer del mineral original tras el proceso de flotación. Se relaciona estrechamente con las variables del proceso y la calidad del concentrado (Zhang & Chen, 2021).
- i. **Contaminantes metálicos:** Se refiere a la presencia de metales no deseados en el concentrado de plata. La gestión de las variables de flotación es esencial para mitigar la inclusión de estos contaminantes (Lazić et al., 2022).
- j. **Reactivos de flotación:** Incluyen colectores y espumantes cuyo ajuste es necesario para optimizar tanto la recuperación como la pureza del concentrado de plata (Tanaka et al., 2023).
- k. **Modelo de recuperación:** Proceso matemático utilizado para optimizar y predecir el comportamiento del sistema de flotación en función de las diferentes variables operativas que influyen en la calidad del concentrado (Valiyev et al., 2024).
- l. **Proporción de flotación:** Relación entre el mineral que flota y aquel que no lo hace, influenciada por la granulometría, la dosificación de reactivos y el pH (Hellgren et al., 2024).
- m. **Calidad del concentrado:** Medida de la pureza y concentración de plata en el material recuperado, indica la eficacia del proceso de flotación (Zvereva et al., 2022).
- n. **Ley del concentrado:** Define la cantidad de plata presente en el concentrado calculada como una proporción del total de minerales presentes. Su determinación es crucial para evaluar el desempeño del proceso de flotación (Nikanorov, 2020).

- o. **Reacciones de flotación:** Interacciones químicas entre los reactivos y los minerales, que influyen en la formación de burbujas y la adherencia de partículas valiosas durante el proceso de flotación (Prakash et al., 2018; Tripathi et al., 2023).

2.5. Hipótesis de la investigación.

2.5.1. Hipótesis general.

La relación de variables del proceso de flotación influye en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025

2.5.2. Hipótesis específicas.

- La dosificación de sulfurizante y depresor en la flotación influye en la ley del concentrado plata obtenido en la Planta Mahuara.
- La granulometría de alimentación y la densidad de pulpa afecta a la recuperación de plata en el circuito de flotación.
- El colector y el espumante en la flotación influye en la recuperación de la plata en el concentrado final.

2.6. Operacionalización de variables e indicadores.

La operación de estudio sobre “**Relación de variables del proceso de flotación e influencia en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025**”, se describe en la tabla 1.

Tabla 6

Operacionalización de las variables e indicadores

Variable	Concepto	Dimensiones	Indicador
Independiente			
Relación de variables del proceso de flotación	Interacción entre parámetros operativos, químicos y físicos que controlan la eficiencia, recuperación y calidad del concentrado en flotación(Wills et al., 2006)	- Condiciones fisicoquímico	- colector - sulfurizante - Depresor - granulometría - densidad de pulpa - Espumante
Dependiente			
Calidad de concentrado	Conjunto de atributos del concentrado: ley y recuperación de metal, pureza, granulometría, humedad, presencia de impurezas/penalidades y estabilidad de transporte, que determinan su valor comercial y desempeño metalúrgico en fundición/refinación(Wills & Finch, 2016).	- Calidad de producto	- Ley - Recuperación
Intervinientes			
Condiciones del proceso	Conjunto de variables y restricciones controladas en un proceso para asegurar desempeño y calidad (Fuerstenau et al., 2007).	- Condiciones de operación	- pH - Promotores - Agitación - Tiempo - Acondicionamiento

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Diseño metodológico.

3.1.1. Tipo de investigación.

La investigación es de tipo aplicada, ya que busca solucionar un problema práctico mediante el análisis de variables del proceso de flotación para mejorar la calidad del concentrado de plata. Los resultados tendrán aplicación directa en la Planta Mahuara, optimizando su rendimiento productivo y la eficiencia metalúrgica en la recuperación de plata(Jiménez, 2024).

3.1.2. Nivel de investigación.

La investigación es de nivel explicativo, porque busca identificar las relaciones causales entre las variables del proceso de flotación (como pH, dosificación de reactivos y granulometría) y su influencia en la calidad del concentrado de plata, explicando por qué ciertos factores afectan los resultados en la Planta Mahuara(Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

3.1.3. Diseño de la investigación.

El diseño de investigación no experimental longitudinal implica observar variables a lo largo del tiempo para analizar cambios y tendencias. En este estudio, se monitorean las variables de flotación y la calidad del concentrado de plata en la Planta Mahuara durante varios períodos, sin intervenir en el proceso, para identificar su evolución y relación acumulada (Gómez, 2006).

3.1.4. Enfoque de la investigación.

El enfoque cuantitativo en esta investigación permite medir numéricamente la relación entre variables del proceso de flotación (como pH, dosificación de reactivos y granulometría) y la calidad del concentrado de plata. Se utilizan datos operativos de la Planta Mahuara 2025, aplicando estadística descriptiva e inferencial para identificar correlaciones y tendencias, con el fin de

optimizar el rendimiento metalúrgico de manera objetiva y replicable (Hadi et al., 2023; Hagenauer & Gläser-Zikuda, 2022).

3.2. Población y muestra.

3.2.1. Población de la investigación.

La población en esta investigación comprende todas las observaciones operativas del proceso de flotación en la Planta Mahuara durante 2025, incluyendo variables como granulometría, pH, dosificación de reactivos, ley de alimentación y recuperación de plata. Estos datos, generados en el procesamiento continuo del mineral, representan el universo de estudio para analizar su impacto en la calidad del concentrado final.

3.2.2. Muestra de la investigación.

La muestra comprende tomas de 500 ml de pulpa cada 2 horas durante los turnos de 12 horas, acumulando 6 muestras por guardia (3 litros de pulpa por turno, totalizando 6 litros diarios). Posteriormente, se homogeniza y reduce a 500 ml para análisis en laboratorio. Se miden variables: pH, densidad de pulpa, dosis de colector y espumante, y granulometría, garantizando datos representativos para evaluar su influencia en la calidad del concentrado de plata.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.3.1. Técnicas para la toma de datos.

En el estudio se emplea la técnica de observación, que consiste en registrar sistemáticamente los fenómenos o variables en su contexto natural. En esta investigación, se utiliza para monitorizar el proceso de flotación en campo, registrando parámetros como el pH, la dosificación de reactivos y el comportamiento de la espuma, lo que permite obtener datos precisos y fiables durante el muestreo en la planta Mahuara (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

3.3.2. Descripción de los instrumentos

Para la toma de datos en el estudio *"Relación de variables del proceso de flotación e influencia en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025"*, se emplearán diversas técnicas e instrumentos, entre ellos fichas de observación estructuradas para registrar sistemáticamente el pH, densidad de pulpa, dosis de colector y espumante, granulometría y condiciones operativas cada 2 horas; además, se utilizará un pH-metro portátil, densímetro(balanza marcy), cronómetro y probeta graduados para mediciones precisas, complementándose con el uso de grabaciones de video durante los turnos críticos, las cuales servirán como medio de registro visual del comportamiento de la espuma, nivel de celdas y operación del proceso, permitiendo un análisis posterior detallado mediante revisión cronológica y validación cruzada de datos. Las muestras de 500 ml de pulpa de cada punto de estudio serán etiquetadas, transportadas bajo cadena de custodia y analizadas en laboratorio para determinar leyes y parámetros metalúrgicos, integrando todos los datos para evaluar estadísticamente la influencia de las variables en la calidad del concentrado de plata (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018; Wills & Finch, 2016).

3.4. Técnicas para el procesamiento de la información.

La técnica para el procesamiento de la información en la investigación *"Relación de variables del proceso de flotación e influencia en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025"* consiste en la organización, codificación y análisis estadístico de los datos recopilados mediante fichas de observación, mediciones de laboratorio y registros instrumentales. Primero, se realiza la limpieza y validación de datos para eliminar errores o inconsistencias. Luego, se codifican las variables (pH, densidad de pulpa, dosis de reactivos, granulometría, etc.) y se ingresan a software especializado como Excel, Minitab o StatGraphics para aplicar técnicas de estadística descriptiva (medias, desviaciones estándar) e inferencial (regresión lineal múltiple,

correlación de Pearson, análisis de varianza ANOVA). Este enfoque permite identificar las relaciones significativas entre las variables del proceso y la ley del concentrado de plata, facilitando la interpretación de resultados y la formulación de conclusiones técnicas para la optimización del proceso (Ayyub & Mccuen, 2021; Taneja, 2009).

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Recopilación de datos

La información recopilada a nivel de planta de señalizaron entre el mes de enero a junio del 2025 con un promedio de 60 datos para la ley de cabeza, liberación, densidad de pulpa, entre los reactivos depresores, sulfurizante, promotores, colectores, resultado de las leyes de concentrado y relave.

Tabla 7

Leyes de cabeza parámetro de control liberación y densidad de pulpa 1

Cab Ag (oz/t)	Cab Au g/t)	%-200m	Den. Pulg (g/L)	Na ₂ S (g/t)	Met. Bisul.(g/t)	A-208 (g/t)
6.58	0.75	61.00	1312.58	25.40	32.22	17.89
6.84	0.94	61.50	1312.33	35.56	37.59	17.89
6.76	0.87	61.60	1312.75	31.64	55.76	18.57
4.50	0.85	61.80	1312.33	25.40	37.59	17.89
4.23	0.77	61.20	1311.92	17.78	53.70	17.89
5.22	0.63	62.00	1311.75	15.24	42.96	17.89
6.15	0.99	61.34	1310.67	10.16	42.96	17.89
5.96	0.81	61.36	1311.75	12.70	42.96	17.89
6.07	0.87	60.80	1312.42	12.70	42.96	13.41
6.91	0.96	61.50	1313.13	12.70	21.48	13.41
3.83	1.14	60.30	1313.54	20.32	53.70	13.41
5.37	1.05	61.80	1314.38	17.78	43.19	17.47
4.60	1.09	60.56	1315.46	15.24	51.08	13.50
4.66	0.51	60.80	1315.21	15.24	53.70	13.41
4.46	1.24	61.40	1315.21	12.97	42.39	13.70
4.38	0.82	61.70	1315.75	13.26	22.43	14.00
5.24	0.84	60.80	1316.58	20.32	53.70	13.41
7.16	1.12	61.60	1316.42	22.86	64.44	13.41
7.65	1.06	60.80	1316.42	20.32	53.70	13.41
6.67	0.91	60.40	1316.42	20.32	55.85	13.41
6.06	0.76	61.50	1315.83	20.32	53.70	13.41
6.52	0.61	60.80	1315.00	20.32	53.70	13.41
6.29	0.69	61.40	1314.67	21.59	48.94	13.97
6.41	0.65	61.70	1315.25	22.22	57.59	14.13

