



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



FLOTACIÓN CON HIDROXAMATO EN MINERALES MIXTOS
DE COBRE PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE
CONCENTRADOS DE COBRE EN LA EMPRESA MINERA
SILVER MINSPERU S.A.C.-Puno.

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. EMERSON DANILO MOLINA TACCA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGISTA

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

FLOTACIÓN CON HIDROXAMATO EN MINERALES MIXTOS DE COBRE PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE CONCENTRADOS

AUTOR

EMERSON DANILO MOLINA TACCA

RECuento DE PALABRAS

45066 Words

RECuento DE CARACTERES

234634 Characters

RECuento DE PÁGINAS

228 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

6.7MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 20, 2024 3:26 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 20, 2024 3:28 PM GMT-5

● **16% de similitud general**

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

- 16% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

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


ASESOR DE TESIS

Omar L. Molina Cordón
INGENIERO METALURGISTA
CIP: 82582



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



DEDICATORIA

A dios por permitirme culminar con éxito
mi tan anhelada carrera, darme buena salud
y fortaleza en todo momento.

Con mucho aprecio a mi madre Sonia Tacca
por los consejos y valores que me ha
inculcado para ser mejor persona, y a mi
padre Victor Molina que desde el cielo me
sigue cuidando y guiando mis pasos.

A mis hermanos Rita, Victor Hugo y Diana
por su apoyo incondicional a lo largo de mi
trayectoria académica. Su aliento y
motivación fueron esenciales para alcanzar
este logro tan importante en mi vida.



AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater la UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO, en especial a la escuela profesional de INGENIERIA METALURGICA por la formación profesional y personal.

A la plana de docentes de la escuela profesional de INGENIERIA METALURGICA, por todas sus enseñanzas y valores que me inculcaron en mi formación profesional.

Al Ing. Alberto Maquera por su asesoría y constante apoyo para que este proyecto sea exitoso.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	18
ABSTRACT	19
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
1.2.1 Problema general.....	23
1.2.2 Problema específico	23
1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
1.3.1 Hipótesis General.....	24
1.3.2 Hipótesis Específicas	24
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	24
1.4.1 Justificación Teórica	25
1.4.2 Justificación Práctica.....	26
1.4.3 Justificación Económica	26
1.4.4 Justificación Social	26
1.4.5 Beneficiarios	26



1.5	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
1.5.1	Objetivo General.....	27
1.5.2	1.5.2. Objetivos Específicos.....	27

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1	ANTECEDENTES.....	28
2.1.1	Internacionales	28
2.1.2	Nacionales.....	39
2.1.3	Locales	43
2.2	CONCENTRACIÓN Y FLOTACIÓN	46
2.2.1	Flotación	46
2.2.2	Elementos de la Flotación.....	48
2.2.2.1	Sólido	49
2.2.2.2	2.2.2.2. Agua.....	57
2.2.2.3	Aire	59
2.2.3	Fases e Interfases en Flotación.....	60
2.2.3.1	Interfase gas – líquido.....	60
2.2.3.1.1	El Fenómeno de adsorción	65
2.2.3.2	La Interfase sólido – líquido	69
2.2.4	Interacción fisicoquímica entre mineral y colector.....	71
2.2.4.1	Adsorción física	71
2.2.4.2	Doble Capa eléctrica.....	72
2.2.4.3	Carga superficial	73
2.2.4.4	Potencial Electroquímico	75
2.2.4.5	Potencial Z.....	78



2.2.4.5.1	Potencial Electrocinético de los Minerales Sulfurados	87
2.2.4.6	Adsorción química	90
2.2.5	Contacto de Tres Fases	90
2.2.6	Ángulo de contacto	92
2.2.7	Histéresis de mojabilidad	94
2.2.8	Parámetros operacionales en flotación	97
2.2.9	Pruebas de flotación	100
2.2.9.1	Pruebas de Ciclo o Pruebas de Flotación de Ciclo Cerrado ("Locked Cycle Flotation Tests")	102
2.2.9.2	Pruebas continuas y de planta piloto	103
2.2.10	Tiempo de residencia y cinética de flotación	105
2.2.10.1	Modelo de Agar	107
2.2.10.2	Modelo de Kelsall	107
2.2.10.3	Modelo de Meyer y Klimpel (1984)	108
2.2.11	Eficiencia de separación	111
2.2.12	Evaluación de procesos de flotación	112
2.2.13	Diseño de circuitos de flotación	113
2.2.14	Reactivos de Flotación	115
2.2.14.1	Clasificación de los Reactivos	116
2.3	TEORÍA DE LA FLOTACIÓN DE ÓXIDOS	121
2.3.1	Flotación por espumas	121
2.3.1.1	Flotación bulk	122
2.3.1.2	Flotación Selectiva	123
2.3.2	Fundamento técnico de la flotación de óxidos	124



2.3.3	Química del proceso de flotación de óxidos	127
2.3.4	El hidroxamato.....	127
2.3.5	Diagrama de Flujos de Flotación de Óxidos	129

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO	131
3.1.1	Generalidades.....	131
3.1.2	Ubicación y acceso.....	131
3.1.2.1	Ubicación política	131
3.1.2.2	Ubicación geológica	131
3.1.2.3	Ubicación de componentes de la planta concentradora:	132
3.1.3	Descripción de la actividad.....	133
3.1.3.1	Características de mineral a procesar.....	133
3.1.3.2	Descripción de actividad de beneficio	133
3.1.3.3	Distribución de la planta concentradora	134
3.1.3.4	Requerimiento de energía	134
3.2	OPERACIONES UNITARIAS EN LA PLANTA CONCENTRADORA	135
3.2.1	Cancha de minerales	135
3.2.2	Área de chancado.....	136
3.2.2.1	Tolva de gruesos	136
3.2.2.1.1	Determinación de la gravedad específica	137
3.2.2.1.2	Volumen de la tolva:	137
3.2.2.2	Parrilla estática (Grizzly).....	138
3.2.2.3	Chancadora de quijadas (9" x 12")	138
3.2.2.4	Faja transportadora que alimenta a la tolva de finos	139



3.2.2.5	Tolva de finos.....	140
3.2.3	Área de molienda	140
3.2.3.1	Faja transportadora del molino	140
3.2.3.2	Molino de bolas 4 x 4 COMESA.....	141
3.2.3.3	Molino de bolas secundario 3 x 4 (remolienda)	142
3.2.3.4	Clasificador helicoidal	143
3.2.4	Área de flotación.....	143
3.2.4.1	Cochas de filtración y cochas de recuperación.....	144
3.2.5	Deposición del relave.....	146
3.3	FLOW SHEET DE LA PLANTA	146
3.4	MATERIALES Y EQUIPOS DE LABORATORIO.....	146
3.4.1	Materiales.....	146
3.4.2	Equipos	147
3.4.3	Reactivos.....	148
3.4.4	Equipos de Protección.....	148
3.5	PROCEDIMIENTO PARA LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN	148
3.5.1	Muestreo en cancha de mineral.....	149
3.5.2	Chancado y Zarandeo.....	151
3.6	HOMOGENIZACIÓN Y PARTICIÓN DE MUESTRAS	152
3.6.1	Muestreo por paleo fraccionario	153
3.7	DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CINÉTICA DE MOLIENDA	154
3.8	CARGA DE BOLAS Y VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL MOLINO DE LABORATORIO	155
3.8.1	Carga de bolas.....	156



3.8.2	Volumen del molino	157
3.8.3	Velocidad crítica del molino	158
3.8.4	Velocidad de operación del molino	158
3.9	PRUEBAS DE FLOTACIÓN	160
3.10	METODOLOGIA.....	163
3.10.1	Formulación del diseño experimental	163
3.10.2	Análisis estadístico.....	164
3.10.2.1	Diseño factorial 2k.....	165
3.10.2.2	Evaluación de las variables por diseño experimental	166
3.10.2.3	Variables del proceso	167
CAPÍTULO IV		
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
4.1	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN A NIVEL LABORATORIO Y EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE FLOTACIÓN	171
4.2	RESULTADOS ESTADÍSTICO DE LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN	183
4.2.1	Efectos estimados para el porcentaje de recuperación.....	184
4.2.2	Análisis de varianza para porcentaje de recuperación de cobre.....	187
4.2.3	Coefficiente de regresión para porcentaje de recuperación.....	192
4.2.4	Grado de confianza	197
4.2.5	Matriz de correlación para los efectos estimados	199
4.2.6	Resultados estimados para porcentaje de recuperación	201
4.2.7	Camino de máximo ascenso para porcentaje de recuperación.....	205
4.2.8	Optimizar respuesta.....	208
V.	CONCLUSIONES	209



VI. RECOMENDACIONES..... 210

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 211

ANEXOS 216

Área: Metalurgia Extractiva

Tema: Procesos

Fecha de sustentación: 21 de agosto del 2024



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes de un proceso de flotación de espuma.	48
Figura 2. Interpretación esquemática del origen de la tensión superficial.	63
Figura 3. La tensión superficial es el costo energético asociado a incrementar en una unidad el área de interfase.	65
Figura 4. Fenómeno de adsorción de materias tensoactivas.	67
Figura 5. El carácter del sólido y de la concentración de la solución acuosa.	71
Figura 6. Formación de la doble capa de cargas eléctricas.	78
Figura 7. Potencial Z versus pH.	83
Figura 8. Potencial Zeta.	85
Figura 9. Representación del potencial de superficie y potencia Z.	86
Figura 10. Definición del ángulo de contacto.	92
Figura 11. Ángulos de contacto en sólidos de distintas mojabilidades.	94
Figura 12. Fenómeno de histéresis de mojabilidad.	95
Figura 13. Histéresis de mojabilidad en partículas minerales.	97
Figura 14. Flujograma para el desarrollo de flotación de sulfuros.	105
Figura 15. Circuito de flotación convencional.	115
Figura 16. Clasificación de Colectores de Flotación.	118
Figura 17. Formula general Hidroxamato.	128
Figura 18. Formula general del Tautómero Hidroxamato.	128
Figura 19. Diagrama de Flotación de CuO.	129
Figura 20. Diagrama de Flujo de Flotación CuS y Flotación de CuO	130
Figura 23. Se observa la cocha de concentrado de Pb de la Planta San Carlos.	145
Figura 24. Se observa la cocha de concentrado de Cu de la Planta San Carlos.	145



Figura 25. Esquema de preparación de la muestra.....	152
Figura 26. Obtención de cúmulos mediante paleo fraccionario.....	154
Figura 27. Molino de laboratorio experimental.	155
Figura 28. % Acumulado de malla -200 Vs Tiempo.	160
Figura 29. Representación Geométrica de 2^3 (medias de los datos).	170
Figura 30. Grafica de Efectos principales.....	185
Figura 31. Grafica de Interacción.....	186
Figura 32. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	189
Figura 33. Normalidad de efectos estandarizados.....	191
Figura 34. Gráfica de efectos principales para % Recuperación Cu Vs Tiempo de Flotación.....	194
Figura 35. Gráfica de efectos principales para % Recuperación Cu Vs Granulometría.....	195
Figura 36. Gráfica de efectos principales para % Recuperación Cu Vs HOP.....	196
Figura 37. Gráfica de matriz de HOP (Kg/Tn); Granulometría (% -200); Tiempo Flot (min) IC de 95% para la correlación de Pearson.....	200
Figura 38. Gráfica de superficie de % Recuperación vs. Granulometría; HOP (Kg/Tn).	203
Figura 39. Gráfica de superficie de % Recuperación vs. Tiempo Flotación; HOP (Kg/Tn).	204
Figura 40. Gráfica de superficie de % Recuperación vs. Tiempo Flotación; Granulometría.....	204
Figura 41. Gráfica de contorno de % Recuperación vs. Granulometría; HOP (Kg/Tn).	206



Figura 42. Gráfica de contorno de % Recuperación vs. Tiempo Flotación; HOP (Kg/Tn).

..... 207

Figura 43. Gráfica de contorno de % Recuperación vs. Granulometría; Tiempo

Flotación..... 207



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Coordenada de la concesión minera Metálica ANDEAN 1107.	132
Tabla 2 Ubicación de Componentes de la Planta Concentradora.	132
Tabla 3 Requerimiento de Energía.	135
Tabla 4 Pruebas de Determinación de Gravedad Especifica.	137
Tabla 5 Características de la Chancadora de Quijada.	139
Tabla 6 Características de la faja transportadora N° 1.	139
Tabla 7 Características de la faja transportadora N° 2.	141
Tabla 8 Características del Molino COMESA 4' x 4'	142
Tabla 9 Características del Molino de Bolas Secundario COMESA 3' X 4'.	142
Tabla 10 Características del Clasificador Helicoidal 16' * 15" Ø.	143
Tabla 11 Características del molino de bolas de laboratorio.	155
Tabla 12 Características del molino de bolas de laboratorio.	157
Tabla 13 Características del molino de bolas de laboratorio.	159
Tabla 14 Datos naturales y codificadas para las pruebas experimentales.	168
Tabla 15 Variables en escala codificada para las pruebas experimentales.	169
Tabla 16 Variables en escala natural para las pruebas experimentales.	170
Tabla 17 Prueba N°01 de la flotación.	172
Tabla 18 Balance metalúrgico de la prueba N°01.	172
Tabla 19 Prueba N°02 de la flotación.	173
Tabla 20 Balance metalúrgico de la prueba N°02.	173
Tabla 21 Prueba N°03 de la flotación.	174
Tabla 22 Balance metalúrgico de la prueba N°03.	174
Tabla 23 Prueba N°04 de la flotación.	175



Tabla 24	Balance metalúrgico de la prueba N°04.	175
Tabla 25	Prueba N°05 de la flotación.	176
Tabla 26	Balance metalúrgico de la prueba N°05.	176
Tabla 27	Prueba N°06 de la flotación.	177
Tabla 28	Balance metalúrgico de la prueba N°06.	177
Tabla 29	Prueba N°07 de la flotación.	178
Tabla 30	Balance metalúrgico de la prueba N°07.	178
Tabla 31	Prueba N°08 de la flotación.	179
Tabla 32	Balance metalúrgico de la prueba N°08.	179
Tabla 33	Prueba N°09 de la flotación.	180
Tabla 34	Balance metalúrgico de la prueba N°09.	180
Tabla 35	Prueba N°10 de la flotación.	181
Tabla 36	Balance metalúrgico de la prueba N°10.	181
Tabla 37	Prueba N°11 de la flotación.	182
Tabla 38	Balance metalúrgico de la prueba N°11.	182
Tabla 39	Resultado del cálculo de efectos.	185
Tabla 40	Análisis de varianza (ANOVA).	189
Tabla 41	Análisis de T-Student.	191
Tabla 42	Coefficiente de regresión.	192
Tabla 43	Grado de confianza.	197
Tabla 44	Correlación de efectos.	200
Tabla 45	Correlaciones en parejas de Pearson.	200
Tabla 46	Resultados usando el modelo matemático.	201
Tabla 47	Máximo ascenso.	205
Tabla 48	Rango de Valores.	208