Tabla 8*Datos de ley de cabeza, liberación, sulfurizante, depresor y promotor 2*

Cab Ag (oz/t)	Cab Au g/t)	%-200m	Den. Pulg (g/L)	Na ₂ S (g/t)	Met. Bisul.(g/t)	A-208 (g/t)
5.72	0.81	60.80	1314.42	22.86	42.96	13.41
6.33	0.51	61.40	1315.67	22.86	64.44	17.89
5.74	0.82	60.80	1315.29	22.86	42.96	13.41
5.16	0.73	61.90	1315.27	22.86	64.44	17.89
6.22	0.67	60.80	1315.77	22.86	42.96	13.41
5.92	0.75	61.80	1315.58	22.86	42.96	13.41
6.76	1.19	62.00	1312.50	22.86	42.96	13.41
7.22	1.32	62.00	1311.00	30.48	10.74	13.41
7.93	1.13	60.00	1312.50	31.64	156.12	13.93
7.40	1.96	60.00	1311.00	25.40	37.59	17.89
7.15	1.85	60.00	1311.00	25.40	0.00	0.00
5.31	1.39	60.00	1317.50	25.40	16.11	17.89
5.69	0.83	60.00	1311.00	19.68	42.96	25.71
6.87	1.24	60.00	1313.50	30.48	21.48	16.10
4.99	0.67	61.00	1310.00	17.78	53.70	35.77
5.40	0.98	61.00	1308.50	27.94	26.85	13.41
5.24	0.45	62.00	1310.00	17.78	53.70	44.72
4.66	0.46	62.00	1311.00	12.70	26.85	8.94
4.99	0.50	62.00	1317.50	20.32	64.44	35.77
7.22	0.52	62.00	1317.50	12.70	21.48	13.41
6.60	0.55	62.00	1314.25	30.48	21.48	22.36
5.98	0.58	62.00	1311.00	23.86	28.03	42.01
5.44	0.67	62.00	1315.00	25.40	37.59	16.10
6.56	0.69	62.00	1317.50	20.32	42.96	26.83
7.14	0.74	62.00	1316.00	38.10	0.00	17.89
7.22	0.72	62.00	1317.50	27.94	42.96	26.83
6.21	1.10	62.00	1317.50	35.56	0.00	17.89
7.11	0.72	62.00	1316.00	25.40	37.59	16.10
6.42	0.82	62.00	1314.00	20.32	21.48	17.89
8.03	0.70	62.00	1317.50	25.40	37.59	16.10
8.19	0.73	62.00	1316.00	25.40	21.48	22.36
8.26	1.09	62.00	1314.00	25.40	37.59	16.10
5.99	0.87	62.00	1312.50	20.32	10.74	22.36
7.35	0.85	62.00	1314.00	25.40	37.59	16.10
7.24	0.92	62.00	1317.50	20.32	10.74	22.36
6.77	0.77	62.00	1312.50	25.40	37.59	16.10

Se han registrado en la tabla 7 y 8 un total de 60 observaciones, que se detallan a continuación: Ag: 3,83-8,26 oz/t; Au: 0,45-1,96 g/t; %-200 m: 60-62%; densidad: 1308,5-1317,5 g/L; Na₂S: 10,16-38,10 g/t; metabisulfito: 0-156,12 g/t; A-208: 0-44,72 g/t.

Tabla 9*Datos activadores, depresore, espumantes y colectores 1*

CuSO ₄ (g/t)	NaCN (g/t)	A-404 (g/t)	A-3418 (g/t)	MIBC (g/t)	Z-11 (g/t)	Z-11 + Z-6 3:1 (g/t)
1.86	0.39	39.90	46.27	67.36	31.12	34.95
0.00	0.39	35.47	42.06	36.74	27.23	31.07
0.00	0.00	41.43	43.67	44.51	32.31	36.29
0.00	0.39	35.47	42.06	36.74	27.23	31.07
0.00	0.00	39.90	42.06	42.87	31.12	34.95
1.86	0.39	39.90	42.06	45.93	19.45	31.07
0.00	0.39	35.47	37.86	42.87	27.23	34.95
1.86	0.39	39.90	42.06	42.87	31.12	38.84
0.00	0.39	26.60	29.44	42.87	23.34	31.07
1.86	0.39	35.47	42.06	42.87	31.12	46.60
1.16	0.39	17.73	25.24	36.74	19.45	23.30
0.62	0.30	37.12	40.84	44.75	27.80	33.81
1.27	0.39	21.01	26.57	38.29	22.33	27.81
1.86	0.00	26.60	29.44	42.87	23.34	31.07
0.82	0.79	13.59	21.48	37.53	15.90	11.90
1.32	0.81	18.51	21.96	38.36	16.25	12.16
1.16	0.39	17.73	25.24	36.74	19.45	23.30
1.63	0.00	31.04	29.44	42.87	23.34	31.07
1.16	0.39	17.73	25.24	36.74	27.23	38.84
1.28	0.39	26.60	33.65	39.80	27.23	34.95
1.16	0.39	17.73	25.24	36.74	19.45	23.30
1.16	0.39	17.73	25.24	36.74	23.34	31.07
1.39	0.38	23.33	28.21	39.77	22.54	27.21
1.43	0.50	34.32	35.01	43.10	23.47	34.50
1.63	0.39	39.90	37.86	42.87	23.34	38.84
1.16	0.77	31.04	29.44	42.87	23.34	31.07
1.63	0.00	35.47	33.65	42.87	27.23	38.84
1.16	0.77	31.04	29.44	42.87	19.45	31.07
1.63	0.39	39.90	37.86	42.87	23.34	38.84
1.63	0.77	39.90	37.86	42.87	23.34	38.84
1.63	0.77	39.90	37.86	42.87	23.34	38.84
1.16	0.00	31.04	37.86	42.87	23.34	34.95
1.21	0.80	23.02	30.57	44.51	24.23	20.16
0.70	0.00	44.34	50.48	52.05	31.12	34.95
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.70	0.00	31.04	37.86	48.99	23.34	34.95
0.52	0.29	21.28	24.40	44.09	17.90	30.10
0.70	0.00	22.17	29.44	46.54	23.34	34.95

Tabla 10*Datos activadores, depresore, espumantes y colectores 2*

CuSO ₄ (g/t)	NaCN (g/t)	A-404 (g/t)	A-3418 (g/t)	MIBC (g/t)	Z-11 (g/t)	Z-11 + Z-6 3:1 (g/t)
1.16	0.77	26.60	25.24	48.99	23.34	34.95
0.00	0.00	17.73	25.24	44.70	19.45	31.07
1.16	0.77	24.83	23.56	45.93	17.12	31.07
0.00	0.00	17.73	25.24	42.87	19.45	27.19
0.93	0.39	24.83	23.56	42.87	15.56	31.07
0.00	0.00	39.90	46.27	50.83	31.12	34.95
1.28	0.19	33.25	36.81	44.40	27.23	35.92
1.46	0.00	41.66	26.35	51.14	32.49	44.60
0.00	0.00	26.60	33.65	45.32	23.34	31.07
1.63	0.00	39.90	37.86	42.87	27.23	38.84
0.93	0.00	26.60	37.86	44.09	27.23	34.95
1.39	0.00	39.90	37.86	42.87	31.12	38.84
1.16	0.77	26.60	33.65	47.77	23.34	31.07
0.00	0.00	26.60	33.65	45.32	23.34	34.95
0.46	0.00	31.04	33.65	53.28	23.34	34.95
1.63	0.00	26.60	33.65	55.11	35.01	46.60
0.00	0.00	35.47	42.06	47.15	27.23	34.95
1.63	0.00	26.60	33.65	55.11	35.01	54.37
1.39	0.00	35.47	42.06	45.32	27.23	34.95
1.63	0.00	26.60	33.65	55.11	35.01	54.37
1.39	0.00	35.47	42.06	45.32	27.23	38.84
1.63	0.00	26.60	33.65	55.11	35.01	46.60

Se han obtenido en la tabla 9 y 10 de los 60 registros de dosificación de reactivos (g/t) en el circuito. Los valores de CuSO₄ oscilan entre 0,00 y 1,86 (promedio: 1,02), mientras que los de NaCN se encuentran entre 0,00 y 0,81 (promedio: 0,274). Es importante destacar que se han registrado frecuentes valores de 0 (13/60 y 27/60, respectivamente), lo que sugiere la presencia de periodos sin adición. Los colectores/auxiliares muestran los siguientes rangos: A-404, de 0,00 a 44,34 (prom. 29,62); A-3418, de 0,00 a 50,48 (prom. 33,30); MIBC, de 0,00 a 67,36 (prom. 43,79); Z-11, de 0,00 a 35,01 (prom. 24,76), y Z-11 + Z-6 (3:1), de 0,00 a 54,37 (prom. 33,46). Se observan niveles repetidos (setpoints) y un registro con todos los reactivos.

Tabla 11*Datos de ley de concentrado, relave y recuperación de plata 1*

Conc Ag (oz/t)	Conc Au g/t)	%Recup Ag	%Recup Au	Rel Ag (oz/t)	Rel Au g/t)
105.11	7.66	81.53	51.83	1.28	0.38
125.65	10.60	82.85	50.77	1.23	0.49
134.49	9.73	80.52	45.53	1.37	0.49
80.25	9.38	81.73	50.53	0.86	0.44
80.48	8.80	80.13	47.90	0.88	0.42
93.35	7.59	82.75	55.72	0.94	0.29
116.01	8.51	79.55	36.14	1.31	0.66
103.52	7.56	83.16	44.92	1.05	0.47
86.33	6.58	82.05	43.43	1.16	0.52
106.39	7.84	83.17	44.01	1.23	0.57
66.12	10.87	80.01	44.20	0.80	0.67
102.80	8.49	81.59	47.42	1.12	0.46
114.30	8.69	80.69	44.39	1.25	0.51
79.73	6.12	79.90	56.34	0.98	0.23
86.26	10.02	78.52	32.73	1.00	0.87
114.58	11.36	78.43	41.33	0.97	0.50
80.07	7.79	79.30	48.26	1.14	0.46
100.50	9.24	83.27	48.83	1.27	0.61
135.08	8.06	81.53	35.29	1.48	0.72
132.10	9.25	81.78	41.77	1.27	0.56
103.81	6.94	79.29	42.02	1.32	0.47
133.98	8.22	81.21	53.22	1.28	0.30
105.05	8.78	80.55	44.04	1.17	0.55
115.56	10.75	81.33	49.76	1.26	0.48
106.35	7.28	82.70	39.98	1.04	0.51
123.63	5.56	80.37	44.58	1.30	0.30
98.41	7.40	81.03	42.83	1.14	0.49
84.94	6.50	80.92	43.69	1.04	0.43
102.91	6.86	81.87	50.36	1.19	0.35
121.59	7.49	81.55	39.39	1.14	0.48
109.17	13.17	81.82	56.15	1.30	0.55
136.84	18.45	81.24	59.75	1.42	0.56
155.07	15.37	80.92	56.17	1.58	0.52
123.76	28.09	82.83	70.82	1.34	0.60
132.50	28.14	82.29	67.62	1.33	0.63
75.62	16.60	82.52	69.14	0.99	0.46
111.90	10.27	81.36	51.18	1.11	0.42
115.55	16.23	81.22	63.08	1.36	0.48