ACRÓNIMOS

%	:	Porcentaje
°C	:	Grados centígrados
µm	:	Micra
Bar	:	Unidad de presión
Cal	:	Caloría
cal/°K	:	Caloría por grado kelvin
Cal/g	:	Caloría por gramo
cm²	:	Centímetro cuadrado
cm²/seg	:	Centímetro cuadrado por segundo
cm³	:	Centímetro cúbico
Cu	:	Cobre
g/L	:	Gramo por litro
g	:	Gramos
g/Tn	:	Gramos por tonelada
Kg/TM	:	Kilo gramo por tonelada métrica
g/TMS:		Gramos por tonelada métrica seca
g/lt	:	Gramos por litro
Kg	:	Kilogramo
Cc	:	Centímetro cubico
pH	:	Potencial de hidrogeno
t/h	:	Toneladas por hora
TM	:	Toneladas métricas
TMS	:	Tonelada métrica seca
TMH/día	:	Tonelada métrica por día
ml	:	Mililitro
SC	:	Suma de cuadrados
-200	:	Pasante malla 200
g/cm³	:	Gramo por centímetro cúbico
p. p. m:		Partes por millón



RESUMEN

La presente investigación se centra en la flotación de minerales mixtos de cobre y mejora en la recuperación de concentrados de cobre, considerando las variables más influyentes en dicho proceso, se llevó a cabo en la planta concentradora San Carlos de dicha empresa minera, ubicada en el Distrito de Paratia, provincia de Lampa, región de Puno. El objetivo de esta investigación es evaluar el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre mediante la determinación de la dosificación del colector Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP), con el propósito de mejorar la recuperación de concentrados de cobre. Para lograr esto, se evaluaron los parámetros de operación óptimos, incluyendo la dosificación del HOP, la granulometría y el tiempo de flotación. El nivel y diseño es de enfoque cuantitativo, mediante un diseño experimental factorial 2^3 . Se llevaron a cabo 8 pruebas experimentales en el laboratorio, cada una con tres réplicas en el punto central. Se consideraron tres factores y dos niveles para cada uno: la dosificación del colector HOP (de 0.26 kg/Tn a 0.82 kg/Tn), la granulometría (de 65% a 80% # -200) y el tiempo de flotación (de 16 min a 30 min). Los resultados mostraron que la dosificación óptima del HOP fue de 0.82 kg/Tn, con una granulometría del 79.31% a través de la malla -200 y un tiempo de flotación de aproximadamente 30 minutos en diversas etapas del proceso. Concluyendo, en un modelo matemático completo del proceso de flotación de minerales mixtos de cobre, indicando que el HOP contribuyó significativamente a la recuperación de cobre en concentrados. La recuperación de cobre alcanzó un porcentaje esperado de aproximadamente 96.66%, lo que impulsó a una posible expansión de la Planta Concentradora.

Palabras Clave: Flotación, Granulometría, Hidroxamato, Oxidos mixtos, Recuperación.



ABSTRACT

The present research focuses on the flotation of mixed copper minerals and improvement in the recovery of copper concentrates, considering the most influential variables in said process, it was carried out in the San Carlos concentrator plant of said mining company, located in the Paratia District, Lampa province, Puno region. The primary objective of this research was to evaluate the flotation process of mixed copper minerals by determining the dosage of the Potassium Octyl Hydroxamate (HOP) collector, with the purpose of improving the recovery of copper concentrates. To achieve this, the optimal operating parameters were evaluated, including HOP dosage, granulometry and flotation time. The methodology is within the quantitative approach, through a 23 factorial experimental design. 8 experimental tests were carried out in the laboratory, each with three replications at the central point. Three factors and two levels for each were considered: the dosage of the HOP collector (from 0.26 kg/Tn to 0.82 kg/Tn), the granulometry (from 65% to 80% # -200) and the flotation time (from 16 min to 30 min). The results showed that the optimal dosage of HOP was 0.82 kg/Tn, with a granulometry of 79.31% through the -200 mesh and a flotation time of approximately 30 minutes in various stages of the process. Concluding, in a complete mathematical model of the flotation process of mixed copper ores, indicating that the HOP contributed significantly to the recovery of copper in concentrates. Copper recovery reached an expected percentage of approximately 96.66%, which prompted a possible expansion of the Concentrator Plant.

Keywords: Flotation, Hydroxamate, Mixed oxides, Particle size distribution, Recovery.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La flotación es un proceso utilizado para concentrar minerales valiosos presentes en minerales complejos y de baja ley. Es ampliamente utilizada en la industria minera para este propósito. Sin embargo, cuando la ley de los minerales es muy baja debido al agotamiento de las reservas minerales, los ingenieros de procesamiento de minerales se enfrentan a desafíos técnicos y económicos, como un aumento de impurezas y una disminución en la ley de los minerales valiosos, lo que requiere operaciones con mayor tonelaje para ser rentables. Por lo tanto, la tendencia mundial en la industria de procesamiento de minerales es optimizar todos los procesos involucrados, incluida la flotación. Este proceso implica la utilización de equipos, reactivos químicos y operaciones, cada uno de los cuales debe optimizarse utilizando metodologías y técnicas adecuadas (Turpo Cahuana, 2019).

La optimización de la flotación implica cuantificar el rendimiento del proceso mediante un modelo que relacione la recuperación y/o ley de los minerales valiosos con las variables controlables del proceso. Sin embargo, en la flotación, cada variable considerada carece de independencia debido a las interacciones entre ellas, lo que requiere una estrategia cuidadosa en el diseño de pruebas experimentales para identificar estas interacciones, debido al alto costo de los ensayos de flotación, es crucial obtener resultados precisos con la menor cantidad de pruebas experimentales posible. Sin embargo, aplicar la flotación en el tratamiento de óxidos presenta desafíos debido a las diferencias en la recuperación en comparación con los sulfuros. El proceso convencional implica la activación superficial del mineral mediante sulfidización, pero debido a las bajas recuperaciones obtenidas, se han explorado métodos operativos adicionales para



mejorar la eficiencia del proceso, lo que aumenta la complejidad y la necesidad de control adicional (Taco Chavez, 2022).

En términos generales, los métodos de flotación para minerales oxidados se dividen en dos categorías: flotación directa utilizando colectores de cadena larga de carbón y flotación con colectores tipo xantato después de una sulfurización previa, el proceso implica un análisis de factores físico-químicos y termodinámicos, aplicados prácticamente a minerales complejos que contienen cuprita, malaquita, tenorita, y otros minerales durante su fractura. La adsorción de moléculas de agua en la superficie crea grupos hidróxilo, volviendo la superficie más hidrofílica en comparación con los sulfuros. Esto dificulta la adherencia de burbujas de aire a las superficies hidrofílicas (Campusano et al., 2017).

La concentración de grupos hidróxilo en la superficie de minerales oxidados es crucial, ya que promueven el crecimiento de capas de moléculas de agua adsorbidas, lo que afecta la humectación y la adsorción. Cambiar estas condiciones en la interfaz mineral/agua es esencial para la flotación, pero puede ser difícil de lograr en minerales oxidados, el proceso de investigación consta de dos fases principales: la primera, recopilación de información sobre minerales oxidados de cobre y su comportamiento en la flotación; la segunda, aplicación de experimentos a un mineral complejo que contiene cuprita, tenorita y malaquita. Esto implica caracterizar la muestra, calcular el índice de trabajo (W_i), y evaluar esquemas de tratamiento metalúrgico (Morelly Osorio, 2022).

La flotación bulk es una opción viable para obtener altas leyes y recuperaciones de cobre en el concentrado. Sin embargo, los minerales oxidados son más difíciles de flotar que los sulfuros, debido a su alta hidratación, lo que ha generado la necesidad de explorar nuevas alternativas de tratamiento para abordar una disminución en la



recuperación de cobre. El mineral utilizado en las pruebas de flotación contiene un 0.412% de cobre y un 0.105% de cobre soluble en ácido, lo que representa aproximadamente un 26% de cobre oxidado (Assis et al., 2000).

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria minera del cobre es fundamental para la economía peruana, generando importantes ingresos y empleos. Sin embargo, la extracción y procesamiento de minerales de cobre presentan desafíos, como la baja ley de los minerales y la presencia de minerales no deseados. La flotación es una técnica de separación por espuma que se utiliza ampliamente para recuperar cobre a partir de estos minerales mixtos.

La empresa minera SILVER MINSPERU S.A.C., ubicada en Puno, enfrenta desafíos significativos en cuanto a la recuperación de concentrados de cobre a partir de minerales mixtos en su planta concentradora San Carlos. A pesar de los avances en tecnología y métodos de flotación, la eficiencia en la recuperación de cobre de estos minerales mixtos ha sido subóptima. Esto se debe a una serie de factores, incluida la complejidad mineralógica de los minerales mixtos de cobre presentes en la mena, que incluyen cupritas, malaquitas y tenoritas, entre otros. Además, la baja ley de los minerales y la presencia de impurezas han contribuido a la disminución de la eficiencia en el proceso de flotación.

La flotación convencional de minerales mixtos de cobre presenta limitaciones en la recuperación de cobre, especialmente en minerales de baja ley y con presencia de minerales gangosos. Esto se traduce en pérdidas de cobre y una menor eficiencia del proceso, afectando la rentabilidad de la empresa minera Silver Minsperu S.A.C.-Puno.

La investigación se enfocará en la evaluación de la flotación con hidroximato en minerales mixtos de cobre de la empresa minera Silver Minsperu S.A.C.-Puno,



considerando variables como el tipo de hidroximato, su concentración, el pH de la solución, el tiempo de flotación y la granulometría del mineral. No se abordarán otros aspectos del proceso de flotación, como la pre-flotación o la re-flotación.

Las limitaciones potenciales de la investigación incluyen la disponibilidad de muestras de minerales mixtos de cobre representativas de la operación minera, el acceso a equipos de laboratorio especializados y el tiempo necesario para realizar los experimentos y analizar los resultados.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema general

- ¿Cómo flotar con hidroxamato para mejorar la recuperación de concentrados de cobre a partir de minerales mixtos en la empresa minera SILVER MINSPERU S.A.C.-Puno?

1.2.2 Problema específico

- ¿Cuál es la dosificación del colector hidroxamato en la flotación para mejorar la recuperación de cobre?
- ¿Cuál es la granulometría más óptima para mejorar la recuperación de cobre?
- ¿Cuál es el tiempo de flotación más óptimo para mejorar la recuperación de cobre?



1.3 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Hipótesis General

- Flotando con hidroxamato mejora la recuperación de concentrados de cobre en la empresa minera SILVER MINSPERU S.A.C. - PUNO

1.3.2 Hipótesis Específicas

- Optimizando la dosificación del colector hidroxamato se logrará mejorar la recuperación de concentrados de cobre, a partir de minerales mixtos de cobre.
- Optimizando la granulometría se logrará mejorar la recuperación de concentrados de cobre, a partir de minerales mixtos de cobre.
- Optimizando el tiempo de flotación se logrará mejorar la recuperación de concentrados de cobre, a partir de minerales mixtos de cobre.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

La justificación para esta investigación es fundamental debido a su relevancia en la industria minera, específicamente en la empresa minera SILVER MINSPERU S.A.C.-Puno. La flotación es un proceso crucial para la recuperación de concentrados de cobre a partir de minerales mixtos, y su optimización puede tener un impacto significativo en la rentabilidad y competitividad de la empresa. Evaluar el proceso de flotación con el colector Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP) en la planta concentradora San Carlos permitirá determinar los parámetros óptimos de operación, incluyendo la dosificación del HOP, la granulometría y el tiempo de flotación.

El diseño experimental empleado en esta investigación garantiza la rigurosidad y confiabilidad de los resultados, al considerar múltiples variables y niveles para cada una.



Los hallazgos de este estudio no solo proporcionarán una dosificación óptima del HOP, sino que también permitirán comprender mejor el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre y su interacción con los parámetros operativos.

La obtención de un modelo matemático completo del proceso de flotación brindará información valiosa sobre cómo el HOP contribuye a la recuperación de cobre en los concentrados. Además, alcanzar una disolución de cobre cercana al 96.66% tiene implicaciones económicas significativas, ya que puede conducir a un incremento en los ingresos de la empresa y favorecer el beneficio social al generar más empleo y desarrollo en la región.

En última instancia, los resultados de esta investigación podrían respaldar la expansión de la Planta de tratamiento de minerales, lo que podría tener un impacto positivo en la capacidad de producción y en la posición competitiva de la empresa en el mercado minero. Por lo tanto, esta investigación es crucial para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las operaciones mineras de SILVER MINSPERU S.A.C.-Puno.

1.4.1 Justificación Teórica

- La flotación es un proceso fundamental en la industria minera para separar minerales valiosos de impurezas.
- Los hidroxamatos son colectores ampliamente estudiados y utilizados en la flotación de minerales de cobre debido a su selectividad y eficacia.
- Investigar su aplicación específica en minerales mixtos de cobre contribuirá al conocimiento científico y a la optimización de procesos metalúrgicos.



1.4.2 Justificación Práctica

- La empresa Minera Silver Minsperu S.A.C. enfrenta desafíos en la recuperación de concentrados de cobre.
- Implementar hidroxamatos podría aumentar la eficiencia de recuperación y, por ende, la rentabilidad de la empresa.
- La investigación práctica permitirá evaluar la viabilidad técnica y operativa de esta mejora.

1.4.3 Justificación Económica

- Mejorar la recuperación de concentrados de cobre tiene un impacto directo en los ingresos de la empresa.
- Reducir las pérdidas de mineral valioso aumenta la rentabilidad y la competitividad en el mercado.

1.4.4 Justificación Social

- La minería es una fuente importante de empleo en la región de Puno.
- Si Minera Silver Minsperu S.A.C. optimiza sus procesos, podría mantener y crear más puestos de trabajo.
- Además, una minería más sostenible beneficia a las comunidades locales y al medio ambiente.

1.4.5 Beneficiarios

- La empresa Minera Silver Minsperu S.A.C. se beneficiará directamente al mejorar su eficiencia y rentabilidad.



- Los trabajadores, sus familias y la comunidad local se beneficiarán al mantener empleos y promover el desarrollo económico.
- A nivel científico, otros investigadores y empresas mineras podrán aprender de los resultados y aplicarlos en sus operaciones.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivo General

- Flotar con hidroxamato mejora la recuperación de concentrados de cobre en la empresa minera SILVER MINSPERU S.A.C.-Puno.