Tabla 12*Datos de leyes concentrado, relave y recuperación de plata 2*

Conc Ag (oz/t)	Conc Au g/t)	%Recup Ag	%Recup Au	Rel Ag (oz/t)	Rel Au g/t)
100.76	10.35	80.02	61.31	1.04	0.27
105.95	9.25	79.62	43.92	1.15	0.50
100.56	5.29	80.74	49.70	1.05	0.24
93.80	7.05	80.37	60.52	0.95	0.19
121.93	9.21	80.88	61.07	0.99	0.20
169.88	7.68	82.41	52.03	1.32	0.26
113.93	8.68	82.26	52.73	1.26	0.40
113.15	7.57	81.38	55.71	1.16	0.27
97.38	7.88	79.07	52.34	1.19	0.33
101.57	7.52	82.41	57.96	1.22	0.31
123.06	7.68	82.40	49.71	1.32	0.39
131.89	7.90	82.59	49.47	1.32	0.38
99.19	11.61	81.64	53.77	1.20	0.54
99.11	6.99	83.11	57.48	1.28	0.33
116.64	8.49	80.46	45.86	1.31	0.46
150.59	9.10	83.86	58.02	1.36	0.31
161.53	8.55	83.45	49.57	1.42	0.38
105.54	10.06	84.08	60.67	1.41	0.46
100.75	7.88	82.30	44.49	1.11	0.51
104.43	7.07	83.16	48.62	1.31	0.46
115.91	8.42	82.77	47.50	1.32	0.51
129.60	8.90	83.42	53.19	1.32	0.41

El conjunto abarca en la tabla 11 y 12 para las 60 observaciones sobre el rendimiento metalúrgico del circuito, incluyendo la concentración de plata (Conc. Ag, oz/t) entre 66,12 y 169,88 (promedio: 110,95), la concentración de oro (Conc. Au, g/t) entre 5,29 y 28,14 (promedio: 9,66), la recuperación de plata entre 78,43 y 84,08 % (promedio: 81,50 %, baja variabilidad) y la recuperación de oro entre 32,73 y 70,82 % (promedio: 50,35 %, alta variabilidad). En relaves, Rel Ag oscila entre 0,80 y 1,58 onzas por tonelada (promedio: 1,20) y Rel Au entre 0,19 y 0,87 gramos por tonelada (promedio: 0,45).

4.1.2. Resultados.

Tabla 13

Descripción de la variable independiente en la flotación de minerales de plata

	N	Media	DE	Varianza	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
							W	p
%-200m	60	61.386	0.681	0.4639	60.0	62.000	0.825	<.001
Den. Pulg (g/L)	60	1314.117	2.346	5.5018	1308.5	1317.500	0.952	0.018
Na ₂ S (g/t)	60	22.250	6.132	37.6066	10.2	38.097	0.964	0.077
Met. Bisul.(g/t)	60	40.325	22.397	501.6442	0.0	156.118	0.812	<.001
A-208 (g/t)	60	17.664	7.272	52.8775	0.0	44.716	0.754	<.001
CuSO ₄ (g/t)	60	1.019	0.633	0.4007	0.0	1.859	0.866	<.001
NaCN (g/t)	60	0.274	0.288	0.0829	0.0	0.806	0.795	<.001
A-404 (g/t)	60	29.616	8.949	80.0933	0.0	44.337	0.936	0.004
A-3418 (g/t)	60	33.303	8.330	69.3838	0.0	50.476	0.926	0.001
MIBC (g/t)	60	43.787	8.082	65.3199	0.0	67.362	0.743	<.001
Z-11 (g/t)	60	24.759	5.968	35.6229	0.0	35.013	0.907	<.001
Z-11 + Z-6 3:1 (g/t)	60	33.462	8.811	77.6360	0.0	54.371	0.886	<.001

Como puedes ver en la Tabla 7, que resume las variables independientes de operación/reactivos en flotación de minerales de plata (N=60), se ha incorporado el test de Shapiro-Wilk para la validación de la normalidad. Solo Na₂S tiene una distribución compatible con la normalidad (W = 0,964; p = 0,077 > 0,05). La %-200 m (p < 0,001) y la densidad de pulpa (p = 0,018) no son normales. Los metabisulfitos, el A-208, el CuSO₄, el NaCN, el A-404, el A-3418, el MIBC, el Z-11 y el Z-11 + Z-6 (3:1) (en todos los casos p ≤ 0,004) no son normales. Esto evidencia asimetrías/ceros operacionales y variabilidad típica de la dosificación en la planta.

Tabla 14

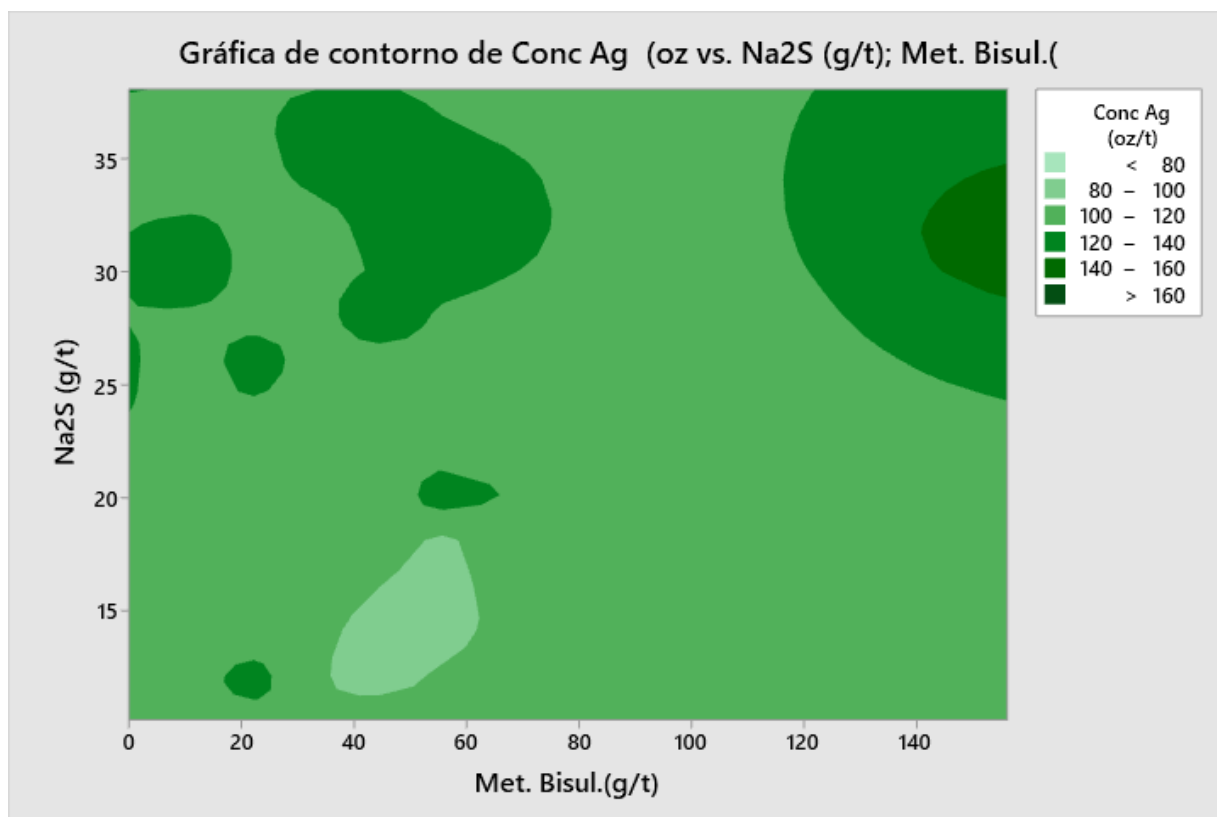
Descripción de las leyes de plata y oro en los tres puntos cabeza, concentrado y relave

							Shapiro-Wilk	
	N	Media	Mediana	DE	Mínimo	Máximo	W	p
Cab Ag (oz/t)	60	5.692	6.113	2.017	0.000	8.260	0.795	<.001
Cab Au g/t)	60	0.800	0.808	0.378	0.000	1.964	0.931	0.002
Conc Ag (oz/t)	60	110.949	106.366	20.913	66.118	169.883	0.973	0.202
Conc Au g/t)	60	9.655	8.497	4.293	5.288	28.136	0.647	<.001
%Recup Ag	60	81.497	81.538	1.351	78.425	84.075	0.982	0.513
%Recup Au	60	50.345	49.707	8.076	32.732	70.818	0.983	0.562
Rel Ag (oz/t)	60	1.198	1.229	0.162	0.802	1.579	0.972	0.177
Rel Au g/t)	60	0.450	0.464	0.131	0.191	0.871	0.972	0.180

La tabla número 8 muestra sesenta datos, todos con N=60, de leyes de Ag y Au en cabeza, concentrado y relave, e incluye la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. En cabeza, Cab Ag (media 5.692 oz/t; DE 2.017) y Cab Au (0.800 g/t; DE 0.378) no son normales ($W=0.795$, $p<0.001$; $W=0.931$, $p=0.002$). En concentrado, Conc Ag (110,949 oz/t; DE 20,913) sí es normal ($W = 0,973$; $p = 0,202$), mientras que Conc Au (9,655 g/t; DE 4,293) no es normal ($W = 0,647$; $p < 0,001$). Las recuperaciones %Recup Ag (81,497 %; $p = 0,513$) y %Recup Au (50,345 %; $p = 0,562$) muestran normalidad. En relaves, Rel Ag (1,198 oz/t; $p = 0,177$) y Rel Au (0,450 g/t; $p = 0,180$) también son compatibles con normalidad ($p > 0,05$).

Figura 3

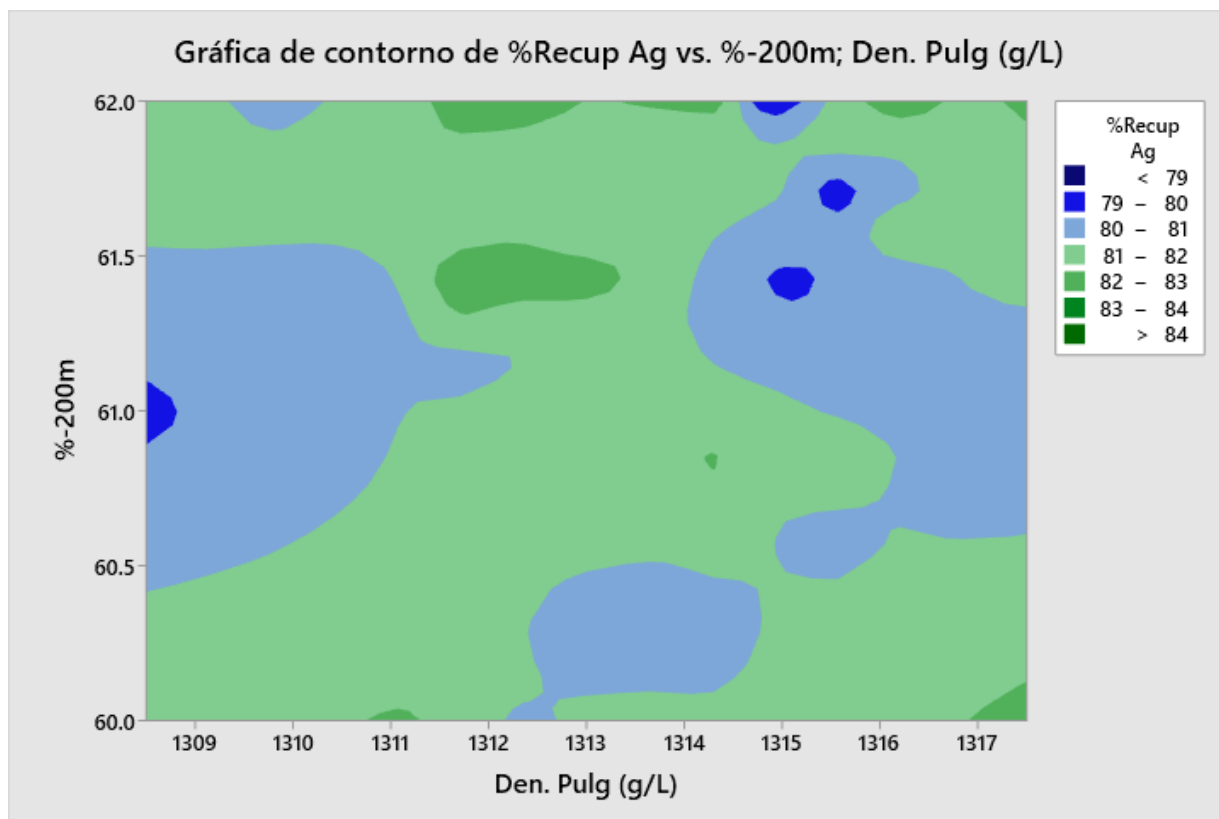
Calidad de concentrado de plata en relación de sulfurizante y metabisulfito de sodio