1.5.2 1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar la dosificación del colector hidroxamato en el proceso de flotación para mejorar la recuperación de cobre.
- Determinar la granulometría más óptima para mejorar la recuperación de cobre.
- Determinar el tiempo de flotación más óptimo para mejorar la recuperación de cobre.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Internacionales

Los hidroxamatos alquílicos son colectores bien conocidos para los minerales de cobre oxidado, como lo demuestra la gran cantidad de literatura publicada. Nuestros estudios en una amplia variedad de yacimientos de cobre de todo el mundo han demostrado que los hidroxamatos alquílicos recuperarán la mayoría de los minerales de cobre oxidado "flotables" de un yacimiento. Están disponibles comercialmente y ofrecen muchas ventajas sobre las tecnologías alternativas para la recuperación de cobre oxidado. A pesar de esto, la industria no ha explotado todo el potencial de los hidroxamatos. El objetivo de este artículo es proporcionar aspectos prácticos y directrices relevantes para facilitar la aplicación exitosa de hidroxamatos en plantas operativas. Un análisis crítico de la información y los datos disponibles, basado en varios casos de estudio, pruebas de flotación y análisis microscópicos, indica que los hidroxamatos alquílicos pueden recuperar eficazmente minerales de cobre oxidado bien definidos, pero no las ocurrencias de cobre como la goethita con cobre (a menudo mal identificada como cuprita) que se reportan como cobre soluble en ácido en los ensayos químicos. Antes de cualquier prueba de flotación con hidroxamatos, es necesario evaluar los diversos modos de ocurrencia del cobre soluble en ácido mediante análisis microscópico y de microprobe. (J. S. Lee et al., 1998)

Tras una revisión crítica del uso de reactivos quelantes (hidroxamatos) en la flotación de minerales, se presentan los resultados de una serie de experimentos



realizados en presencia de un hidroxamato comercial experimental como colector, a escala de laboratorio con dos minerales diferentes y en una célula de microflotación con varias combinaciones de minerales (la mayoría de ellos "moderadamente solubles"). La conclusión es que la selectividad de la flotación de minerales con hidroxamatos depende del equilibrio entre la solubilidad del mineral y la estabilidad del complejo formado con el catión de la red cristalina. Se visualiza una condición favorable para la utilización selectiva de los hidroxamatos como colectores si el mineral a flotar es el más soluble del sistema y el quelato formado entre el catión de la red y el hidroxamato es el más estable. (Assis et al., 2000)

Ausmelt suministra cantidades comerciales del colector de flotación de hidroxamato alquílico AM28 para la flotación de minerales de base de óxido y supergénicos. El AM28 es un producto no peligroso que se utiliza como una solución al 10 % al 50 % en hidróxido de potasio diluido. Es un colector selectivo para minerales de base de óxido u oxidados y reemplaza la sulfidización convencional en la flotación de minerales de óxido. En Radio Hill, el AM28 se utiliza junto con colectores de sulfuro tradicionales, lo que permite la flotación simultánea de minerales de cobre de óxido y sulfuro. La planta concentradora de cobre de Fox Resources en Radio Hill, cerca de Karratha, Australia Occidental, está configurada actualmente para tratar mineral de cobre supergénico extraído de la mina a cielo abierto West Whundo. Este depósito de cobre tipo VMS arqueano ha sido deformado y removilizado por la erosión y el clima, formando una zona supergénica significativa. Los minerales de cobre de sulfuro presentes en la zona superior son digenita y calcosina, con menor cantidad de calcopirita y covelina. Los minerales de cobre de óxido presentes incluyen cuprita, con menor cantidad



de malaquita y azurita. Los minerales de ganga incluyen cuarzo, talco y clorita. Los ensayos en planta en Radio Hill se realizaron con mineral supergénico de West Whundo, donde el AM28 se agregó al circuito en aproximadamente 80 g/t. Los datos de la planta durante tres meses muestran que la recuperación de cobre aumentó consistentemente de alrededor del 50 % al 60 % a más del 70 % cuando se agregó el AM28. Esto se ha demostrado estadísticamente. La ley del concentrado fue consistente con y sin AM28, con aproximadamente un 22 % - 24 % de cobre. (K. Lee et al., 2007)

En su tesis para optar al título de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Méndez, E. (2009) investigó la “Flotación selectiva de enargita de un concentrado final de sulfuros de cobre de Collahuasi” en la Universidad de Chile. Los resultados indican que es posible desarrollar un procedimiento para limpiar el arsénico (As) de un concentrado de cobre (Cu), obteniendo un concentrado de Cu con bajo contenido de As, apto para la venta, y otro concentrado con alto contenido de Cu y 11% de As. Este último concentrado podría ser tratado mediante métodos hidrometalúrgicos, aunque esta opción no se exploró en el estudio. La prueba más eficiente de separación (definida en la Ecuación 19 del Capítulo 5) alcanzó una eficiencia relativa del 99% en la prueba A30, donde se modificó el tipo de reactivo de flotación. En esta prueba, la recuperación de As fue del 71,8%, la recuperación de Cu fue del 26,3% y la recuperación en peso fue del 21,3%. Las condiciones experimentales incluyeron una velocidad superficial de gas (J_g) de 0,45 cm/s, una velocidad de agitación (N_s) de 3,0 m/s, un porcentaje de sólidos en peso (C_p) del 17,4% y un pH de 8. Se utilizaron 15 g/t del colector AP 3418, 7,5 g/t del colector MX 7016 y 15 g/t del espumante F 501. (Méndez Muñoz, 2009)



La mina Minto de Sherwood Copper, ubicada en Yukón, Canadá, procesa un depósito de alta calidad de cobre y oro. El mineral extraído proviene de un depósito primario de sulfuro de cobre con depósitos adicionales de óxidos de cobre. En colaboración con Ausmelt Chemicals, Minto está investigando opciones para recuperar minerales de óxido y sulfuro de cobre mediante flotación, mezclando su mineral de sulfuro primario con minerales de óxido. Los resultados indican que el uso de hidroxamatos de n-octilo junto con colectores de sulfuro tradicionales permite recuperar con éxito sulfuros y óxidos de cobre de minerales combinados. La recuperación de sulfuro de cobre no disminuyó al procesar el mineral combinado en comparación con el tratamiento del mineral de sulfuro de forma independiente. Con una mezcla de 70% de mineral de sulfuro y 30% de mineral de óxido, la recuperación de cobre fue tan alta como 95.5%. (K. Lee et al., 2009)

A fin de permitir la flotación de los minerales de cobre oxidados de baja ley de la Mina DongChuan, se emplea un colector de hidroxamato AM28 en conjunto con Xantato de Amonio de Pentilo (PAX). Se llevan a cabo una serie de pruebas de flotación a escala de laboratorio en lotes para los minerales de cobre oxidados con el fin de establecer la respuesta de flotación y la idoneidad de los colectores. De las pruebas de flotación rougher realizadas, la recuperación de cobre más alta obtenida es del 78.9% con un grado de concentrado del 2.5%, utilizando una dosis de AM28 de 740 g/t y una dosis de PAX de 20 g/t. Con una etapa de limpieza, el grado de cobre obtenido aumenta a 9.6% con una recuperación de cobre del 64.9%. (Xiong et al., 2013a)

Se está trabajando en el desarrollo de un diagrama de flujo de flotación optimizado para la recuperación de elementos de tierras raras (REE). El enfoque



inicial utilizaba fosfatos de alquilo y ésteres de ácido fosfórico como colectores para concentrar los minerales de REE. Para mejorar la recuperación de REE, se investigaron los hidroxamatos como colectores alternativos. En este trabajo, se reporta la microflotación de minerales de REE utilizando hidroxamatos de naftoilo, benzoilo y salicílico. A diferencia de los colectores de fosfato, la eliminación de limos no muestra un efecto significativo en la recuperación de REE cuando se usan hidroxamatos como colectores. Entre los tres hidroxamatos, la ley de La, Ce y Nd para los concentrados producidos por el hidroxamato salicílico es la más alta. La respuesta de recuperación con el hidroxamato de naftoilo es similar a la del hidroxamato salicílico; buenas leyes para La, Ce y Nd, menos efectivo para Nd, Y y Zr. Los datos indican una afinidad por parte de los hidroxamatos salicílico y naftoilo para las LREE sobre los minerales HREE. En comparación, el hidroxamato de benzoilo indicó una afinidad por Nd, Y y Zr. También se estudiaron los efectos de la temperatura en la recuperación de REE. La ley y la recuperación de REEs generadas por la flotación utilizando una mezcla de hidroxamatos de naftoilo y benzoilo a temperatura elevada fue casi idéntica a la recuperación utilizando una mezcla de hidroxamatos salicílico y benzoilo a temperatura ambiente. (Xia et al., 2014)

La aplicación de ácido hidroxámico como colectores de flotación está despertando un gran interés para la flotación selectiva de minerales de óxido, así como para mejorar los minerales de base oxidados y los minerales de metal. En la molécula de hidroxamato, tanto los átomos de O como los de N en el grupo -CONHOH se identifican como átomos de coordinación en muchos complejos, y su estructura característica determina la fuerza del complejo de quelación entre el hidroxamato y el ion metálico. Se ha estudiado el rendimiento quelante de los



hidroxamatos con metales de transición, incluyendo Cu, Ni, Zn, Fe, Cr, Mn y Co, los metales alcalinotérreos (Be, Ca) y los metales pesados (Pb). Cytec ha desarrollado y patentado una serie de hidroxamatos alquilados como colectores de flotación para sulfuros de metales de base oxidados, minerales de óxido de metal y metales preciosos. Este artículo presenta dos nuevas estructuras de colectores de hidroxamato (ciclohexilo y 4-terc-butylbencoil hidroxamatos) y evalúa sus características en comparación con los hidroxamatos alquilados y bencilo. Se realizaron pruebas de flotación a pequeña escala en laboratorio con ilmenita y wolframita. El uso de 4-terc-butyl bencilo hidroxamato resultó en un mejor rendimiento de flotación para la ilmenita. Se requirió una dosis relativamente baja de ciclohexilo hidroxamato en la flotación de wolframita para obtener resultados comparables a los hidroxamatos alquilados y bencilo. También se muestra un rendimiento de flotación significativamente mejorado con 4-terc-butyl bencilo hidroxamato en la flotación de minerales de ilmenita en comparación con los colectores de ácido oleico o ácido graso típicamente utilizados para la flotación de ilmenita. (Xia et al., 2015)

Los minerales de óxido de cobre, como la malaquita, no suelen responder bien a los colectores tradicionales de sulfuro de cobre y requieren esquemas alternativos de flotación. Se ha sugerido el uso de colectores de ácido hidroxámico para flotar directamente la malaquita; sin embargo, hay información limitada sobre el efecto de la estructura del reactivo en el rendimiento de estos colectores. Este artículo investigó el efecto de cinco hidroxamatos alquílicos y dos hidroxamatos aromáticos en la flotación de un mineral sintético compuesto por malaquita pura y cuarzo completamente liberado. Se utilizaron medidas del potencial zeta para comprender la adsorción del reactivo en la superficie de los



dos minerales. Luego, se evaluaron los colectores mediante resultados de flotación a escala de banco. Aunque las medidas del potencial zeta sugirieron que todos los colectores investigados se adsorben selectivamente en la superficie de la malaquita, solo el ácido benzohidroxámico y los hidroxamatos alquílicos C8 fueron colectores efectivos en la flotación de la malaquita. El ácido benzohidroxámico fue el más selectivo; sin embargo, se requirieron dosis significativamente más bajas de hidroxamatos alquílicos C8 para obtener recuperaciones similares de malaquita, con aumentos mínimos en la recuperación de cuarzo. Además, se examinaron el ácido benzo- y octilhidroxámico para la flotación de partículas finas ($-38 \mu\text{m}$). En los experimentos de flotación de partículas finas, también se investigó el efecto de la temperatura como un medio para mejorar el rendimiento de la flotación. (Marion et al., 2017)

Está bien documentado que la oxidación superficial de los minerales de sulfuro de cobre tiene efectos perjudiciales en su rendimiento de flotación. Sin embargo, se ha realizado poco trabajo para relacionar cuantitativamente la oxidación superficial con el rendimiento de la flotación, lo que dificulta inherentemente que las plantas de procesamiento optimicen las condiciones de flotación para minerales oxidados. En este estudio, se preparó una serie de muestras de calcopirita y calcosina oxidadas, y se llevó a cabo la caracterización de las especies de oxidación superficial mediante espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS). El grado de oxidación superficial se cuantificó como la relación entre las especies hidrofílicas y las especies hidrofóbicas, y se correlacionó con la recuperación de la flotación de sulfuros de cobre. Se estableció una relación cuantitativa entre ellos y se identificó un grado crítico de oxidación, más allá del cual la flotación se vuelve imposible, que fue de 11.7 para la calcopirita y se



estimó que estaba en el rango de 1.74–4.85 para la calcosina, lo que indica que la flotación de la calcosina es mucho más sensible a la oxidación superficial. Este estudio permitirá proporcionar pautas para gestionar mejor los minerales de cobre oxidados y evitar la pérdida de recuperación, y también ayudará a desarrollar soluciones potenciales que se puedan aplicar a la flotación de minerales con diferentes grados de oxidación. (Moimane et al., 2020)

El proceso de sulfidización a potencial controlado, que se ha aplicado ampliamente y ha demostrado un gran potencial como estrategia de remediación para la flotación de sulfuros de cobre oxidados, todavía presenta inconvenientes como baja eficiencia y dificultad para restaurar la flotabilidad de los sulfuros fuertemente oxidados. Este estudio buscó comprender las reacciones en la superficie de la sulfidización en la calcopirita oxidada. El análisis de superficie mediante espectroscopía fotoelectrónica de rayos X criogénica reveló que los sitios oxidados de Cu(II) se sulfidaron para formar Cu(I)-S, mientras que los sitios oxidados de Fe(III) permanecieron sin sulfidar, a 0.10 V frente al electrodo estándar de hidrógeno, tras la sulfidización de la calcopirita oxidada. El análisis de la calcopirita tratada con colector después de la sulfidización mostró que el colector, O-isopropil-N-etil tionocarbamato, utilizado en este estudio, no redujo las especies férricas. La contaminación por hierro baja, proveniente de la oxidación de la calcopirita, tuvo un efecto despreciable en la flotación de la calcopirita, mientras que la contaminación por hierro alta afectó negativamente la flotación de la calcopirita. El análisis de superficie también mostró que la contaminación por hierro alta no solo aumentó la hidrofiliidad de la superficie del mineral, sino que también aparentemente indujo una obstrucción estérica a la



reacción de los iones sulfidantes con los sitios oxidados de Cu(II). (Moimane et al., 2021)

Este artículo se realizó con el propósito de proporcionar una comprensión profunda de los minerales de óxido de cobre y sus comportamientos de flotación en la industria de procesamiento de minerales. Los minerales de óxido de cobre, como la malaquita, azurita, crisocola y cuprita, son recursos importantes de cobre y la flotación es el método más ampliamente utilizado para su enriquecimiento. El estudio se enfoca en resumir sistemáticamente las propiedades superficiales de los minerales de óxido de cobre y cómo estas afectan su comportamiento de flotación. Se revisan en detalle los métodos de flotación de minerales de óxido de cobre y el mecanismo de interacción con los reactivos. Estos métodos incluyen la flotación directa (utilizando agentes quelantes o ácido graso como colector), la flotación de sulfidización (utilizando xantato como colector) y la flotación de activación (utilizando agentes quelantes, sales de amonio/aminas, iones metálicos y oxidante para la activación). Se destaca que una manera efectiva de lograr una flotación eficiente de los minerales de óxido de cobre es aumentar los sitios activos en la superficie de estos minerales para mejorar la interacción del colector con la superficie mineral. Además, se proponen varias perspectivas para investigaciones futuras sobre la recuperación eficiente de minerales de óxido de cobre. En resumen, el artículo busca proporcionar una guía integral para mejorar la eficiencia en la recuperación de estos importantes recursos de cobre en la industria minera. (Feng et al., 2022)