La figura 3 muestra una gráfica de contorno en la que se representa la ley de plata en el concentrado (Conc Ag, oz/t) en función de Na₂S (g/t) (eje Y) y metabisulfito (g/t) (eje X). La escala de colores indica los rangos de concentración de plata (Conc Ag) desde menos de 80 hasta más de 160 onzas por tonelada (oz/t). Los valores intermedios (100-120 oz/t) predominan en gran parte del plano, con una zona de máximos (más de 160 oz/t) hacia altas dosis de metabisulfito (140-150 g/t) y Na₂S elevado (30-35 g/t). Se ve una zona de números bajos (menos de 80 a 100 oz/t) alrededor de metabisulfito medio (40 a 60 g/t) y Na₂S bajo (12 a 18 g/t), además de aumentos locales en dosis intermedias.

Figura 4

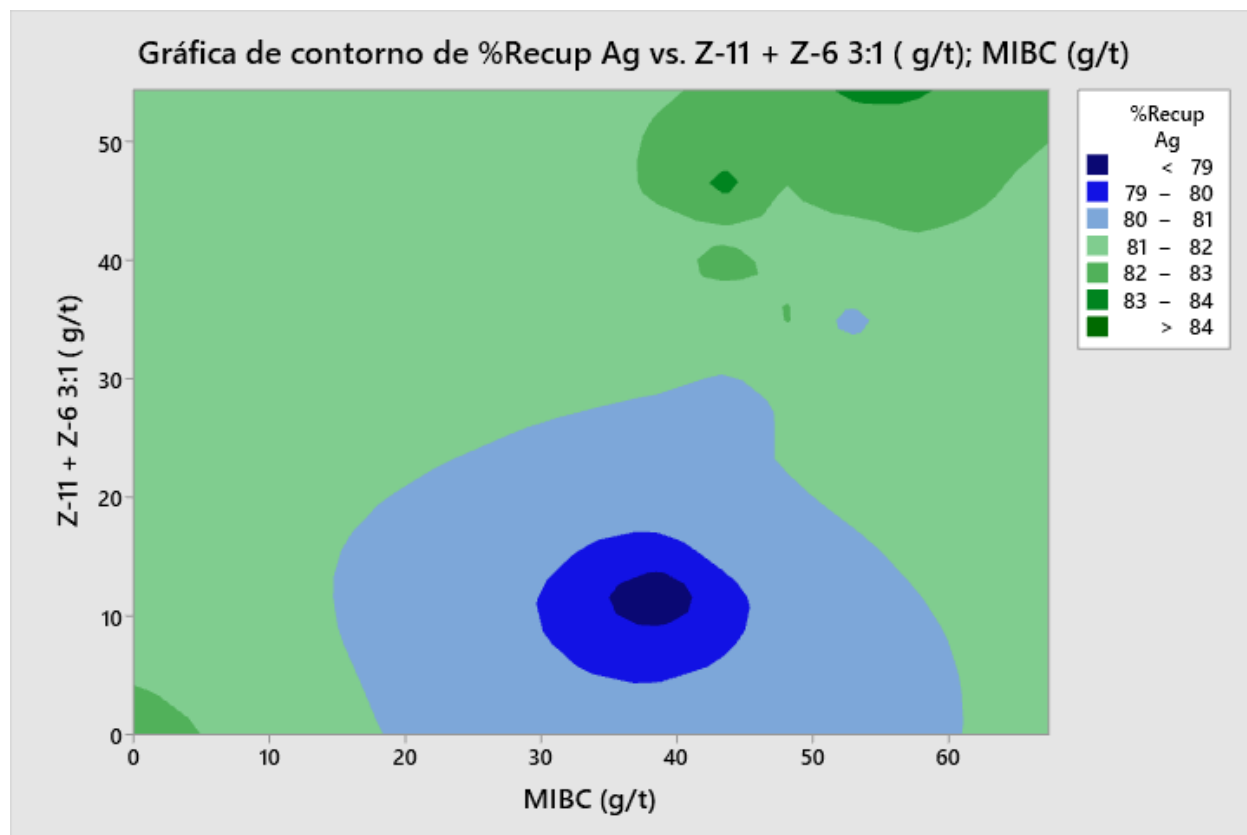
Recuperación de plata en relación a la liberación %-200m y densidad de pulpa



En la figura 4 se muestra una gráfica de contorno de la recuperación de plata (en porcentaje, expresado como %Recup Ag) en función de la granulometría (en porcentaje, expresado como %-200 m, en el eje Y, con valores entre 60,0 y 62,0) y la densidad de pulpa (en gramos por litro, expresado como Den. Pulg, en el eje X, con valores aproximados entre 1309 y 1317). La leyenda clasifica la recuperación en rangos de entre el 79 y el 84 %. Las áreas con mayor porcentaje de humedad, que abarcan del 81 al 83 %, se presentan en tonos verdes en los mapas. En cambio, las áreas con niveles locales inferiores a 79-80 % se observan alrededor de los 1315-1316 g/L y 61,4-61,7 % -200 m, así como áreas bajas, con un 79-81 % dispersas. Los máximos, que superan el 83-84 %, se manifiestan como manchas verdes más oscuras.

Figura 5

Recuperación de plata en relación de MIBC y mezcla de Z-11 + Z-6



La recuperación de plata (Recup Ag) en la figura 5 se muestra en función de la concentración de MIBC (g/t) en el eje X y de la proporción de colectores Z-11 + Z-6 (g/t) en el eje Y. La escala de color utiliza una clasificación que abarca desde el azul oscuro, que representa una recuperación menor al 79 %, hasta el verde oscuro, que indica una recuperación mayor al 84 %. Predominan las zonas de entre el 81 y el 83 % (tonos de verde claro), pero se observa un mínimo marcado (entre el 79 y el 80 %) alrededor de los 35-40 g/t de MIBC y los 10-15 g/t de Z-11 + Z-6. Los niveles más altos de concentración (>83-84 %) se observan en altas dosis de Z-11+Z-6 (45-55 g/t) con MIBC medio-alto (45-60 g/t), con pequeñas «islas» de mejora en la parte superior.

4.2. Contratación de hipótesis

4.2.1. Contrastación de hipótesis general.

Ha: La relación de variables del proceso de flotación influye en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025

Ho: La relación de variables del proceso de flotación **no** influye en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025

Tabla 15

Efecto de las variables en la calidad del concentrado de plata g/t Ag

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Z-11 (g/t)	1402.3	1	1402.3	3.932	0.05
MIBC (g/t)	290.9	1	290.9	0.816	0.37
A-3418 (g/t)	54	1	54	0.151	0.7
Z-11 + Z-6 3:1 (g/t)	878.8	1	878.8	2.464	0.12
A-208 (g/t)	97.2	1	97.2	0.273	0.6
Cab Ag (oz/t)	5051.9	1	5051.9	14.17	<.001
Cab Au g/t)	2443.9	1	2443.9	6.853	0.01
Residuos	18545.5	52	356.6		

Con un nivel de significación de $\alpha = 0,05$, la tabla 9 (ANOVA) muestra que la calidad del concentrado de plata (g/t Ag) está influenciada de forma significativa por las variables de cabeza Cab Ag (oz/t) ($F = 14,17$; $p < 0,001$) y Cab Au (g/t) ($F = 6,853$; $p = 0,01$). El efecto límite/marginal ($F = 3.932$; $p = 0.05$) es presentado por Z-11 entre los reactivos. Por otro lado, los reactivos MIBC, A-3418, Z-11+Z-6 (3:1) y A-208 no son significativos ($p > 0.05$). Por tanto, H_0 se respalda parcialmente: la calidad depende principalmente de Cab Ag y Cab Au, y solo Z-11 muestra influencia en el umbral de significancia.

4.2.2. Contrastación de hipótesis específicas.

- **Ha:** La dosificación de sulfurizante e depresor en la flotación influye en la ley de concentrado de plata obtenido en la Planta Mahuara.
- **Ho:** La dosificación de sulfurizante y depresor en la flotación **no** influye en la ley de concentrado de plata obtenido en la Planta Mahuara.

Tabla 16

Análisis de la influencia del sulfurizante y depresor en la ley de plata en el concentrado

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Na ₂ S (g/t)	1904	1	1904	4.549	0.037
Met. Bisul.(g/t)	118	1	118	0.283	0.597
Residuos	23858	57	419		

La prueba de ANOVA de la tabla 10 muestra que la dosis de Na₂S tiene un efecto estadísticamente significativo ($p = 0,037$) en la variable de respuesta, ya que su valor p es inferior a 0,05. Sin embargo, la cantidad de metabisulfito no tiene un efecto significativo ($p = 0,597$). La suma de cuadrados de los residuos es muy elevada, lo cual indica que otros factores no controlados deben explicar la variabilidad de los datos.

- **Ha:** La granulometría de alimentación y la densidad de pulpa afecta a la recuperación de plata en el circuito de flotación.
- **Ho:** La granulometría de alimentación y la densidad de pulpa **no** afecta a la recuperación de plata en el circuito de flotación.

Tabla 17*Análisis del efecto de la densidad de pulpa y liberación en la recuperación de plata*

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
%-200m	2.67	1	2.67	1.481	0.23
Den. Pulg (g/L)	1.26	1	1.26	0.699	0.41
Residuos	102.93	57	1.81		

Con un nivel de significación de $\alpha = 0,05$, según la tabla 11 (ANOVA), no hay pruebas para aceptar la hipótesis nula: la granulometría %-200 m presenta un valor F de 1,481 con un valor p de 0,23 ($> 0,05$) y la densidad de pulpa (g/L) muestra un valor F de 0,699 con un valor p de 0,41 ($> 0,05$), por lo que ambos efectos son no significativos. En consecuencia, no se ha demostrado que la granulometría de alimentación ni la densidad de pulpa afecten a la recuperación de plata bajo estas condiciones experimentales.