El estudio investigó la influencia de las condiciones de molienda en la química de la pulpa y el comportamiento de flotación de la pirita oxidada. Las partículas de pirita oxidada se molieron con acero forjado o acero al cromo al 30%,



ya sea en atmósfera o en un entorno rico en nitrógeno en un molino Magotteaux®. Durante la molienda, se midió la química in situ de la pulpa (es decir, oxígeno disuelto, Eh, pH). Se determinó la cantidad de especies de oxidación de hierro y azufre en las fases sólida y acuosa del lodo de molienda mediante la técnica de extracción de EDTA (ácido etilendiaminotetraacético). Se evaluó la recuperación de flotación de los productos de molienda en seco y el efluente de molienda en ausencia y presencia de un colector. Los resultados muestran que la recuperación de flotación de las muestras molidas depende tanto de la química superficial de las partículas de pirita como de la química de la pulpa del efluente, que varía significativamente entre diferentes condiciones de molienda. La molienda con acero forjado en un entorno atmosférico y la molienda con acero al cromo al 30% en un entorno rico en nitrógeno crearon una química de pulpa adecuada o produjeron pocas especies de oxidación de hierro, lo que se considera óptimo para la flotación de la pirita. (Xu et al., 2022)

En una planta de beneficio, se llevan a cabo todos los procesos necesarios para extraer un mineral, desde la etapa inicial de trituración y molienda hasta la etapa final de concentración. Uno de los aspectos clave en el proceso de beneficio es la elección del método de concentración para extraer el mineral, ya que esto garantiza resultados óptimos y la recuperación deseada en términos de extracción. En este caso específico, en una planta que procesa minerales oxidados de cobre, se utiliza el método de flotación espumante. Sin embargo, en el diseño inicial de la planta, no se consideraron ciertos criterios técnicos importantes para el proceso de recuperación. Esto resultó en que la flotación no produjera los resultados esperados y, como consecuencia, el mineral enriquecido se destinaba a los relaves. Para mejorar la eficiencia, se optimizó el circuito de flotación mediante



modificaciones en diferentes variables durante las etapas de molienda, aireación y selección de reactivos. Como resultado, los índices metalúrgicos de la planta mejoraron significativamente: la recuperación aumentó del 4,9 % al 67 %, la razón de concentración pasó de 2,79 a 6,4 y la razón de enriquecimiento se elevó de 0,4 a 5,4. Estos cambios demuestran que el nuevo circuito de flotación permitió una mejora sustancial en los procesos de recuperación y concentración de minerales de cobre oxidado. (Morelly Osorio, 2022)

En los últimos años, los altos costos en la molienda han generado interés en aumentar la eficiencia y reducir el consumo de medios de molienda. En este contexto, ha surgido una nueva serie de inhibidores para la corrosión y colectores para la flotación bajo el nombre comercial de PETKOM. Estos reactivos, al disminuir el consumo de acero, actúan como colectores selectivos, lo que resulta en concentrados de mayor pureza, especialmente en el caso del cobre. En un estudio de laboratorio, se realizaron pruebas en paralelo con y sin el uso del inhibidor para determinar el consumo de acero. La densidad de pulpa utilizada en la prueba estándar fue del 70%, mientras que con el inhibidor fue del 76%, con una dosis de SKIK de 30 g/t en el molino. Los resultados mostraron un ahorro del 1,9% en el consumo de bolas para el mismo tiempo de molienda y gasto en energía. Además, el inhibidor permitió moler un 9% adicional de mineral. En cuanto a la eficiencia del SKIK como colector, se evaluó en la flotación comparándolo con el reactivo MATCOL (20 g/t) a diferentes pH (10, 20 y 30 g/t). El nuevo reactivo demostró un aumento en la recuperación de cobre (1-2%), oro (9,2%) y plata (4,9%). (Campusano et al., 2017)



2.1.2 Nacionales

El objetivo de este trabajo de investigación es recuperar los minerales sulfurados de cobre. El mineral en estudio corresponde a un sulfuro de cobre con especies mineralógicas principales como la calcopirita (CuFeS_2), calcocita (Cu_2S), covelita (CuS) y bornita (Cu_5FeS_4), junto con ganga como silicatos, carbonatos y cuarzo. Se diseñó una secuencia adecuada de pruebas experimentales y dosificaciones de reactivos, considerando los tiempos de molienda y flotación basados en experiencias previas. El trabajo se divide en cinco capítulos: el primero describe el perfil del estudio, el segundo aborda las características y formación geológica del mineral, el tercero presenta el fundamento teórico, y el cuarto se enfoca en la parte experimental. Para lograr una mayor liberación, se molió el mineral a una granulometría del 65% pasante por la malla 200 antes de someterlo a la flotación. La prueba más exitosa fue la número 2, que resultó en una ley de cobre del 18.94% y una recuperación del 87.93%. (Lupo Canahuire & Utani Poma, 2014)

El objetivo de este trabajo es la recuperación de cobre a partir de minerales sulfurados mediante el proceso de flotación. Se obtuvieron muestras de las faenas mineras ubicadas en el Yacimiento Katanga, comunidad de Uchucarcco, Distrito de Chamaca, Provincia de Chumbivilcas, Región Cusco. En el proceso de flotación de minerales sulfurados de cobre, se consideran tres variables clave: la granulometría de la molienda, la dosis del colector y el pH durante la flotación. Los resultados de este estudio serán aplicables a una pequeña planta concentradora que utiliza el método de flotación y está ubicada cerca del yacimiento. Los experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional San Antonio



Abad del Cusco. Mediante el proceso de flotación, se logró una recuperación satisfactoria del 89.82%. Las condiciones óptimas para la recuperación de cobre fueron las siguientes: Granulometría: 60% pasante por la malla 200, Dosis del colector Z-11: 60 g/TM, pH: 8. (Rodrigo Salas Colque & Jordan Pocco Oquendo, 2018)

El propósito inicial de esta investigación es evaluar la viabilidad de recuperar cobre de los minerales del yacimiento Caolín, con el objetivo de darles un valor comercial. Esto permitirá el tratamiento de las doscientas mil toneladas de mineral de cobre, generando ingresos económicos tanto para la empresa como para la sociedad en general. Los minerales presentes en este yacimiento son principalmente sulfurados y oxidados, polimetálicos y contienen cobre, plomo y zinc en su composición. Dada la abundancia de estos minerales en nuestras regiones cercanas, es de vital importancia comprender su comportamiento en procesos de flotación diferencial. Algunos minerales son propensos a flotar fácilmente, mientras que otros, más complejos, presentan desafíos significativos en el proceso de flotación. (Cajahuanca & Polmarthan, 2018)

La presencia de un alto contenido de cobre oxidado en el mineral que ingresa a la flotación generó la necesidad de explorar nuevas alternativas de tratamiento. Durante las pruebas de flotación, se utilizó un mineral con un 0.412% de cobre total y un 0.105% de cobre soluble en ácido, equivalente al 26% de cobre oxidado. Se evaluaron cuatro alternativas, colectores y modificadores de superficie: Incrementar el colector primario C4132 a 35 g/t mejoró la recuperación de cobre en un 1.1% y la de molibdeno en un 11.5%, reducción de molienda y sólidos: Reducir la molienda a P80 de 135 micras y los sólidos al 20% aumentó la recuperación de cobre en un 3.3% y la de molibdeno en un 7.8%, lavado previo



con ácido H₂SO₄: Esta opción no fue satisfactoria y afectó negativamente la calidad del concentrado, disminuyendo la recuperación de molibdeno en un -19.5%. Reactivos Cytec: Estos reactivos mejoraron la recuperación de molibdeno en un 3.1%. Además, las pruebas de reología demostraron que los sólidos tienen un impacto significativo en la viscosidad dinámica y el yield stress. (Vilca Casazuela, 2019)

El objetivo de este estudio fue comparar reactivos espumantes para determinar los parámetros óptimos de dosificación en un circuito de flotación Rougher y lograr recuperaciones de cobre total (CuT). El mineral utilizado provino del yacimiento Antapaccay, específicamente del tajo norte, y contenía especies mineralógicas principales como calcopirita (CuFeS₂), calcocita (Cu₂S), covelita (CuS) y bornita (Cu₅FeS₄), junto con ganga de silicatos, carbonatos y cuarzo. Se llevaron a cabo pruebas experimentales de flotación utilizando muestras de sondaje de taladro, flotación cinética y flotación en la etapa rougher. Como resultado, se determinó una dosificación óptima de Espumante F501 de 42.323 g/TM con un tiempo de flotación de 10.054 minutos, logrando una recuperación máxima del 94.86%. Este trabajo se basó en los indicadores clave de desempeño (KPIs) de la operación y procedimientos de pruebas para garantizar resultados confiables. La estructura del informe se dividió en cuatro capítulos: perfil del trabajo, características geológicas del mineral, procedimiento experimental y análisis de resultados. (Ramos Huanca & Choque Arenaza, 2020)

La presencia de abundantes reservas de minerales oxidados de cobre motivó la realización de pruebas experimentales a nivel de laboratorio. El objetivo era encontrar alternativas de tratamiento para el mineral almacenado existente mediante el proceso de flotación. Debido a la disminución significativa de la



producción por falta de mineral sulfurado en la planta de tratamiento, se registraron pérdidas económicas considerables. El mineral utilizado en las pruebas de flotación contenía un 0.453 % de cobre total y un 0.125 % de cobre soluble en ácido, lo que equivale a un 27.6 % de cobre oxidado. Para tratar este mineral oxidado, se aplicó el método de flotación utilizando sulfidizantes. El reactivo Z-6 se utilizó como colector, mientras que el espumante MIBC se empleó para la formación de espumas. Además, se realizaron pruebas con los sulfidizantes Na₂S y NaSH, la planificación de las pruebas experimentales se basó en un diseño factorial 2K con réplica central. Se llevaron a cabo 11 pruebas con Na₂S y otras 11 con NaSH. Los resultados mostraron que el NaSH permitió alcanzar una recuperación máxima de cobre del 71.70 %, mientras que el Na₂S alcanzó el 69.81 %. En conclusión, el uso del NaSH es óptimo para lograr una recuperación eficiente de cobre. (Taco Chavez, 2022)

El objetivo de este estudio fue evaluar el uso del sulfuro de sodio (NaSH) para recuperar los óxidos de cobre presentes en las colas de flotación de sulfuros en la planta de beneficio La Azulita SAC, ubicada en Nazca. La investigación, de carácter tecnológico y cuantitativo, se basó en un diseño experimental de regresión y correlación múltiple, utilizando una muestra de 50 kg de mineral mixto. La presencia de minerales oxidados de cobre en las reservas de minerales sulfurados generó la necesidad de realizar pruebas experimentales a nivel de laboratorio. Estas pruebas buscaban encontrar alternativas de tratamiento para el mineral mixto, ya que la solubilidad del cobre oxidado dificulta su recuperación durante la flotación de sulfuros de cobre, lo que resulta en pérdidas económicas significativas, el mineral extraído de la mina San Felipe se procesa en la planta de beneficio La Azulita SAC. Este mineral contiene un 4.2% de cobre total y un 1.8%



de cobre soluble. Para recuperar el cobre oxidado, se aplicó el método de flotación utilizando NaSH como agente sulfidizante y el colector Z-6, considerando cuidadosamente el pH. El diseño factorial 2k con réplica central reactivo permitió determinar el número necesario de pruebas de flotación. (Gutierrez Carpio & Huaman Calderon, 2023)

2.1.3 Locales

La optimización de flotación busca cuantificar el rendimiento del proceso mediante un modelo que relaciona la recuperación y ley de los minerales valiosos con las variables controlables. En la flotación, las variables no son independientes debido a sus interacciones. El desafío radica en diseñar pruebas experimentales para identificar estas interacciones. La recuperación metálica es crucial y debe optimizarse para minimizar costos o maximizar beneficios. En el caso de minerales oxidados de cobre, la lixiviación recupera el cobre, pero se pierde el oro. La flotación permite recuperar el oro, aumentando el valor económico del concentrado final. Para minerales con una ley aproximada de 3.5% Cu, se utiliza Sulfuro de Sodio como reactivo sulfidizante para obtener un concentrado de cobre de calidad (23.5% Cu). (Quispe Navarro, 2017)

La “Implementación de una unidad de flotación rápida en la descarga del molino de bolas primario en la empresa minera SILVER MINSAPERU S.A.C.” se centra en utilizar una unidad de Flotación Rápida (modelo DENVER de 32" x 32") para mejorar la eficiencia del proceso de molienda y flotación. La unidad estará ubicada en la descarga del molino COMESA 3'Øx4'. Al aplicar el Método de Flotación Rápida, se captura el plomo tan pronto como está liberado, lo que beneficia la minería polimetálica. El uso de esta unidad tiene como objetivo



principal evitar la sobre-molienda del mineral valioso que ya está liberado, incrementando así la eficiencia del circuito de flotación subsiguiente. En resumen, la Celda de Flotación Flash (DENVER de 32" x 32") será rentable y permitirá una rápida recuperación de la inversión en la empresa minera SILVER MINSPERU S.A.C. (Gonzales Guevara, 2018)

En la unidad minera San Rafael, Antauta - Región Puno, se busca mejorar la recuperación de estaño fino en las celdas columna mediante la optimización de la flotación ultrafina. La investigación, realizada a nivel laboratorio, aplicó pruebas metalúrgicas siguiendo procesos como chancado, molienda, flotación y filtrado. Los resultados indican que el uso del modificador Teutón en la etapa Rougher, con una concentración de 30 g/tn a un pH de 5.00, incrementó la recuperación en un 4.29% de estaño fino. Además, en la etapa Cleaner, una limpieza a pH 4.50 aumentó la calidad de finos en un 0.78%, logrando una recuperación total del 73.21% con una calidad de 29% de estaño fino. Esta optimización contribuirá a mejorar la rentabilidad económica de la empresa. Las celdas de flotación en columna son una tecnología clave para lograr estos objetivos, ya que permiten aumentar la flotación de partículas finas y ultrafinas, evitando el arrastre hidráulico de la ganga mediante un eficiente drenaje dentro de la zona de espuma. (Mamani Ccapa, 2019)