- **Ha:** El colector y el espumante en la flotación influye en la recuperación de la plata en el concentrado final.
- **Ho:** El colector y el espumante en la flotación **no** influye en la recuperación de la plata en el concentrado final.

Tabla 18*Análisis de la Recuperación de plata en el concentrado*

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
MIBC (g/t)	5.36	1	5.36	4.55	0.04
Z-11 + Z-6 3:1 (g/t)	34.79	1	34.79	29.55	<.001
Residuos	67.11	57	1.18		

Según los resultados de la Tabla 12 (ANOVA) y con un nivel de significación de $\alpha = 0,05$, se acepta la hipótesis alternativa (Ha) porque ambos factores son significativos: el espumante MIBC presenta un valor de $F = 4,55$ y un valor de $p = 0,04$ (inferior a 0,05), y el colector Z-11 + Z-6 (3:1) muestra un valor de $F = 29,55$ y un valor de p inferior a 0,001, lo que evidencia una influencia estadísticamente significativa en la recuperación de plata del concentrado final (con mayor efecto del colector).

CAPITULO V

DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados

Los resultados del circuito Mahuara muestran que la química de superficie es clave para la recuperación de plata: el colector Z-11+Z-6 (3:1) tuvo un impacto muy significativo en el porcentaje de recuperación de plata ($p < 0.001$) y el uso del espumante MIBC también fue significativo ($p = 0.04$). Este comportamiento concuerda con lo observado por Ramírez-Rodríguez et al. (2024), quienes evidencian que el acondicionamiento sulfurizante aumenta la hidrofobicidad (mayor ángulo de contacto) y, en consecuencia, optimiza la flotabilidad de fases complejas. En el contexto de la planta, las variaciones en el colector o el espumante pueden estar «compensando» o «acentuando» los estados de oxidación o sulfurización natural de las especies argentíferas, lo que resulta en cambios en la adsorción, la estabilidad de la espuma y la cinética de captura.

Por el contrario, la granulometría %-200 m y la densidad de pulpa no mostraron influencia estadística sobre %Recup Ag ($p = 0.23$ y $p = 0.41$, respectivamente), lo que sugiere que, dentro del rango operativo evaluado, estas variables permanecieron relativamente «estrechas» o que su efecto fue eclipsado por factores químicos y mineralógicos. Esta afirmación concuerda con lo señalado por Zhang et al. (2024), quienes destacan que la plata tiende a estar asociada a sulfuros de Pb-Zn y que su respuesta depende en gran medida de la interacción reactivo-superficie y del esquema de flotación (preferencial o a granel). En relación con esto, la calidad del concentrado (g/t Ag) estuvo dominada por las leyes de cabeza ($Cab\ Ag\ p < 0.001$; $Cab\ Au\ p = 0.01$), lo que indica que la variación del «feed» controla gran parte del techo metalúrgico del circuito, mientras que los reactivos solo afinan selectividad (Z-11 marginal: $p = 0.05$).

Los resultados concuerdan con los reportados previamente por García & López (2024) y Linares (2024). En su estudio, los investigadores destacaron mejoras significativas al optimizar los colectores y su selectividad, en lugar de realizar cambios menores en las condiciones físicas. Además, los hallazgos de Dulanto (2024) indican que la calidad y la recuperación varían según el tipo de agua y el paquete de reactivos, lo que resalta la importancia crucial de la química del sistema en el proceso. Finalmente, la evidencia de Sebastian & Aldave (2024) sobre variables fuera de control respalda que, en planta, la variabilidad de cabeza y la dosificación real explican cambios en ley/recuperación; por ello, los resultados de Mahuara apuntan a una estrategia práctica: control más estricto del colector/espumante y gestión de la variabilidad de cabeza para estabilizar la calidad del concentrado de plata.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

En la planta Mahuara (2025) se constata que la relación entre las variables del proceso de flotación influye en la calidad del concentrado de plata, siendo el efecto de la variación metalúrgica de la alimentación (leyes de cabeza) el más importante y, en menor medida, el ajuste de reactivos para mantener la ley final.

El concentrado de plata se ve afectado negativamente por el sulfurizante y depresor, pero no se observa un impacto significativo en la ley del concentrado de plata dentro del rango evaluado. Por lo tanto, no se puede demostrar estadísticamente su influencia directa en g/t Ag.

Sin embargo el sulfuro de sodio y bisulfito de sodio en la ley de plata del concentrado, para un nivel de significación de $\alpha = 0,05$, el ANOVA indica que la dosificación de Na_2S influye significativamente en la variable respuesta ($F = 4,549$; $p = 0,037 < 0,05$), por lo que se rechaza la hipótesis nula para Na_2S . Sin embargo, el metabisulfito no tiene un efecto significativo ($F = 0,283$; $p = 0,597 > 0,05$), por lo que se mantiene H_0 para este factor. La mayor variabilidad queda en residuos, como se puede comprobar en los valores de SS y MS, que son 23858 y 419, respectivamente.

La granulometría y la densidad de pulpa en la recuperación de plata no afectan significativamente la recuperación de Ag en el rango operativo analizado ($p > 0,05$), sugiriendo estabilidad física o un efecto enmascarado por otras variables.

En cuanto a la recuperación de la plata, el colector (Z-11 + Z-6 3:1) y el espumante (MIBC) sí influyen significativamente en la recuperación de Ag ($p < 0,05$), siendo el colector el factor de mayor impacto.

6.2. Recomendaciones.

Optimizar Na_2S (sulfurizante) ajustando su dosificación mediante pruebas escalonadas y manteniendo un punto de ajuste operativo, ya que mostró un efecto significativo ($p = 0,037$) sobre la variable de respuesta.

El metabisulfito debe mantenerse bajo control, no como palanca principal, y debe usarse principalmente para conseguir estabilidad y selectividad, evitando el sobreconsumo.

Para reducir la variabilidad no explicada (residuos altos), se deben estandarizar el muestreo y los procedimientos de control de calidad y cuantificación (QA/QC), y controlar el pH/Eh, el porcentaje de sólidos, la aireación y los tiempos de acondicionamiento/flotación para disminuir la dispersión del proceso.

Es necesario validar las interacciones y la mineralogía, así como ejecutar un diseño factorial/DOE (Na_2SxpH o $\text{Na}_2\text{Sxcolector}$) y complementarlo con mineralogía (liberación/oxidación) para definir el mecanismo y asegurar la transferibilidad a la planta.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.1. Referencias bibliográficas

Ángeles, L., Flores, M., Pérez, M., Reyes, I., Escudero, R., Patiño, F., Barrientos, F., Juárez, J., &

Reyes, M. (2023). Silver(I) Recovery by Ion Flotation Process from Aqueous Solutions in Cells with Spargers. *Minerals*, 13(4), 572. <https://doi.org/10.3390/MIN13040572/S1>

Aya Gold & Silver Inc. (2023, November 9). » *Aya Gold & Silver Reports Recoveries of 89%*

Silver and 85% Gold from Metallurgy Test Work on Boumadine. Aya Gold & Silver Inc.

<https://ayagoldsilver.com/press-release/aya-gold-silver-reports-recoveries-of-89-silver-and-85-gold-from-metallurgy-test-work-on-boumadine/>

Ayyub, B., & Mccuen, R. (2021). *Statistics , and Reliability for Engineers and scientiste* (3era

ed.). CRC Press.

https://www.google.com.pe/books/edition/Probability_Statistics_and_Reliability_f/j0HOB

QAAQBAJ?hl=es-

419&gbpv=1&dq=Probability+and+Statistics+for+Engineering+and+the+Sciences&pg=PA

2&printsec=frontcover

Azañero, A. (2015). *Flotación y Concentración de Minerales*.

[https://es.scribd.com/document/421890180/FLOTACION-Y-CONCENTRACION-DE-](https://es.scribd.com/document/421890180/FLOTACION-Y-CONCENTRACION-DE-MINERALES-ANGEL-AZANERO-ORTIZ-pdf)

MINERALES-ANGEL-AZANERO-ORTIZ-pdf

Bulatovic, S. (2007). *Handbook of flotation reagents : chemistry, theory and practice : flotation of sulphides ores*.

Castillo, D., Castillo, D., Castellanos, R., Valera, A., Paredes, J., Sandoval, J., & Villanueva, K.

(2022). Influencia de la densidad de pulpa de Arsenopirita en la cinética de la biomasa

microbiana lixiviante. *Revista Ciencias Biológicas y Ambientales*, 1(1), 62–73.

<https://doi.org/10.33326/29585309.2022.1.1591>

Castro, S., & Laskowski, J. (2011). Froth Flotation in Saline Water. *KONA Powder and Particle Journal*, 29, 4–15. <https://doi.org/10.14356/KONA.2011005>

Chegini, M., Allahkarami, E., & Allahkarami, E. (2024). Unlocking high-value metals: Efficient flotation techniques for lead and silver ore. *Results in Engineering*, 24, 103083. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.103083>

Chen, J., Xu, Z., & Chen, Y. (2020). Structure and reactivity of flotation reagents. *Electronic Structure and Surfaces of Sulfide Minerals*, 181–236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817974-1.00005-3>

Chique, J. (2020). *Estudio de efecto espumante de lignosulfonatos en flotación* [Universidad de Concepción]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/<https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/7b053ae9-80d0-48ba-a49e-f592535c2538/content>

Cuesta, G., Cuenca, D., Granja, J., & Chicaiza, Á. (2020). Recuperación de minerales aurífero mediante flotación, provenientes del sector la Pangui, distrito minero Chinapintza – Ecuador. *ConcienciaDigital*, 3(2.1), 80–93. <https://doi.org/10.33262/CONCIENCIADIGITAL.V3I2.1.1221>

cytec. (2007). *Mining chemicals handbook*. <https://online.fliphtml5.com/amzpx/cdpy/#p=1>

Dehghani, F. (2022). *Investigating impact of pulp density on flotation performance* [University of Alaska Fairbanks]. <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/13072>

Dey, S., Pani, S., & Singh, R. (2014). Study of interactions of frother blends and its effect on coal flotation. *Powder Technology*, 260, 78–83. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2014.03.068>

- Diallo, M., Bouabdellah, M., Levresse, G., Yans, J., Castorina, F., Klügel, A., Mouhagir, M., Mouden, S., & Maacha, L. (2021). Mineralogy, Fluid Inclusion, and C-O-Sr Isotope Geochemistry to Unravel the Evolution of the Magmatic-Hydrothermal System at the Igoudrane Silver-Rich Deposit (Imiter District, Eastern Anti-Atlas, Morocco). *Minerals* 2021, Vol. 11, Page 997, 11(9), 997. <https://doi.org/10.3390/MIN11090997>
- Drif, B., Taha, Y., Hakkou, R., & Benzaazoua, M. (2018). Recovery of Residual Silver-Bearing Minerals from Low-Grade Tailings by Froth Flotation: The Case of Zgounder Mine, Morocco. *Minerals* 2018, Vol. 8, Page 273, 8(7), 273. <https://doi.org/10.3390/MIN8070273>
- Dulanto, J. (2024). *Flotación de minerales sulfurados a partir de relaves para la concentración de menas de plata y auríferos*. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/9921>
- Du, Y., Tong, X., Xie, X., Zhang, W., Yang, H., & Song, Q. (2021). Recovery of zinc and silver from zinc acid-leaching residues with reduction of their environmental impact using a novel water leaching-flotation process. *Minerals*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/MIN11060586>
- Escalante, J., & Lovera, D. (2023). *Geometalurgia aplicada a relaves auríferos cianurados en la región Arequipa y su posterior proceso por Gravimetría*. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24969>
- Escobedo, G., Lovera, D., Bustinza, V., & Ascuña, V. (2023). Optimización en la recuperación y calidad de concentrados de plata de la minera Pasivos Ambientales. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(51), e24706. <https://doi.org/10.15381/IIGEO.V26I51.24706>
- Espinoza, E., & Alger, J. (2020). Ética y conducta responsable en investigación: Una mirada a través de la Revista Médica Hondureña. *Revista Médica Hondureña*, 88(1), 33–37. <https://doi.org/10.5377/RMH.V88I1.11597>

Flores-Campos, R., Estrada-Ruiz, R. H., Rodríguez-Reyes, M., Martínez-Carrillo, D., & Martínez-Luévanos, A. (2024). Concentration of Silver from Recycling of Fine Powder of Wasted Videogame Printed Circuit Boards through Reverse Froth Flotation and Magnetic Separation Processes. *Recycling* 2024, Vol. 9, Page 60, 9(4), 60. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING9040060>

Fuerstenau, M., Jameson, G., & Roe-Hoan, Y. (2007). Froth Flotation: A Century of Innovation. In *Froth flotation : a century of innovation* (Issue June). https://books.google.com/books/about/Froth_Flotation.html?hl=es&id=8zpjAhBViC0C

Gallegos, H., Reyes, C., García, S., Muñoz, L., & Davalos, A. (2025). Flotação de calcopirita e molibdenita por meio de diversos depressores: uma revisão. *Europub Journal of Multidisciplinary Research*, 5(1), e5718. <https://doi.org/10.55033/ejmr6n1-004>

García, L., & Lopez, P. (2024). *Aplicación de la flotación para la recuperación de plata a partir de relaves de baja ley en la empresa Aurex - Cerro de Pasco*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11230>

Geng, Q., Han, G., & Wen, S. (2024). Flotation of Copper Sulfide Ore Using Ultra-Low Dosage of Combined Collectors. *Minerals*, 14(10), 1026. <https://doi.org/10.3390/MIN14101026/S1>

Gomez, M. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación científica* (1a ed.). Editorial brujas. https://www.google.com.pe/books/edition/Introducci%C3%B3n_a_la_metodolog%C3%ADa_de_la_in/9UDXP4U7aMC?hl=es-419&gbpv=1&dq=metodolog%C3%ADa+de+la+investigaci%C3%B3n+dise%C3%B1o+de+investigacion+transversal&pg=PA102&printsec=frontcover

- Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction* - Ashok Gupta, Denis S. Yan - Google Libros. Elsevier.
https://books.google.com.pe/books?id=UZSZBgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Hadi, M., Martel, C., Huayta, F., Rojas, C., & Arias, J. (2023). *Metodología de la investigación: Guía para el proyecto de tesis*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C.
<https://editorial.inudi.edu.pe/index.php/editorialinudi/catalog/view/82/124/149>
- Hagenauer, G., & Gläser-Zikuda, M. (2022). Mixed Methods. *Empirische Bildungsforschung*, 253–267. https://doi.org/10.1007/978-3-658-27277-7_16
- Harris, I. (2024, July 25). *Outcrop Silver Achieves Exceptional Recovery of 96.3% Silver and 98.5% Gold in Updated Metallurgical Testing at Santa Ana | Outcrop Silver*.
<https://outcropsilver.com/news/outcrop-silver-achieves-exceptional-recovery-of-96.3-silver-and-98.5-gold-in-updated-metallurgical-testing-at-santa-ana/>
- Hellgren, S., Engström, F., & Sundqvist Öqvist, L. (2024). The Characterization of Residues Related to the Roasting– Leaching–Electrowinning Zinc Production Route for Further Metal Extraction. *Metals 2024, Vol. 14, Page 73, 14(1)*, 73. <https://doi.org/10.3390/MET14010073>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. In Editorial Mc Graw Hill Education (Ed.), *Revista Universitaria Digital de Ciencias Sociales (RUDICS)* (Vol. 10, Issue 18). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.22201/FESC.20072236E.2019.10.18.6>
- Iriarte, G., Guillen, M., & Alfaro, E. A. (2022). Análisis de la caracterización mineralógica de los pórfidos de cobre como soporte a los procesos de flotación. *Revista Del Instituto de Investigación*

de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, ISSN-e 1682-3087, ISSN 1561-0888, Vol. 25, N°. 50, 2022, Págs. 433-444, 25(50), 433–444.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9862243&info=resumen&idioma=ENG>

Jiménez, I. (2024). *Metodología de la investigación : triángulos para su construcción*. Ediciones de la U.

[https://www.google.com.pe/books/edition/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_tri%C3%A1n/R9oJEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Metodolog%C3%ADa+de+la+Investigaci%C3%B3n+\(6%C2%AA+en.\)+Educaci%C3%B3n+McGraw-Hill.&pg=PA228&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_tri%C3%A1n/R9oJEQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Metodolog%C3%ADa+de+la+Investigaci%C3%B3n+(6%C2%AA+en.)+Educaci%C3%B3n+McGraw-Hill.&pg=PA228&printsec=frontcover)

Kamran, H., Sadat, F., & Sastre, A. M. (2024). A New Feasible Opportunity for Recycling Lead and Silver from Zinc Plant Residues by Flotation. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 5218, 17(21), 5218. <https://doi.org/10.3390/MA17215218>

Khoshdast, H., Hassanzadeh, A., Kowalczyk, P. B., & Farrokhpay, S. (2023). Characterization Techniques of Flotation Frothers - A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 44(2), 77–101. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.2024822;WGROU:STRING:PUBLICATION>

Kong, L., Lv, J., Li, J., Ni, L., & Qin, L. (2025). The effects of pH regulators on the flotation separation of sphalerite and dolomite and their interaction mechanism. *Applied Surface Science*, 680, 161450. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2024.161450>

Kursun, H. (2017). The influence of frother types and concentrations on fine particles' entrainment using column flotation. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 52(4), 722–731. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1267215;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>

- Lazić, P., Nikšić, Đ., Stojanović, D., & Gavrilović, T. (2022). Examination of the possibility of obtaining pyrite concentrate from the flotation tailings of the Lece mine. *Podzemni Radovi*, 41, 43–50. <https://doi.org/10.5937/PODRAD2241043L>
- Linares Díaz, E. A. (2024). *Estudio comparativo de reactivos alternativos AR-G105 y AR-G315 para mejorar la flotación de minerales de plata*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_ec96ef8940fc429f2f0f1c48ee8a206d/Description#tabnav
- Martínez, E., Teja, A., Reyes, M., Pérez, M., Reyes, G., Barrientos, F., & Juárez, J. (2020). Identificación de sulfuros complejos de plata (Sulfosales) contenidos en un concentrado de Pb, del distrito minero de Zimapán Hgo., *Tópicos de Investigación En Ciencias de La Tierra y Materiales*, 7(7), 19–23. <https://doi.org/10.29057/AACTM.V7I7.6175>
- Medeiros, M., Magalhães, C., Araújo, J., & Pereira, J. Y. (2014). Estudo comparativo dos principais espumantes com o uso de uma nova técnica HYDROMESS. *Revista Escola de Minas*, 67(1), 87–92. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672014000100013>
- Nikanorov, A. (2020). Silver-Containing Concentrate Processing. *Materials Science Forum*, 989, 456–460. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.989.456>
- Ojeda-Villegas, S., & Uribe Salas, A. (2023). Remoción de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} de las aguas de flotación de sulfuros complejos mediante la adición de carbonato de sodio. *EPISTEMUS*, 17(34), 24–31. <https://doi.org/10.36790/EPISTEMUS.V17I34.255>
- Ojeda-villegas, S., & Uribe-salas, A. (2023). Remoción de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} de las aguas de flotación de sulfuros complejos mediante la adición de carbonato de sodio. *EPISTEMUS*, 17(34), 24–31. <https://doi.org/10.36790/EPISTEMUS.V17I34.255>

- Ordoñez, Á., & Alfaro, E. (2023). Recuperación de cobre, zinc, oro y plata desde minerales polimetálicos por lixiviación en solución oxidante amoniacal. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(51), e25263. <https://doi.org/10.15381/IIGEO.V26I51.25263>
- Osisko Metals. (2024, April 16). *OSISKO METALS INFORMA LOS RESULTADOS PRELIMINARES DE LAS PRUEBAS METALÚRGICAS DE GASPÉ COPPER - Osisko Metals*. Osisko Metals. <https://osiskometals.com/news/osisko-metals-reports-preliminary-metallurgical-testwork-results-from-gaspe-copper/>
- Özçelik, S., & Ekmekçi, Z. (2024). Surface Chemistry and Flotation of Gold-Bearing Pyrite. *Minerals 2024*, Vol. 14, Page 914, 14(9), 914. <https://doi.org/10.3390/MIN14090914>
- Panayotov, V., & Panayotova, M. (2023). Technology for increasing the precious metals content in copper concentrate obtained by flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 59(5), 167424. <https://doi.org/10.37190/PPMP/167424>
- Pavajeau, J., Díaz, Z., Alvarado, E., & Mora, S. (2024). Aportes de la filosofía contemporánea en el desarrollo de la investigación científica. *Revista Social Fronteriza*, 4(3), e43275–e43275. [https://doi.org/10.59814/RESOFRO.2024.4\(3\)275](https://doi.org/10.59814/RESOFRO.2024.4(3)275)
- Prakash, R., Majumder, S., & Singh, A. (2018). Flotation technique: Its mechanisms and design parameters. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 127, 249–270. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.03.029>
- Ramírez-Rodríguez, A., Vilasó-Cadré, J. E., Reyes-Domínguez, I. A., & Briones-Gallardo, R. (2024). *Modificación superficial de residuos metalúrgicos por métodos biogénicos para recuperación de plata por flotación*. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/8894>