El objetivo principal del presente trabajo es evaluar técnicamente y económicamente la posibilidad de incrementar la producción de la planta de procesamiento de minerales San Carlos. Actualmente, la planta tiene una capacidad de 50 TM/día, pero se busca aumentarla a 200 TM/día. Ubicada en el centro poblado Chilahuito, distrito de Paratia, provincia de Lampa, departamento de Puno, la planta enfrenta limitaciones en su capacidad de tratamiento. Para



superar esta situación, se propone la implementación de nuevos equipos y la optimización de los existentes. Las secciones de chancado, molienda, flotación y relave serán modificadas para lograr resultados positivos y mejorar la recuperación actual. El estudio aborda consideraciones técnicas aplicadas a una planta de beneficio. En el primer capítulo, se justifican los objetivos planteados. El segundo capítulo presenta teoría relevante sobre las etapas de procesamiento de minerales en una planta concentradora, incluyendo los principales equipos utilizados en la industria metalúrgica y la teoría de flotación de minerales. El tercer capítulo detalla los materiales y métodos empleados, describiendo el proceso de beneficio actual. El levantamiento del diagrama de proceso fue fundamental para enfocarse en el aumento de la producción. Se dimensionaron los equipos principales utilizando datos empíricos y métodos conocidos. Además, se analizan las consideraciones de inversión y evaluación económica del proyecto, especificando la relación de equipos necesarios y la inversión prevista. La optimización de la planta de procesamiento es crucial para maximizar la rentabilidad y la eficiencia en la recuperación de minerales valiosos. (Turpo Cahuana, 2019)

El objetivo principal de este estudio es mejorar el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre en la planta concentradora de la minera CIEMSA, ubicada en la unidad El Cofre, distrito de Paratía, en la región de Puno. Para lograr esto, se realizaron pruebas en el laboratorio de la empresa CIEMSA U.M. El Cofre, siguiendo protocolos específicos para pruebas de flotación. Durante estas pruebas, se evaluó el comportamiento y el impacto del colector M-11, utilizando una granulometría del 69.38 % malla -200 y un tiempo de flotación de 60 minutos en distintas etapas del proceso. Los resultados mostraron una recuperación de



cobre del 83.81 % con una calidad superior al 30 %. La metodología empleada fue de tipo experimental, utilizando un diseño experimental de tres variables 2^3 mediante el software estadístico STATGRAPHICS. En conclusión, el objetivo principal de este estudio era optimizar y mejorar el porcentaje de recuperación de minerales mixtos de cobre en la planta concentradora de CIEMSA. (Chambi Huanca, 2020)

2.2 CONCENTRACIÓN Y FLOTACIÓN

2.2.1 Flotación

La flotación es un método para separar sustancias de diferentes orígenes presentes en pulpas acuosas mediante la introducción de burbujas de gas y aprovechando las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los materiales. Este proceso, en esencia, tiene como objetivo la individualización de las especies que previamente formaban una mezcla. La separación puede manifestarse de varias maneras, como la flotación colectiva, donde se divide la mezcla en dos grupos, con el concentrado conteniendo al menos dos minerales adicionales. Por otro lado, está la flotación selectiva o diferencial, donde el concentrado consiste en una sola especie mineral.

Cuando las especies minerales de interés representan una fracción menor y las especies estériles predominan, la separación por flotación se conoce como concentración. En cambio, cuando la especie valiosa está en una proporción mayor, la flotación adquiere un carácter de purificación. Este proceso de concentración o purificación juega un papel fundamental en la recuperación de minerales valiosos, ya que permite aumentar la proporción de la especie deseada



en el concentrado final, lo que a su vez facilita su posterior procesamiento y comercialización (Sutulov, 1963).

El proceso de flotación es un procedimiento físico-químico empleado para la separación selectiva de partículas valiosas de la ganga, haciendo uso de las características hidrofóbicas e hidrofílicas de los minerales sólidos a ser separados, mediante la adhesión selectiva de burbujas de aire a las partículas minerales. Para llevar a cabo este proceso, se requiere realizar varias acciones fundamentales:

- a) Es necesario realizar una etapa de molienda previa, cuyo propósito es liberar los minerales útiles de la ganga o roca que los contiene, permitiendo así una separación más eficiente.
- b) Se debe generar un flujo de aire en la pulpa de mineral, lo que facilita la interacción entre las burbujas de aire y las partículas minerales presentes en la mezcla.
- c) Se deben crear condiciones que promuevan la adherencia de los minerales deseados a las burbujas de aire. La flotación ocurre cuando el equilibrio de las tensiones superficiales en el sistema trifásico mineral/gas/mineral es favorable, lo que significa que las fuerzas que impulsan la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire superan las fuerzas que las mantienen en la pulpa acuosa.

En resumen, el proceso de flotación implica una serie de pasos coordinados que permiten la separación efectiva de los minerales útiles de la ganga, siendo esencial comprender y controlar las condiciones que favorecen la interacción entre las partículas minerales y las burbujas de aire para lograr una separación óptima (Farfan Chicca & Huaracallo Choque, 2019).

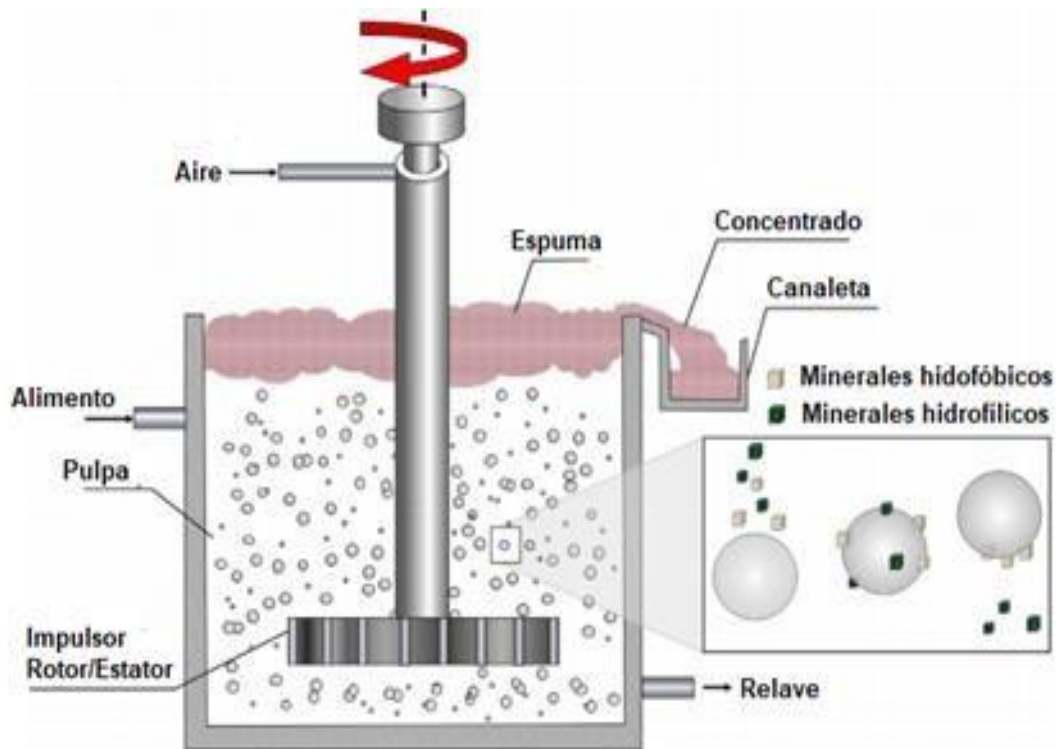


Figura 1. Componentes de un proceso de flotación de espuma.

Fuente: (Wills & Finch, 2015)

La flotación convencional presenta tres limitaciones identificadas por Bill (2019, p. 1019):

- 1) La recuperación de sólidos tiende a ser baja, incluso en casos donde se espera un grado moderado o alto en el concentrado.
- 2) La recuperación de agua también se ve comprometida, especialmente cuando el concentrado contiene un porcentaje considerable de sólidos en peso, como, por ejemplo, entre el 30 % y el 50 %.
- 3) La reducida recuperación de agua en el concentrado no solo afecta negativamente la recuperación de los minerales no deseados por medio del mecanismo de arrastre, sino que también limita aún más esta recuperación.

2.2.2 Elementos de la Flotación

El proceso de flotación se compone de tres fases distintas: sólida, líquida y gaseosa. En la fase sólida se encuentran los materiales que se pretenden separar.



El agua, constituyendo la fase líquida, es un medio ideal para este proceso debido a sus propiedades específicas. Antes de aplicarse, los sólidos y el agua se preparan en forma de pulpas, que pueden contener hasta un 40% de sólidos. El gas empleado en la separación es el aire ambiente, que se introduce mecánicamente en la pulpa para generar burbujas de aire, sobre las cuales se adhieren las partículas sólidas hidrófobas.

El proceso de flotación se fundamenta en las características hidrofóbicas e hidrofílicas de los sólidos cuando se encuentran en agua. Algunos minerales, como los metales nativos, los sulfuros y ciertas especies como el grafito, el carbón bituminoso, la molibdenita y el talco, presentan una baja afinidad por el agua. Esto significa que no son fácilmente mojables por el agua, por lo que se les denomina minerales hidrofóbicos, por otro lado, existen minerales como los óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros, que son predominantemente especies minerales estériles, es decir, no tienen valor económico. Estos minerales tienen una alta afinidad por el agua, lo que significa que son fácilmente mojables por ella. A estos minerales se les llama hidrófilos.

Después de ser finamente molidos y acondicionados con reactivos específicos, los minerales hidrofóbicos e hidrofílicos en la pulpa acuosa pueden separarse. Las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire y son recolectadas en la espuma, mientras que las partículas hidrofílicas se humedecen y se depositan en el fondo de la celda de flotación (Sutulov, 1963).

2.2.2.1 Sólido

La composición química de los cuerpos sólidos está determinada por la disposición de moléculas, iones y átomos que forman una estructura



cristalina compleja. Esta estructura cristalina influye en la naturaleza de la superficie que se forma durante la reducción del tamaño, y esta superficie resultante es crucial para el comportamiento de la especie en el proceso de flotación. Es esencial considerar si los cristales están compuestos por iones, moléculas o átomos, ya que esto determinará el carácter de las nuevas superficies generadas al romperse el sólido.

La polaridad de los minerales, un aspecto fundamental en la química y física de estos, juega un papel crucial en determinar su flotabilidad natural. Esta polaridad está intrínsecamente ligada a sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas, los minerales apolares o hidrofóbicos son aquellos que no participan en el intercambio de electrones dentro de sus moléculas y, por lo tanto, no se disocian en iones. Estos minerales presentan una estructura simétrica y no interactúan con los dipolos del agua. Algunos ejemplos notables de estos minerales incluyen el grafito, el talco, la molibdenita, el azufre y algunos minerales sulfuros. Estos minerales, debido a su naturaleza apolar, tienden a repeler el agua, lo que les confiere su característica hidrofóbica, los minerales polares o hidrofílicos son aquellos que intercambian electrones durante la formación de enlaces, lo que resulta en una estructura asimétrica. Esta asimetría les permite interactuar con el agua y otros polos, lo que les confiere su naturaleza hidrofílica. Esta categoría incluye a todos los óxidos y otros minerales polares (Sutulov, 1963).

a. Minerales de Cobre

Los pórfidos de cobre son depósitos minerales complejos que se encuentran en estratos y secuencias de rocas clásticas sedimentarias, que



están intercaladas con basaltos. Estos depósitos se caracterizan por formar lentes estratiformes y acumularse en láminas de sulfuros, lo que proporciona un desafío en su procesamiento debido a la variabilidad mineralógica y la presencia de diferentes tipos de ganga.

La mineralogía de la ganga en los pórfidos de cobre puede variar significativamente, lo que influye en las características de liberación del mineral y, por lo tanto, en la eficacia del proceso de flotación. Es fundamental comprender estas variaciones para seleccionar adecuadamente los reactivos y métodos de flotación más apropiados.

En este contexto, la selección de los reactivos para la flotación de minerales óxidos de cobre se basa en varios factores. Se considera el tipo de mineral óxido de cobre presente en la mena, así como los tipos de gangas que acompañan a estos minerales. Por ejemplo, la presencia de gangas como silicatos libres de arcillas puede facilitar la flotación, mientras que las gangas dolomíticas y arcillosas pueden interferir con el proceso de flotación y requerir enfoques específicos, como la sulfidización.

Además de la composición mineralógica de la mena, se debe tener en cuenta el grado de liberación del mineral y su composición química y estructura física. Estos factores influyen en la selección de los reactivos y métodos de flotación más adecuados para maximizar la recuperación de cobre y minimizar la pérdida de valiosos minerales.

Existen dos métodos principales para la flotación de minerales óxidos de cobre: la sulfuración y la flotación aniónica. En la flotación por



sulfuración, se utiliza sulfuro ácido de sodio (NaSH) como sulfidizante, junto con colectores y modificadores específicos para mejorar la selectividad y la recuperación del cobre. La dosificación precisa de estos reactivos es crucial para evitar problemas como la depresión de minerales valiosos o la formación de lamas durante el proceso de molienda.

Por otro lado, en la flotación aniónica, se emplean derivados de ácidos grasos e hidroxámicos como colectores, especialmente cuando hay presencia de silicatos en la mena. Estos colectores son seleccionados para su capacidad de adsorberse selectivamente en la superficie de los minerales de cobre y mejorar la eficiencia del proceso de flotación.

La malaquita es un mineral de carbonato de cobre que se caracteriza por su composición química, dureza, gravedad específica, color y sistema de cristalización. Es importante destacar que su flotación puede realizarse mediante diferentes métodos, como la sulfuración o utilizando ácidos hidroxámicos, dependiendo del pH y de la naturaleza de la ganga asociada. Es importante mencionar que existen varias variantes de pseudomalaquita que presentan dificultades en su flotación y tienen una respuesta deficiente a la sulfurización.

✓ Malaquita

- **Composición química:** $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$
- **Dureza:** 3,5-4 en la escala de Mohs.
- **Gravedad específica:** 3,9
- **Color:** verde.
- **Sistema de cristalización:** monoclinico.



Por otro lado, la cuprita es un mineral óxido de cobre que se encuentra presente junto con minerales sulfuros y carbonatos. A diferencia de la malaquita, la cuprita tiene propiedades de flotación específicas que requieren una alta dosificación de reactivos, y también puede responder a la flotación con colectores sulfhidrilos sin necesidad de activación previa.

✓ Cuprita

- **Composición química** : Cu_2O
- **Dureza** : 3,5-4 en escala de Mohs.
- **Gravedad específica** : 6,1.
- **Color** : rojo purpura
- **Sistema de cristalización** : cúbico.

La tenorita es otro mineral óxido de cobre que se encuentra en minerales mixtos de cobre y tiene propiedades de flotación similares a las de la cuprita. Su composición química, dureza, gravedad específica, color y sistema de cristalización son características importantes a considerar en su procesamiento mediante flotación.

✓ Tenorita

- **Composición química** : CuO
- **Dureza** : 3,5 en la escala de Mohs.
- **Gravedad específica** : 6.
- **Color** : gris oscuro
- **Sistema de cristalización** : monoclinico.

La azurita, otro carbonato de cobre, se forma en depósitos expuestos a la atmósfera y su proceso de flotación es similar al de la malaquita. Es fundamental tener en cuenta sus propiedades físicas y químicas para aplicar eficientemente el proceso de flotación en la recuperación de cobre.



✓ Azurita

- **Composición química** : $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{CuCO}_3$
- **Dureza** : 3,5-4, en la escala de Mohs.
- **Gravedad específica** : 3,8.
- **Color** : azul.
- **Sistema de cristalización** : monoclinico.