- Reyes, C., Muñoz, L., García, S., Chacón de la Rosa, S., Treviño, G., Martínez, D., Facundo, I., & Rodriguez, D. (2021). Adsorción de xantato isopropílico de sodio (z-11) en carbon sub-bituminoso. *South Florida Journal of Development*, 2(5), 8268–8277. <https://doi.org/10.46932/sfjdv2n5-140>
- Reyes, M., Barrientos, F., Pérez, M., Juárez, J., Reyes, I., & Flores, M. (2021). Comportamiento de la flotación sin colector de pirargirita. *Tópicos de Investigación En Ciencias de La Tierra y Materiales*, 8(8), 10–15. <https://doi.org/10.29057/AACTM.V8I8.7591>
- Reyes, M., García, R., Juárez, J., Palacios, E., Pérez, M., Reyes, I., Flores, M., Barrientos, F., & Teja, A. (2018). Caracterización de la pulpa de molienda de mineral de arsenopirita FeAsS. *Tópicos de Investigación En Ciencias de La Tierra y Materiales*, 5(5), 129–134. <https://doi.org/10.29057/AACTM.V5I5.9122>
- Reyes, M., Reyes, I. A., Flores, M. U., Barrientos, F. R., Pérez, M., & Juárez, J. C. (2020). El papel depresor del pH durante la flotación sin colector de mineral de galena. *Tópicos de Investigación En Ciencias de La Tierra y Materiales*, 7(7), 55–61. <https://doi.org/10.29057/AACTM.V7I7.6201>
- Reyes-Tagle, G., & Guajardo, J. C. (2023). *El proceso de comercialización de concentrados de cobre: una mirada a América Latina y el cumplimiento fiscal*. <https://doi.org/10.18235/0004768>
- Rhosonics. (2023, December 11). *Measuring density in the flotation process - Rhosonics*. https://rhosonics.com/insight/blog/measuring-density-in-the-flotation-process/?utm_source=chatgpt.com

- Rios, F., Prado, W., Cruzata-Martínez, A., & Alvarado, S. (2020). Análisis de la producción científica de universidades en Comunicación Social (2014 - 2018). *Propósitos y Representaciones*, 8(2), e558–e558. <https://doi.org/10.20511/PYR2020.V8N2.558>
- Santamaría-Galvis, C., Ríos, C., & Pardave-Livia, W. (2023). Mineralogical and geochemical characterization of the Au-Ag vetiform mineralization of the Aserradero Stream, municipality of California, Santander (Colombia): geometalurgic implications. *BISTUA Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 21(1), 31–40. <https://doi.org/10.24054/BISTUA.V21I1.2328>
- Sebastian, J., & Aldave, K. (2024). *Control estadístico en la flotación de minerales auríferos y plata para establecer los parámetros de control operacional planta beneficio Nueva Esperanza S.A.C.* <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/10259>
- Singh, T., Eng, M., & Eng, P. (2021, September 7). *Discovery Silver Corp. | Discovery informa excelentes resultados de las pruebas metalúrgicas en Cordero.* Discovery. <https://discoverysilver.com/news-and-media/news/discovery-reports-excellent-recoveries-from-metallurgical-test-work-on-cordero/>
- Štirbanović, Z., Urošević, D., Đorđević, M., Sokolović, J., Aksić, N., Živadinović, N., & Milutinović, S. (2022). Application of Thionocarbamates in Copper Slag Flotation. *Metals* 2022, Vol. 12, Page 832, 12(5), 832. <https://doi.org/10.3390/MET12050832>
- Taggart, A. (1927). *Handbook Of Mineral Dressing : Taggart Arthur F. : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive.* <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.4925/page/n3/mode/2up>
- Tanaka, Y., Miki, H., Wisnu, G., Aoki, Y., Okamoto, H., Ura, K., & Hirajima, T. (2023). Effect of pH and Precipitations on Copper–Molybdenum Rougher Flotation in Seawater.

MATERIALS TRANSACTIONS, 64(6), 1225–1231.

<https://doi.org/10.2320/MATERTRANS.M-M2023805>

Taneja, H. C. (2009). *Statistical methods for engineering and sciences*. I.K. International publishing house Pvt Ltd.

[https://www.google.com.pe/books/edition/Statistical_Methods_for_Engineering_and/q5eP1ESFicQC?hl=es-](https://www.google.com.pe/books/edition/Statistical_Methods_for_Engineering_and/q5eP1ESFicQC?hl=es-419&gbpv=1&dq=Probability+and+Statistics+for+Engineering+and+the+Sciences&pg=PA350&printsec=frontcover)

[419&gbpv=1&dq=Probability+and+Statistics+for+Engineering+and+the+Sciences&pg=PA350&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/Statistical_Methods_for_Engineering_and/q5eP1ESFicQC?hl=es-419&gbpv=1&dq=Probability+and+Statistics+for+Engineering+and+the+Sciences&pg=PA350&printsec=frontcover)

Tianzu, Y. (2024). Precious Metals Metallurgy. *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*, 1664–1665. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0_767

Tripathi, M., Agarwa, A., Singh, M., & Mubarak, N. M. (2023). Carbon-based materials as a promising route for water treatment. *Water Treatment Using Engineered Carbon Nanotubes*, 63–96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18524-3.00011-8>

Valderrama, L., Olguín, D., Gonzalez, M., Gómez, O., & Valderrama, L. (2024). Comparison between the flotation properties of pyrite and pyrrhotite. *Información Tecnológica*, 35(2), 1–10. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642024000200001>

Valiyev, K., Bugubaeva, A., Nechaeva, A., Artykova, A., Melamud, V., Stom, D., Boduen, A., & Bulaev, A. (2024). The Development of Innovated Complex Process for Treatment of Old Flotation Tailings of Copper-Zinc Sulfide Ore. *Molecules*, 29(7). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29071550>

Valverde, J., Aramburú, V., Ortiz, J., Tiburcio, R., Aguilar, S., Valverde, J., Aramburú, V., Ortiz, J., Tiburcio, R., & Aguilar, S. (2024). Optimización de recuperación de Pb-Ag del proceso

- de flotación mediante la caracterización mineralógica de mineral polimetálico de la sierra norte del Perú. *Industrial Data*, 27(2), 7–31. <https://doi.org/10.15381/IDATA.V27I2.23859>
- Wang, L., Peng, Y., & Runge, K. (2016). Entrainment in froth flotation: The degree of entrainment and its contributing factors. *Powder Technology*, 288, 202–211. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.10.049>
- Wiese, J., & Harris, P. (2012). The effect of frother type and dosage on flotation performance in the presence of high depressant concentrations. *Minerals Engineering*, 36–38, 204–210. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2012.03.028>
- Wills, B., & Finch, J. (2016). *Tecnología de procesamiento de minerales de Wills “Una introducción a los aspectos prácticos del tratamiento del mineral y la recuperación mineral.”* 512. https://www.google.com.pe/books/edition/Wills_Mineral_Processing_Technology/uMWcBAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1
- Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral Processing Technology An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*, by Barry A. Wills, Tim Napier-Munn (Elsevier Science & Technology Books, Ed.). https://www.academia.edu/40297760/Mineral_Processing_Technology_An_Introduction_to_the_Practical_Aspects_of_Ore_Treatment_and_Mineral_Recovery_by_Barry_A_Wills_Tim_Napier_Munn
- Zhang, H., Yu, H., Sun, W., Lin, S., & Zhang, C. (2024a). Beneficiation of silver and silver-bearing lead–zinc ores: A review. *Minerals Engineering*, 208, 108608. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2024.108608>

- Zhang, H., Yu, H., Sun, W., Lin, S., & Zhang, C. (2024b). Beneficiation of silver and silver-bearing lead–zinc ores: A review. *Minerals Engineering*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108608>
- Zhang, Y., & Chen, J. (2021). Sulfidizing Behavior of Complex Lead-Silver Ore: A Flotation Study. *Minerals 2021*, Vol. 11, Page 434, 11(4), 434. <https://doi.org/10.3390/MIN11040434>
- Zhao, Y., Zhao, H., Abashina, T., & Vainshtein, M. (2021). Review on arsenic removal from sulfide minerals: An emphasis on enargite and arsenopyrite. *Minerals Engineering*, 172, 107133. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2021.107133>
- Zvereva, N., Myazin, V., & Kostromina, I. (2022). Technological possibility of increasing the complexity of the use of gold-bearing polymetallic ores of the Novo-Shirokinsky deposit. *TRANSBAIKAL STATE UNIVERSITY JOURNAL*, 28(6), 6–14. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2022-28-6-6-14>

ANEXOS

Anexo 1 localización



Anexo 2 Matriz de consistencia.

	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Metodología
Generales	¿De qué manera la relación de variables del proceso de flotación influye en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025?	Explicar de qué manera la relación de variables del proceso de flotación influye en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025	La relación de variables del proceso de flotación influye en la calidad del concentrado de plata – Planta Mahuara 2025	<u>Independiente</u> • Variables de operación <u>Dependiente.</u> <u>Calidad</u> de <u>concentrado</u>	<u>Tipo de investigación:</u> Aplicada <u>Nivel de Investigación:</u> Explicativa
	¿Cómo el pH y la dosificación de colectores influye en la ley del concentrado de plata obtenido en la Planta Mahuara?	Determinar cómo el pH y la dosificación de colectores influye en la ley del concentrado de plata obtenido en la Planta Mahuara.	El pH y la dosificación de colectores influye en la ley del concentrado de plata obtenido en la Planta Mahuara	<u>Independiente</u> - pH, dosis colectora <u>Dependiente.</u> - Ley de concentrado de Ag	<u>Diseño de Investigación:</u> No experimental longitudinal <u>Enfoque de Investigación:</u> Cuantitativa
	¿En qué medida la granulometría de alimentación y la densidad de pulpa afecta a la recuperación de plata en el circuito de flotación?	Analizar cómo la granulometría de alimentación y la densidad de pulpa afecta a la recuperación de plata en el circuito de flotación.	La granulometría de alimentación y la densidad de pulpa afecta a la recuperación de plata en el circuito de flotación.	<u>Independiente</u> - Granulometría, densidad de pulpa <u>Dependiente.</u> - Recuperación Ag	<u>Población Muestra:</u> 5 litro de pulpa <u>Técnica Recolección Datos:</u> Observación
Específico	¿Sera posible que el espumante en la flotación influye en la presencia de contaminantes metálicos en el concentrado final de plata?	Evaluar como el espumante en la flotación influye en la presencia de contaminantes metálicos en el concentrado final de plata.	El exceso del espumante en la flotación influye en la presencia de contaminantes metálicos en el concentrado final de plata.	<u>Independiente</u> - Espumante <u>Dependiente.</u> - Presencia de impurezas	<u>Técnica Procesamiento Información:</u> Estadístico

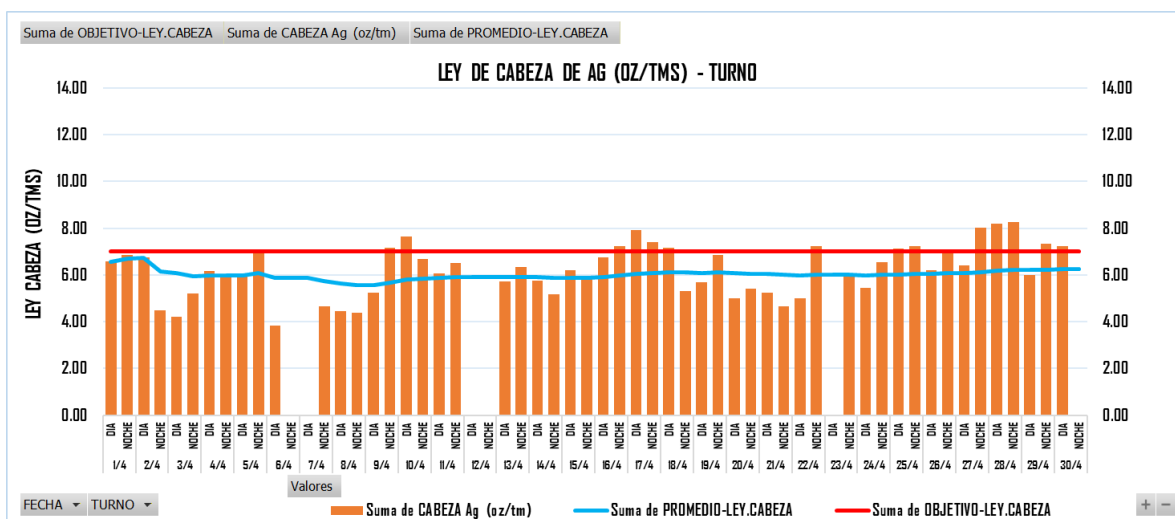
Anexo 3 Flujo de mineral y leyes de cabeza