Finalmente, la calcopirita es el mineral primario en los depósitos de sulfuros de cobre y su flotación se realiza con colectores sulfhidrilos en un rango específico de pH. Es esencial comprender su comportamiento frente a la oxidación y otros factores como la aireación y el tipo de colector utilizado. La presencia de impurezas en la estructura cristalina puede afectar su estabilidad y comportamiento durante el proceso de flotación.

Es importante destacar que la calcopirita diseminada presenta propiedades de flotación distintas que son altamente sensibles a factores como la concentración de oxígeno en la pulpa, el pH y el tipo de colector utilizado. En este sentido, se ha observado que los colectores ditiofosfatos y tionocarbamatos son más efectivos que los xantatos en la flotación de este tipo de mineral. Además, la aireación de la pulpa tiene un efecto positivo en la selectividad hacia otros sulfuros presentes en el mineral.

Cuando no es posible deprimir la pirrotita, el pH de la pulpa se eleva hasta 12 para mejorar la selectividad del proceso. Respecto a otros reactivos, como los sulfatos, dicromatos, hidrosulfuros, cianuros y almidones, se ha observado que en pequeñas cantidades no deprimen significativamente la flotación de la calcopirita, aunque en concentraciones más altas pueden utilizarse en la separación de minerales como el molibdeno.



✓ Calcopirita

- **Composición química** : CuFeS₂.
- **Dureza** : de 3-4, en la escala de Mohs.
- **Gravedad específica** : 4,2.
- **Color** : amarillo-latón
- **Sistema de cristalización** : tetragonal.

La covelina es un mineral secundario de cobre que presenta una estructura frágil y propensa a formar lamas durante el proceso de molienda, lo que puede dificultar su separación cuando está presente en grandes cantidades. Sin embargo, se ha observado que la combinación de colectores como los tionocarbamatos y xantatos demuestra ser efectiva en la flotación de la covelina, especialmente en condiciones alcalinas.

En situaciones donde la covelina se presenta de manera masiva, la separación se vuelve aún más desafiante. En estos casos, se ha encontrado que los derivados del ácido tánico y los sulfatos de lignina no tienen un efecto depresor significativo sobre la covelina, pero pueden ser útiles para deprimir la pirita presente en sulfuros masivos, facilitando así la separación de los minerales de interés (Bulatovic, 2010).

✓ Covelina

- **Composición química** : CuS
- **Dureza** : 1-2, en la escala de Mohs.
- **Gravedad específica** : 4,5.
- **Color** : azul oscuro.
- **Sistema de cristalización** : hexagonal.

La covelina, un mineral secundario y frágil, presenta desafíos únicos durante el proceso de molienda. Debido a su fragilidad, tiende a formar lamas, una especie de barro mineral, durante la molienda. Cuando



este mineral se encuentra en grandes cantidades, la separación se convierte en un problema significativo, lo que puede afectar la eficiencia del proceso de flotación, se ha descubierto que la combinación de ciertos colectores, específicamente el tionocarbamato y el xantato, muestra propiedades de flotación favorables en condiciones alcalinas. Estos colectores ayudan a aumentar la flotabilidad de la covelina, facilitando así su separación de otros minerales, se ha observado que los derivados del ácido tánico y los sulfatos de lignina no deprimen a la covelina. Estos compuestos se utilizan comúnmente para la depresión de la pirita en sulfuros masivos, lo que significa que inhiben la flotación de la pirita permitiendo que otros minerales, como la covelina, sean recolectados más eficientemente (Bulatovic, 2010).

✓ **Calcosina**

- **Composición química** : Cu_2S
- **Dureza** : 2-3, en la escala de Mohs.
- **Gravedad específica** : 5,5
- **Color** : gris oscuro
- **Sistema de cristalización** : monoclinico.

El cobre nativo, un elemento esencial en la industria minera, se puede encontrar en minerales sulfurosos, ya sea como mineral primario o secundario. Su presencia en estos minerales es de gran importancia para los procesos de extracción y refinamiento (Bulatovic, 2010).

La flotabilidad del cobre nativo, es decir, su capacidad para separarse de otros minerales en una solución mediante el proceso de flotación, depende en gran medida del proceso de molienda. Durante este proceso, el cobre nativo puede adoptar diversas formas, como alambre,



escamas, bolas, entre otras. Cada una de estas formas tiene características únicas que afectan su flotabilidad. Por ejemplo, el cobre nativo en forma de alambre tiende a ser menos flotante. Esto significa que puede ser más difícil de separar de otros minerales durante el proceso de flotación. Por otro lado, el cobre nativo en forma de escamas muestra una mayor flotabilidad cuando se utiliza un colector de xantato en un rango de pH de 9 a 11. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, si el pH es menor a 9, la flotabilidad de estas escamas de cobre nativo disminuye, estos hallazgos subrayan la importancia de entender las propiedades específicas de los minerales y cómo estas pueden afectar los procesos de extracción y refinamiento. Al ajustar las condiciones del proceso, como el pH, se puede mejorar la eficiencia de la flotación y, en última instancia, la recuperación del cobre nativo (Bulatovic, 2010).

✓ **Cobre nativo.**

- **Composición química** : Cu₀.
- **Dureza** : 2,5-3, en la escala de Mohs.
- **Gravedad específica** : 8,95.
- **Color** : rosa pálida en la superficie fresca.
- **Sistema de cristalización** : hexoctaédrico.

2.2.2.2 2.2.2.2. Agua

El agua, debido a su abundancia y bajo costo, es el elemento principal en el que se lleva a cabo el proceso de flotación. Las moléculas de agua están compuestas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, unidos por dos enlaces covalentes. Estos enlaces resonantes hacen que los átomos de hidrógeno formen un ángulo de 109.3° con respecto al átomo de oxígeno, lo que resulta en una distribución asimétrica de las cargas



eléctricas y, por ende, la formación de dipolos en la molécula de agua. Estos dipolos pueden asociarse para formar estructuras más complejas. (Alexander, 1963)

La polaridad de la molécula de agua permite su asociación con iones metálicos. El número de moléculas de agua asociadas es directamente proporcional a la carga del ion y es inversamente proporcional al tamaño del ion. Por lo tanto, cuanto mayor sea la carga del ion y menor su tamaño, mayor será la hidratación. Los cationes polivalentes tienden a asociarse con moléculas de agua, mientras que los aniones son menos susceptibles a la hidratación. (Alexander, 1963)

Estas propiedades son fundamentales para el proceso de flotación, ya que explican el comportamiento diferencial de los sólidos frente al fenómeno de la mojabilidad. Por ejemplo, los sólidos con propiedad hidrofílica tienen la capacidad de hidratarse, es decir, atraer moléculas de agua. En cambio, si el sólido es hidrofóbico, no tiene la capacidad de atraer moléculas de agua. (Alexander, 1963)

La estructura y propiedades de las moléculas de agua juegan un papel crucial en el proceso de flotación, afectando la forma en que los sólidos interactúan con el agua y, por lo tanto, su capacidad para flotar o hundirse. Esto es esencial para la eficacia de los procesos de flotación en diversas aplicaciones industriales y científicas. (Alexander, 1963)

2.2.2.3 Aire

El proceso de flotación se lleva a cabo utilizando exclusivamente aire, que desempeña varias funciones críticas. Las dos funciones más destacadas son las siguientes:

- El aire es fundamental para la generación de burbujas, que son un componente esencial en el proceso de flotación. Estas burbujas actúan como vehículos que permiten que las partículas se separen del material circundante.
- El aire también sirve como medio de transporte para las partículas hidrófobas, llevándolas hasta la superficie de la celda de flotación. Es importante destacar que el aire es una mezcla de varios gases, incluyendo nitrógeno (78,1%), oxígeno (20,96%), dióxido de carbono (0,04%) e inertes.

En el contexto de la flotación, la adsorción de estos gases en las superficies minerales es un factor importante a considerar. La presencia de humedad puede aumentar la oxidación, lo que puede afectar la flotabilidad de ciertas especies minerales. Por ejemplo, algunos sulfuros minerales y metales nativos no flotarán a menos que haya una pequeña cantidad de oxidación en la red cristalina del mineral.

El gas adsorbido puede cambiar el potencial de la superficie del mineral, contribuyendo a su hidrofobización. Esto significa que el mineral se vuelve repelente al agua, lo que mejora su capacidad para adherirse a las burbujas de aire y flotar hasta la superficie.



2.2.3 Fases e Interfases en Flotación

El proceso de flotación se caracteriza por la interacción de tres fases distintas: líquida, gaseosa y sólida. La fase líquida, que generalmente es agua, y la fase gaseosa, que suele ser aire, son prácticamente constantes en este proceso. Sin embargo, la fase sólida, que comprende los minerales, puede variar significativamente dependiendo del caso específico.

La flotación se lleva a cabo completamente dentro de la fase líquida. Para entender este proceso en profundidad, es esencial analizar los fenómenos que ocurren en el agua cuando se introducen las fases sólida y gaseosa. Estos fenómenos son fundamentales para el desarrollo del proceso de flotación y su correcta comprensión puede proporcionar información valiosa para optimizar el procedimiento.

Además, el proceso de flotación está estrechamente vinculado con cambios en las propiedades superficiales. Estos cambios pueden ocurrir tanto en el mineral como en las interfaces de contacto entre las diferentes fases. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis detallado de los fenómenos que ocurren en las interfaces sólido-líquido, líquido-gas y sólido-gas. Este análisis permitirá una mejor comprensión de cómo estos fenómenos afectan al proceso de flotación y cómo se pueden manipular para mejorar la eficiencia del proceso. (Wills & Finch, 2015)

2.2.3.1 Interfase gas – líquido

Como se mencionó previamente, en el proceso de flotación, la interfase se forma invariablemente entre el aire y el agua. Esta interfase gas-líquido tiene una característica fundamental, como lo destaca Gaudin,



que es el hecho de que la materia experimenta un cambio abrupto en densidad. Específicamente, la densidad disminuye aproximadamente 1000 veces al pasar de la fase líquida a la gaseosa. Este fenómeno alcanza sus manifestaciones características debido a la existencia de una interfase que tiene la capacidad de absorber este cambio abrupto. La interfase tiene un grosor que es del orden de 10 Angstrom. Este grosor, aunque puede parecer insignificante, juega un papel crucial en el proceso de flotación, ya que permite que la densidad cambie de manera tan drástica sin causar interrupciones en el proceso. La interfase gas-líquido en el proceso de flotación es un componente crítico que permite la transición suave de la densidad entre el aire y el agua. Su existencia y características únicas permiten que el proceso de flotación ocurra de manera eficiente y efectiva. (Núñez, 1986)

Cada líquido (o sólido) que se encuentra en equilibrio con su vapor se distingue por la presencia de una cierta cantidad de energía libre en su superficie. Esta energía libre es definida por un parámetro conocido como tensión superficial. Para entender el origen de esta energía, es necesario considerar las interacciones moleculares que ocurren dentro del líquido. En un líquido, todas las moléculas interactúan entre sí, atrayéndose o repeliéndose mutuamente. Estas fuerzas se equilibran dentro del líquido, resultando en una fuerza neta igual a cero. Sin embargo, las moléculas que se encuentran en la superficie del líquido no están completamente compensadas. Esto se debe a que la mitad de su volumen está orientada hacia la fase gaseosa, donde la concentración de materia es tan baja que prácticamente representa un vacío. En esta fase gaseosa, no hay suficientes



moléculas para contrarrestar la presión de la película superficial del líquido. Como resultado de esta falta de compensación, se genera una cierta cantidad de energía libre en la superficie del líquido. La magnitud de esta energía libre se mide a través de la tensión superficial. Esta tensión superficial es un indicador clave de las propiedades del líquido y juega un papel crucial en una variedad de fenómenos físicos y químicos. Por lo tanto, la comprensión de la tensión superficial y su relación con la energía libre es fundamental para el estudio de los líquidos y su comportamiento. (Alexander, 1963)

La energía a la que nos referimos tiene claramente la naturaleza de un enlace de van der Waals. Este tipo de enlace se caracteriza por las interacciones que ocurren entre las moléculas. Debido a la naturaleza de estas interacciones, el alcance de su influencia es bastante limitado, generalmente del orden de varios angstroms.

La fuerza de este enlace de van der Waals disminuye con la sexta potencia de la distancia. Esto significa que a medida que la distancia entre las moléculas aumenta, la fuerza del enlace disminuye de manera muy rápida. Por lo tanto, aunque el enlace de van der Waals puede ser significativo a distancias muy cortas, su influencia se debilita rápidamente a medida que la distancia aumenta.

Además, el enlace de van der Waals es intrínsecamente débil en comparación con otros tipos de enlaces, como los enlaces covalentes o iónicos. Esta debilidad inherente significa que el enlace de van der Waals no puede propagar su influencia muy lejos. En otras palabras, aunque el

enlace de van der Waals puede tener un impacto significativo a nivel molecular, su efecto se vuelve insignificante a distancias más grandes. (Alexander, 1963)

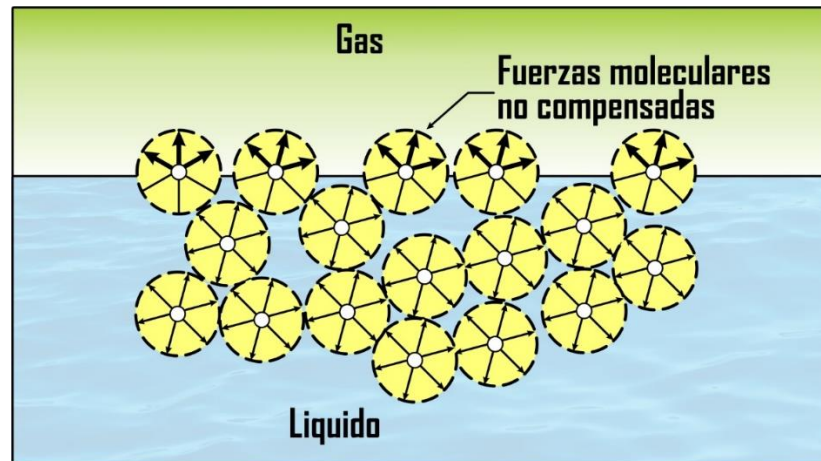


Figura 2. Interpretación esquemática del origen de la tensión superficial.