FECHA	TURNO	OPERACIÓN PLANTA (Hr)		PRODUCTOS			LEYES (Onz / Tms)					
		Hrs OP PLANTA	TMH/Hr-Planta	MINERAL CABEZA		CONCENTRADO	CABEZA		CONCENTRADO		RELAVES	
				Min. CABEZA (TMH)	% H ₂ O	CONCENTRADO TMS	CABEZA Ag (oz/tm)	CABEZA Au (gr/tm)	CONC.. Ag (oz/tm)	CONC..Au (gr/tm)	RLV. Ag (oz/tm)	RLV. Au (gr/tm)
1/4	DIA	12.00	15.42	185.00	8.245	8.66	6.575	0.753	105.111	7.657	1.280	0.382
1/4	NOCHE	12.00	15.42	185.00	8.341	7.65	6.840	0.941	125.651	10.597	1.228	0.485
2/4	DIA	12.00	15.83	190.00	8.462	7.04	6.765	0.865	134.490	9.726	1.373	0.491
2/4	NOCHE	12.00	15.83	190.00	8.378	7.97	4.497	0.850	80.253	9.375	0.861	0.441
3/4	DIA	2.00	15.00	30.00	8.208	1.16	4.228	0.773	80.482	8.796	0.877	0.420
3/4	NOCHE	10.50	15.71	165.00	8.241	7.01	5.223	0.631	93.347	7.589	0.945	0.293
4/4	DIA	12.00	15.83	190.00	8.187	7.36	6.154	0.993	116.013	8.507	1.314	0.662
4/4	NOCHE	12.00	15.83	190.00	8.124	8.36	5.963	0.806	103.522	7.559	1.055	0.466
5/4	DIA	12.00	15.83	190.00	8.047	10.08	6.071	0.874	86.328	6.578	1.157	0.525
5/4	NOCHE	12.00	15.83	190.00	8.164	9.42	6.907	0.962	106.386	7.836	1.229	0.569
6/4	DIA	12.00	15.83	190.00	8.139	8.08	3.826	1.139	66.118	10.865	0.802	0.666
6/4	NOCHE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7/4	DIA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7/4	NOCHE	12.00	15.83	190.00	8.204	8.15	4.660	0.507	79.733	6.118	0.983	0.232
8/4	DIA	12.00	15.83	190.00	8.150	7.09	4.460	1.243	86.261	10.020	0.999	0.871
8/4	NOCHE	9.00	15.78	142.00	7.844	3.93	4.382	0.824	114.581	11.359	0.975	0.499
9/4	DIA	5.50	15.45	85.00	7.920	4.06	5.240	0.838	80.067	7.792	1.144	0.457
9/4	NOCHE	12.00	15.83	190.00	8.152	10.35	7.157	1.122	100.498	9.238	1.273	0.610
10/4	DIA	12.00	15.83	190.00	8.034	8.07	7.654	1.056	135.079	8.063	1.482	0.716
10/4	NOCHE	12.00	15.83	190.00	8.365	7.19	6.668	0.914	132.102	9.250	1.267	0.555
11/4	DIA	12.00	15.83	190.00	8.142	8.08	6.062	0.765	103.814	6.940	1.316	0.465
11/4	NOCHE	12.00	15.00	180.00	7.944	6.55	6.523	0.611	133.978	8.219	1.276	0.297

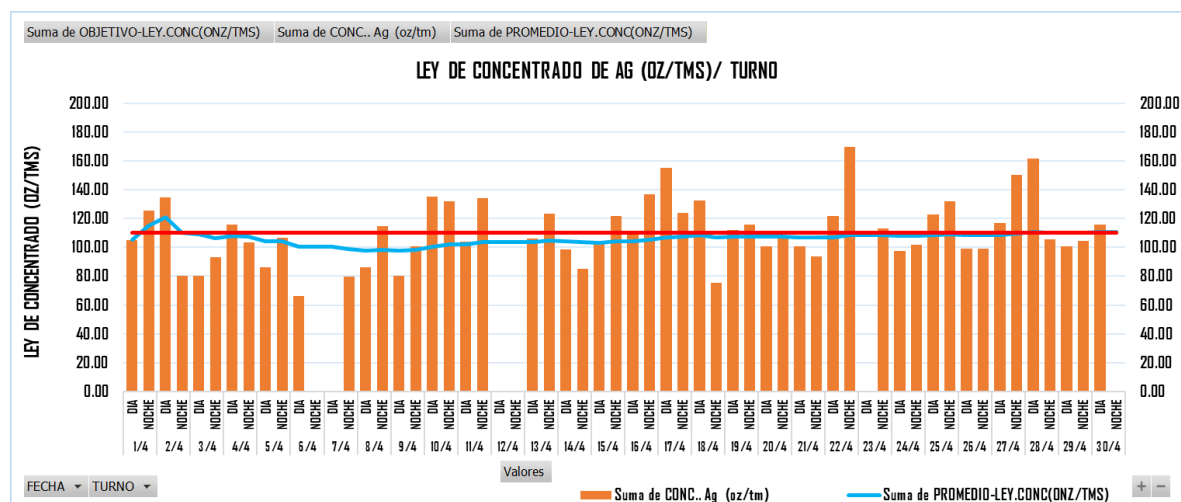
Anexo 4 Leyes y recuperación de plata

FINOS (Onz)						RECUPERACION (%)		RATIO- REALI ZADO
CABEZA		CONCENTRADO		RELAVES		EJCUTADA		
Finos_Cab, Ag (Onz)	Finos_Cab, Au (gr)	Finos_Conc. Ag (Onz)	Finos_Conc.. Au (gr)	Finos_Rlv.. Ag (Onz)	Finos_Rlv. Au (gr)	Rec. Ag (%)	Rec. Au (%)	RATIO
1,116.10	127.90	909.94	66.28	206.15	61.61	81.53	51.83	19.61
1,159.81	159.65	960.98	81.05	198.88	78.60	82.85	50.77	22.17
1,176.50	150.48	947.35	68.51	229.17	81.98	80.52	45.53	24.69
782.90	147.94	639.85	74.75	143.05	73.19	81.73	50.53	21.83
116.44	21.29	93.28	10.19	23.13	11.09	80.13	47.90	23.76
790.76	95.47	654.36	53.20	136.40	42.28	82.75	55.72	21.60
1,073.59	173.31	854.09	62.63	219.55	110.69	79.55	36.14	23.70
1,040.89	140.72	865.65	63.21	175.28	77.52	83.16	44.92	20.88
1,060.71	152.70	870.27	66.31	190.46	86.39	82.05	43.43	17.33
1,205.19	167.86	1,002.37	73.83	202.87	93.92	83.17	44.01	18.52
667.77	198.80	534.30	87.80	133.50	110.86	80.01	44.20	21.60
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
812.82	88.45	649.42	49.83	163.39	38.62	79.90	56.34	21.41
778.42	216.89	611.16	70.99	167.23	145.90	78.52	32.73	24.63
573.45	107.89	449.73	44.58	123.73	63.30	78.43	41.33	33.34
410.14	65.59	325.23	31.65	84.90	33.94	79.30	48.26	19.27
1,249.03	195.77	1,040.06	95.60	209.01	100.17	83.27	48.83	16.86
1,337.47	184.45	1,090.49	65.09	247.01	119.36	81.53	35.29	21.64
1,160.95	159.16	949.42	66.48	211.53	92.68	81.78	41.77	24.23
1,058.02	133.48	838.92	56.08	219.13	77.40	79.29	42.02	21.60
1,080.93	101.19	877.83	53.85	203.13	47.34	81.21	53.22	25.29
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
789.25	111.74	652.75	44.67	136.51	67.07	82.70	39.98	22.47
1,103.80	89.44	887.17	39.87	216.66	49.57	80.37	44.58	24.28
1,002.56	142.70	812.35	61.11	190.19	81.58	81.03	42.83	21.14
902.61	128.00	730.39	55.93	172.23	72.07	80.92	43.69	20.33
1,088.16	117.99	890.89	59.42	197.29	58.57	81.87	50.36	20.21

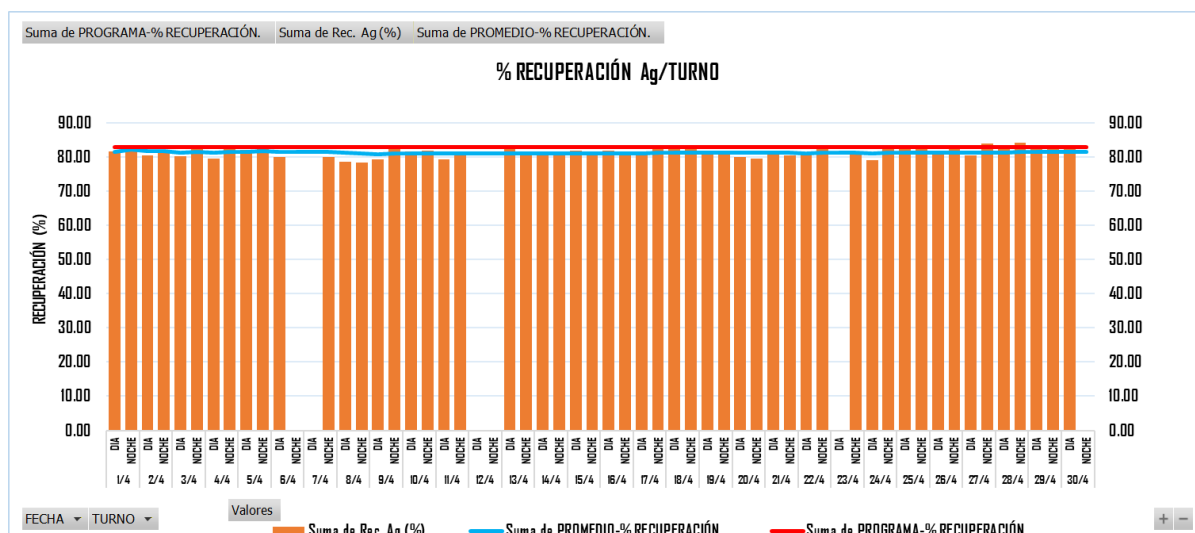
Anexo 5 Variación de la ley de plata en cabeza



Anexo 6 Variación de ley de concentrado de plata



Anexo 7 Variación de la recuperación de plata



Anexo 8 Variación de la ley de plata en el relave