Fuente: (Alexander, 1963)

La energía libre, en este contexto, se puede entender como una forma de energía potencial. Esto se debe a que las moléculas que se encuentran en la superficie de un líquido o sólido están, en cierto sentido, en una posición elevada. Para llevar estas moléculas a este nivel superior, se requiere una cantidad específica de energía. (Alexander, 1963)

La medición de esta energía libre de superficie se realiza en unidades de ergios por centímetro cuadrado (erg/cm^2). Paralelamente, la intensidad de esta energía, conocida como tensión superficial, se mide en dinas por centímetro (dinas/cm). Esencialmente, estas dos medidas son equivalentes, ya que un ergio por centímetro cuadrado es igual a una dina por centímetro ($\text{erg}/\text{cm}^2 = \text{dinas cm}/\text{cm}^2 = \text{dinas}/\text{cm}$). (Alexander, 1963)

Es fascinante observar cómo la tensión superficial de los líquidos varía en función del tipo de enlace químico que unen a sus moléculas. La



tensión superficial tiende a incrementarse desde los gases nobles (que han sido licuados), pasando por los compuestos con enlaces covalentes (como los líquidos orgánicos) y los compuestos iónicos, hasta llegar a los metales. Los metales, cuando se encuentran en estado líquido, presentan las tensiones superficiales más altas. (Alexander, 1963)

El agua ocupa una posición destacada en este contexto debido a su alta tensión superficial de 72,74 dinas/cm. Esta es la tensión superficial más alta entre todas las sustancias que se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente. (Alexander, 1963)

Existen diversas formas de medir la tensión superficial. Un método clásico consiste en determinar la altura a la que un líquido asciende en un tubo capilar. La tensión superficial se calcula a partir de esta altura utilizando una fórmula específica. Este método se basa en el fenómeno de la capilaridad, que es directamente influenciado por la tensión superficial del líquido. (Alexander, 1963)

$$TS = 1/2 g (D - d) * r * h \quad (1)$$

Donde:

TS : es la tensión superficial en dinas/cm.

g : aceleración de la gravedad en cm/seg².

D y d : Pesos específicos del líquido y del gas.

r : radio del capilar.

h : altura alcanzada por el líquido

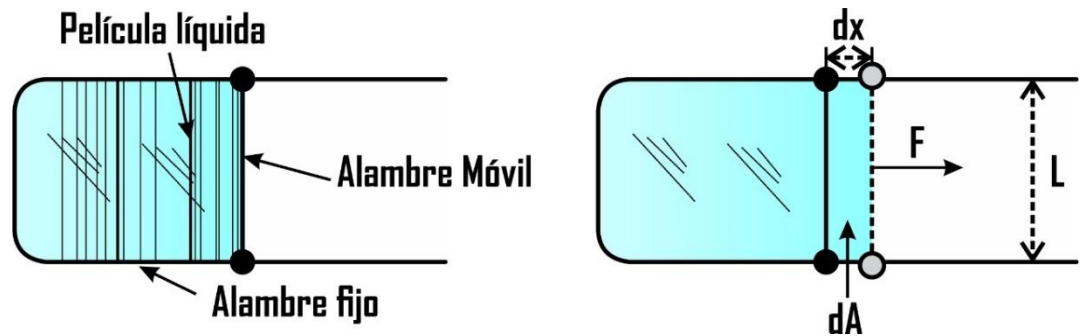


Figura 3. La tensión superficial es el costo energético asociado a incrementar en una unidad el área de interfase.

Fuente: (Alexander, 1963)

2.2.3.1.1 El Fenómeno de adsorción

El fenómeno de adsorción es un proceso que ocurre cuando una sustancia se adhiere a la superficie de otra, lo que resulta en una concentración de partículas en la superficie. Este fenómeno es especialmente relevante en las interacciones entre gases y líquidos, donde los líquidos actúan como soluciones que contienen sustancias disueltas. En estas situaciones, se ha observado que la concentración de las sustancias disueltas puede variar entre el líquido y su interfaz con el gas. Este cambio en la concentración de la sustancia disuelta en la interfaz se conoce como adsorción (Alexander, 1963).

La adsorción puede clasificarse en dos categorías principales: positiva y negativa. La adsorción se considera positiva cuando la concentración de la sustancia disuelta es mayor en la interfaz que en el líquido. Por otro lado, se considera negativa cuando la concentración es menor en la interfaz que en el líquido. Por ejemplo, las soluciones de sales inorgánicas suelen mostrar una adsorción negativa, mientras que los compuestos orgánicos de carácter heteropolar muestran una adsorción



positiva. Este último fenómeno es de gran relevancia para los procesos de flotación (Alexander, 1963).

En un estado de equilibrio, el agua posee una cierta cantidad de energía libre que se manifiesta a través de su tensión superficial. Cuando se introduce un líquido orgánico heteropolar en este sistema, el sistema busca alcanzar un nuevo estado de equilibrio. De acuerdo con los principios de la termodinámica, este nuevo estado de equilibrio debe tener la mínima energía libre posible. Este estado se logra precisamente cuando las sustancias heteropolares se adsorben selectivamente en la interfaz gas-líquido. De esta manera, se neutraliza la energía libre de la superficie y la tensión superficial del sistema se reduce notablemente, la parte polar de las moléculas se une al agua, mientras que la parte apolar forma una película monomolecular inactiva sobre la superficie. Los compuestos que se adsorben selectivamente en las interfaces gas-líquido se conocen como agentes tensoactivos. Estos agentes son fundamentales en numerosos procesos industriales y naturales, incluyendo la limpieza, la emulsificación, la espuma, la humectación y la dispersión (Alexander, 1963).

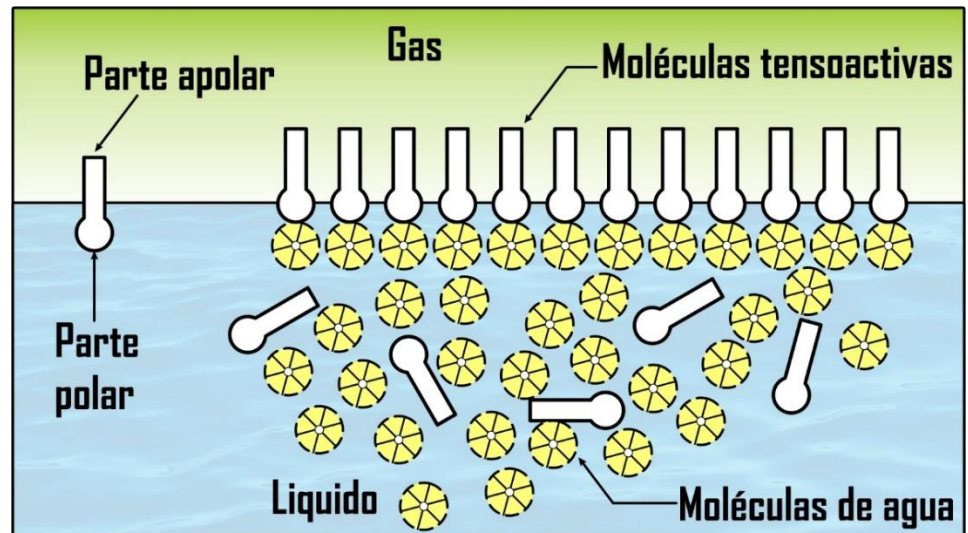


Figura 4. Fenómeno de adsorción de materias tensoactivas.

Fuente: (Alexander, 1963)

El fenómeno conocido como adsorción ocurre tanto en las interfaces entre gases y sólidos como entre líquidos y sólidos. Aunque las adsorciones que ocurren entre las fases gaseosa y sólida no suelen ser de gran relevancia, con la notable excepción de la oxidación de las superficies minerales, las que ocurren entre las fases líquida y sólida son de gran importancia. Estas últimas son fundamentales para entender el fenómeno de la hidrofobización artificial de los minerales y, en general, los cambios en sus propiedades de mojabilidad. (Alexander, 1963)

Existen dos categorías principales de adsorción: la adsorción física y la adsorción química. En el caso de la adsorción física, se trata de la adsorción de moléculas enteras sin que se produzca ningún cambio químico. Por otro lado, en la adsorción química, los compuestos adsorbidos pierden su identidad química y forman nuevos compuestos con la superficie del material. (Alexander, 1963)



Distinguir entre la adsorción química y la física puede ser un desafío. Sin embargo, una de las diferencias clave es que, en la adsorción química, el calor liberado debido a la disminución de la energía del sistema es entre 20 y 50 veces mayor que en la adsorción física. Además, la adsorción química a menudo se caracteriza por el intercambio de iones, la formación de compuestos insolubles y generalmente se facilita en los casos en que los iones que reaccionan son de dimensiones similares y pueden incorporarse fácilmente a la red cristalina del sólido. Este último punto es especialmente relevante en el campo de la mineralogía y la metalurgia, donde la adsorción juega un papel crucial en numerosos procesos. (Juan & Luis, 1998)

El fenómeno de la adsorción, un proceso en el que una sustancia se adhiere a la superficie de otra, ha sido objeto de estudio y análisis matemático por parte de destacados científicos, entre ellos Gibbs. Este último logró deducir una fórmula matemática que describe este fenómeno de manera precisa:

$$A = \frac{c^2}{RT} (\partial s / \partial c) \quad (2)$$

En esta ecuación:

A : representa la cantidad de sustancia adsorbida, es decir, la diferencia entre su concentración en la interfaz y en el líquido.

C: es la concentración de la sustancia en cuestión.



R y **T** : son las constantes de los gases y la temperatura absoluta, respectivamente.

El término $\partial s/\partial c$: es el cambio de tensión superficial en relación con el cambio de concentración.

Esta ecuación nos permite entender cómo varía la adsorción en función de diferentes parámetros. Por ejemplo, es evidente que a medida que disminuye la tensión superficial, la adsorción aumenta. Del mismo modo, un aumento en la concentración de la sustancia adsorbida también conduce a un aumento en la adsorción. Estas relaciones son fundamentales para entender las isothermas de adsorción. La fórmula de Gibbs proporciona una herramienta valiosa para predecir y controlar el fenómeno de la adsorción en diversas aplicaciones industriales y científicas. Su comprensión y aplicación correcta son esenciales para optimizar los procesos que dependen de la adsorción. (Astucuri, 1994)

2.2.3.2 La Interfase sólido – líquido

Cuando las superficies o partículas sólidas se sumergen en agua, se produce un proceso conocido como hidratación. Este fenómeno es influenciado por varias características de la superficie sólida, en particular, las propiedades eléctricas que se manifiestan después de su formación. La hidratación es un proceso que se intensifica en las especies donde se han roto enlaces químicos, como los enlaces iónicos o covalentes. En estos casos, la hidratación es fuerte debido a la liberación de energía que ocurre cuando se forman nuevos enlaces entre el agua y la superficie sólida, cuando las fuerzas eléctricas residuales en la superficie son débiles, la



hidratación también es débil. Esto es común en los minerales que se fracturan a lo largo de los planos de clivaje, donde no hay ruptura de enlaces químicos. En estos casos, la superficie del mineral se mantiene eléctricamente neutra y, por lo tanto, la hidratación es mínima. (Astucuri, 1994)

El proceso de hidratación de los óxidos es un fenómeno interesante que comienza con una marcada inclinación a formar hidróxidos. Este es un paso inicial en el que los óxidos, al entrar en contacto con el agua, tienden a reaccionar y formar hidróxidos. Este proceso es fundamental en diversas reacciones químicas y tiene implicaciones significativas en una variedad de campos, desde la química hasta la ingeniería de materiales, también a medida que avanza el proceso de hidratación, si la fuerza de hidratación supera la fuerza del enlace cristalino, como ocurre en el caso de los enlaces iónicos, se produce la disolución de los sólidos en el agua. Este es un punto crítico en el proceso de hidratación, ya que determina si el sólido se disolverá completamente en el agua o si permanecerá en su estado sólido. La disolución de los sólidos en el agua es un proceso que puede tener un impacto significativo en la composición y las propiedades de la solución resultante, es importante destacar que este fenómeno depende en gran medida del carácter del sólido y de la concentración de la solución acuosa. Diferentes sólidos tendrán diferentes grados de hidratación y disolución en el agua, dependiendo de sus propiedades químicas y físicas. Del mismo modo, la concentración de la solución acuosa también puede influir en el grado de hidratación y disolución de los sólidos. (Astucuri, 1994)

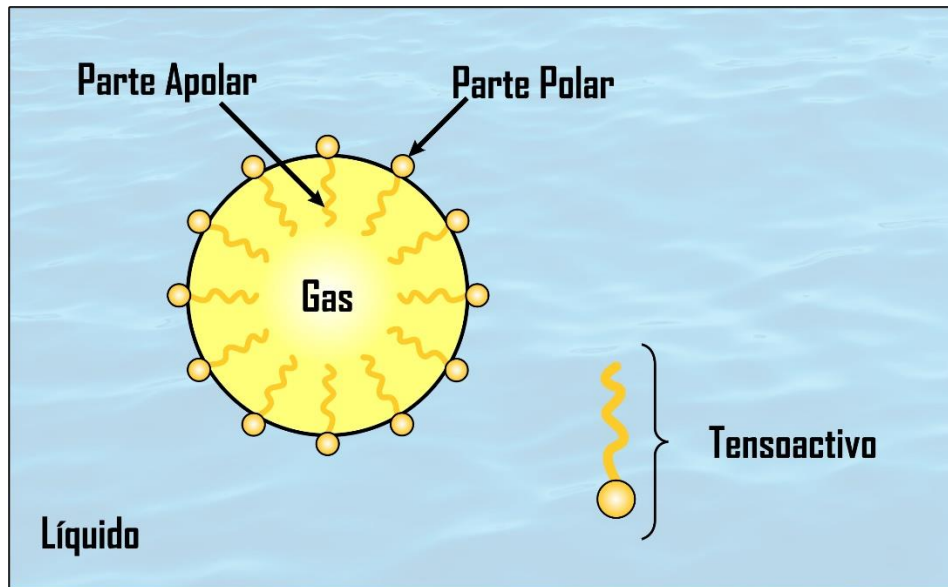


Figura 5. El carácter del sólido y de la concentración de la solución acuosa.

Fuente: (Astucuri, 1994)

2.2.4 Interacción fisicoquímica entre mineral y colector

Las interacciones entre un mineral y un colector son fundamentales en muchos procesos industriales, como la flotación en la minería. Estas interacciones pueden ser complejas y dependen de una serie de factores. Aquí se presentan algunas de las interacciones más importantes:

2.2.4.1 Adsorción física

Este proceso se basa en la adsorción de iones que poseen un signo contrario. Esta atracción se produce debido a dos fuerzas fundamentales: la atracción electrostática y las fuerzas de van der Waals. La atracción electrostática es la fuerza que se genera entre partículas cargadas eléctricamente, mientras que las fuerzas de van der Waals son interacciones atractivas o repulsivas entre moléculas. Es importante destacar que en este proceso no hay un intercambio o compartición de



electrones entre el colector y el mineral. Esto significa que no se forman enlaces químicos entre ellos, lo que facilita la separación posterior, este tipo de adsorción no es selectiva, es decir, no discrimina entre diferentes tipos de iones, siempre y cuando estos tengan un signo contrario. Esto puede ser tanto una ventaja como una desventaja, dependiendo del objetivo del proceso, otro aspecto relevante es que la desorción, es decir, la liberación de los iones adsorbidos, es un proceso rápido. Esto puede facilitar la recuperación de los iones de interés. (Arias Ccaso, 2018)

2.2.4.2 Doble Capa eléctrica

Como se indicó previamente, el proceso de hidratación de los sólidos está estrechamente ligado al carácter de la superficie de estos. Este proceso no se desarrolla de manera uniforme, sino que presenta ciertas particularidades, cuando se hidrata una red cristalina de naturaleza iónica, los cationes (iones con carga positiva) se hidratan y se disuelven a una velocidad mayor que los aniones (iones con carga negativa). Esto genera un desequilibrio eléctrico en el sistema, debido a que la superficie del sólido adquiere una carga negativa, para restablecer el equilibrio, la superficie cargada negativamente actúa de dos formas: por un lado, frena la disolución de más iones, y por otro lado, atrae cationes desde la solución. De esta manera, se forma una capa en la superficie del sólido, conocida como capa Stern, que presenta una distribución de carga equivalente. Este fenómeno es fundamental en muchos procesos industriales y naturales, ya que permite controlar la disolución y precipitación de los minerales, así como su interacción con otros componentes del sistema. Además, la formación de la capa Stern puede influir en las propiedades superficiales

del sólido, como su hidrofobicidad o hidrofiliidad, lo que puede tener implicaciones importantes en procesos como la flotación mineral. (Arias Ccaso, 2018)

Entre la ya mencionada capa Stern y la masa del líquido, se desarrolla una capa adicional conocida como la capa difusa de contra iones. Esta capa está compuesta por iones con carga opuesta a la de la superficie del sólido, y su presencia se debe a la necesidad de neutralizar la carga de la superficie, la capa Stern y la capa difusa de contra iones, en conjunto, forman lo que se conoce como la doble capa eléctrica. Esta estructura de dos capas es un factor crucial en la adsorción de reactivos sobre la superficie de los minerales, ya que determina la distribución de las cargas en la interfaz sólido-líquido y, por lo tanto, la interacción entre el mineral y los reactivos, en la Figura 6, se puede apreciar una representación gráfica de la doble capa eléctrica. Esta representación ayuda a visualizar la distribución de las cargas y la interacción entre las dos capas, proporcionando una mejor comprensión de este fenómeno complejo y su importancia en procesos como la flotación mineral. (Arias Ccaso, 2018)

2.2.4.3 Carga superficial

Los iones que se adhieren a la superficie del mineral a través de un proceso conocido como quimioadsorción son los responsables de generar la carga superficial. Estos iones son de vital importancia ya que determinan el potencial de la superficie, por lo que se les denomina iones determinantes del potencial. Estos iones pueden ser de diversas



naturalezas. Por ejemplo, pueden ser los propios iones que componen el mineral, lo que indica que la carga superficial puede ser una propiedad inherente del mineral en sí. También pueden ser iones de hidrógeno o hidroxilos, que son comunes en muchos ambientes acuosos y pueden adsorberse en la superficie del mineral alterando su carga, los iones colectores que forman sales insolubles también pueden actuar como iones determinantes del potencial. Estos iones colectores pueden interactuar con la superficie del mineral y formar compuestos insolubles, lo que puede cambiar la carga de la superficie y, por lo tanto, su potencial, también pueden ser iones que forman complejos iónicos con los iones presentes en la superficie del mineral. Estos complejos pueden alterar la carga de la superficie y, por lo tanto, su potencial. (Arias Ccaso, 2018)

La carga superficial de un mineral se determina por la densidad de adsorción de los iones determinantes del potencial en la superficie de estos. Para una sal de valencia 1, la carga superficial está dada por:

$$\sigma_S = F \cdot (\Gamma_{M^+} - \Gamma_{A^-}) \quad (3)$$

Donde:

F: Constante de Faraday [$C \cdot mol^{-1}$]

Γ_{M^+} : Densidad del catión determinante del potencial.

Γ_{A^-} : Densidad del anión determinante del potencial

Por lo general, los iones que determinan el potencial de la superficie de un mineral son los iones de hidrógeno (H^+) y los iones de hidroxilo (OH^-). Estos iones son especialmente importantes porque



pueden alterar el pH del sistema, lo que a su vez puede afectar la carga de la superficie del mineral.

En ciertas condiciones, es posible ajustar el pH del sistema de manera que la carga superficial del mineral sea cero. Este estado se conoce como el Punto Cero de Carga (PCC). En el PCC, la cantidad de iones H^+ y OH^- adsorbidos en la superficie del mineral es igual, lo que resulta en una carga neta de cero.

El PCC es un parámetro importante en muchos procesos, incluyendo la flotación mineral, ya que puede influir en la interacción entre el mineral y los reactivos. Conocer el PCC de un mineral puede ayudar a optimizar estos procesos y mejorar la eficiencia de la separación. Además, el PCC puede variar entre diferentes minerales, lo que puede ser utilizado para lograr una separación selectiva en un sistema de múltiples minerales.

2.2.4.4 Potencial Electroquímico

En el campo de la mineralogía y la metalurgia, existen ciertos parámetros que, aunque son fundamentales, no pueden medirse directamente. Uno de estos es la carga superficial de un mineral. A pesar de que no podemos medir esta carga de manera directa, tenemos la capacidad de determinar la diferencia de potencial que existe entre la superficie del mineral y la solución en la que se encuentra. A este parámetro se le conoce como potencial electroquímico. El potencial electroquímico es un concepto clave en la electroquímica y juega un papel crucial en procesos como la flotación de minerales. Este potencial puede visualizarse como si fuera un condensador. Un condensador es un



dispositivo que almacena energía en un campo eléctrico, y la analogía se basa en que la superficie del mineral y la solución actúan como las “placas” del condensador, mientras que la capa de agua o solución entre ellas actúa como el “dieléctrico”. La distancia entre estas “placas” es extremadamente pequeña, aproximadamente 3 angstroms, que es comparable al tamaño de una molécula de agua. Esto significa que la interacción entre la superficie del mineral y la solución es muy estrecha e intensa, lo que tiene implicaciones significativas en cómo se comporta el mineral en la solución y cómo puede ser manipulado en procesos industriales. Por lo tanto, aunque no podamos medir la carga superficial directamente, al entender y controlar el potencial electroquímico, podemos influir en el comportamiento del mineral de maneras útiles para la industria minera. (A. Ortiz et al., 2002)

En el estudio de la electroquímica y la adsorción de moléculas e iones en superficies, se ha notado una correlación directa entre el potencial eléctrico y tanto la cantidad como el tipo de moléculas o iones que se adsorben en una superficie. Por ejemplo, cuando se trata de moléculas orgánicas, se ha observado que su adsorción aumenta a medida que el potencial eléctrico disminuye. De hecho, la adsorción de estas moléculas alcanza su punto máximo cuando el potencial eléctrico es igual a cero. Sin embargo, a medida que el potencial eléctrico aumenta, la adsorción de moléculas orgánicas disminuye hasta llegar a cero, este fenómeno puede explicarse considerando la naturaleza de las partículas hidrofílicas y los campos eléctricos que generan. Las partículas hidrofílicas, que tienen afinidad por el agua, generan un campo eléctrico fuerte que atrae



moléculas e iones con una alta constante dieléctrica, como el agua. En contraste, un campo eléctrico débil atrae moléculas con una baja constante dieléctrica, como las moléculas orgánicas, por lo tanto, la manipulación del potencial eléctrico puede ser una herramienta efectiva para controlar la adsorción de diferentes tipos de moléculas e iones en una superficie, lo cual tiene aplicaciones importantes en áreas como la química de superficies, la ingeniería de materiales y la tecnología de sensores. (Arias Ccaso, 2018)

El potencial electroquímico se calcula de acuerdo a la ecuación 4:

$$\varepsilon = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \text{Ln} \left(\frac{a}{a^0} \right) \quad (4)$$

Donde:

ε : *Potencial electroquímico [Volt]*

T : *Temperatura absoluta [K]*

R : *Constante de los gases [$J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot K^{-1}$]*

n : *Valencia del ion determinante del potencial*

a : *actividad del ión determinante del potencial en solución*

a^0 : *actividad del ión determinante del potencial al PCC*

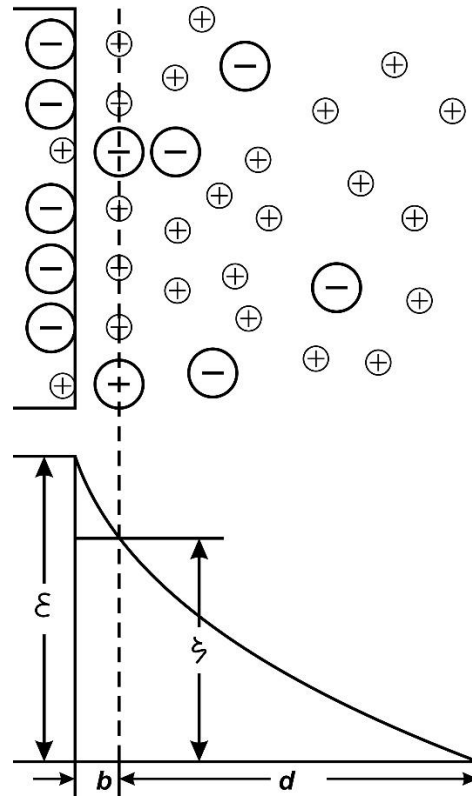


Figura 6. Formación de la doble capa de cargas eléctricas.

Fuente: (Alexander, 1963)

ϵ : Potencial electroquímico.

ξ : Potencial electrocinético.

b : Zona de la doble capa.

d : Zona de difusión.

2.2.4.5 Potencial Z

El potencial electrocinético, también conocido como potencial Z, es un concepto fundamental en la electroquímica y la física de superficies. Este potencial se manifiesta cuando un sólido comienza a moverse en un líquido, generando una dinámica interesante entre los iones que están en contacto con la superficie del sólido y los que se encuentran en la zona difusa del líquido. Los iones que forman la capa Stern, una capa de iones



que se encuentra firmemente asociada a la superficie del sólido, permanece adheridos a la superficie y se mueven junto con el sólido. Por otro lado, los iones que se encuentran en la zona difusa, una región donde la densidad de iones disminuye hasta alcanzar la concentración del líquido a granel, pueden permanecer inmóviles o moverse en una dirección diferente a la del sólido. Este movimiento diferencial entre las dos superficies cargadas eléctricamente, la superficie del sólido y la interfaz de la zona difusa, genera un potencial. Este potencial, que surge entre las dos superficies que se mueven en direcciones opuestas, es lo que se conoce como potencial electrocinético o potencial Z (ζ), es un parámetro crítico en muchos procesos industriales y científicos, incluyendo la estabilización de coloides, la formulación de pinturas y tintas, el tratamiento de aguas residuales, y la fabricación de productos farmacéuticos y cosméticos. Al medir y controlar el potencial Z (ζ), los científicos e ingenieros pueden manipular la interacción entre partículas sólidas y líquidos para optimizar estos procesos. (Napier-Munn, 2005)

El potencial Z (ζ) es un parámetro crítico en la electroquímica y la física de superficies que depende de la velocidad del movimiento relativo entre el sólido y la zona de difusión. Este potencial es esencial para entender cómo las partículas interactúan en una solución y cómo se pueden manipular estas interacciones para optimizar diversos procesos industriales y científicos, para medir el potencial Z (ζ), existen varios experimentos físicos disponibles. Los más conocidos y ampliamente utilizados son la electroforesis, el potencial de flujo y los sensores ultrasónicos. Cada uno de estos métodos tiene su propio enfoque para



producir una velocidad diferencial, denotada como dv , entre la interfaz de la superficie del sólido y el líquido. En la electroforesis, la velocidad diferencial dv se induce aplicando un campo eléctrico. Las partículas cargadas se moverán a través del líquido a una velocidad que depende de su carga y del campo eléctrico aplicado, permitiendo así la medición del potencial Z (ζ), en el potencial de flujo, la velocidad diferencial dv se genera utilizando un fluido de transmisión. Cuando un líquido fluye sobre una superficie sólida, puede inducir un movimiento relativo entre la superficie y la zona de difusión, lo que permite medir el potencial Z (ζ). En el caso de los sensores ultrasónicos, la velocidad diferencial dv se induce utilizando un campo de sonido. Las ondas de sonido pueden mover las partículas a diferentes velocidades dependiendo de su tamaño y forma, lo que puede utilizarse para medir el potencial Z , por lo tanto, aunque la medición del potencial Z puede ser un desafío debido a la naturaleza microscópica de las interacciones que está midiendo, existen varias técnicas experimentales que pueden utilizarse para obtener esta información crucial. Estas técnicas, junto con una comprensión sólida de la teoría subyacente, permiten a los científicos e ingenieros manipular y controlar las interacciones entre partículas en una amplia gama de aplicaciones. (Napier-Munn, 2005)

Para calcular el potencial electroquímico, se utiliza una fórmula N° 5 que tiene en cuenta la concentración de iones en la capa doble. Esta fórmula es fundamental para la electroquímica y permite a los científicos e ingenieros predecir y manipular el comportamiento de los sistemas electroquímicos en una variedad de aplicaciones, desde la generación de

energía hasta la protección contra la corrosión, el tratamiento de aguas residuales y se calcula según la fórmula:

$$\varepsilon = \frac{RT}{F} \ln \frac{(C)B}{(C)A} \quad (5)$$

Donde:

(C)A y (C)B son las concentraciones de los iones en la superficie del sólido y en el líquido, y R, T, F constantes conocidas.

Utilizando el método de electroforesis, se calcula de acuerdo a la ecuación 5:

$$\xi = \frac{4 \eta V}{DE} \quad (6)$$

donde:

D : es la constante dieléctrica del líquido.

η : es su viscosidad.

V : es la velocidad del movimiento del sólido.

E : es la intensidad del campo eléctrico.

El pH al cual el potencial electrocinético es cero, se denomina punto isoeléctrico (IEP). En los óxidos y silicatos, el punto Cero de Carga (PCC) y el punto isoeléctrico (IEP) son iguales. En la Figura 5, se puede ver la representación del potencial electroquímico y potencia Z de un silicato u óxido en función del pH.

En esta fórmula, se describen varios conceptos y parámetros relacionados con la electroquímica y la física de líquidos y sólidos. Aquí,



D representa la constante dieléctrica del líquido, que es una medida de la capacidad del líquido para resistir la formación de un campo eléctrico en su interior. Por otro lado, **η** es la viscosidad del líquido, que es una medida de su resistencia al flujo o, en términos más simples, su “grosor”, **V** se refiere a la velocidad del movimiento del sólido, que puede ser influenciada por varios factores, incluyendo la viscosidad del líquido y la intensidad del campo eléctrico, **E** es la intensidad del campo eléctrico, que es una medida de la cantidad de fuerza eléctrica que se ejerce sobre una carga eléctrica en un punto específico del campo. El punto isoeléctrico (**IEP**) es el valor de pH en el cual el potencial electrocinético es cero. En términos más simples, es el pH en el que la carga neta de una partícula (como un óxido o un silicato) es cero. En los óxidos y silicatos, este punto coincide con el punto Cero de Carga (**PCC**), que es el pH en el que la superficie de la partícula no tiene carga neta. (Napier-Munn, 2005)

La Figura 7, aunque no se muestra aquí, parece representar la relación entre el potencial electroquímico y la potencia **Z** (una medida de la movilidad de las partículas en un campo eléctrico) de un silicato u óxido en función del pH. Esta representación puede proporcionar información valiosa sobre cómo las propiedades electroquímicas de estos materiales cambian con el pH.

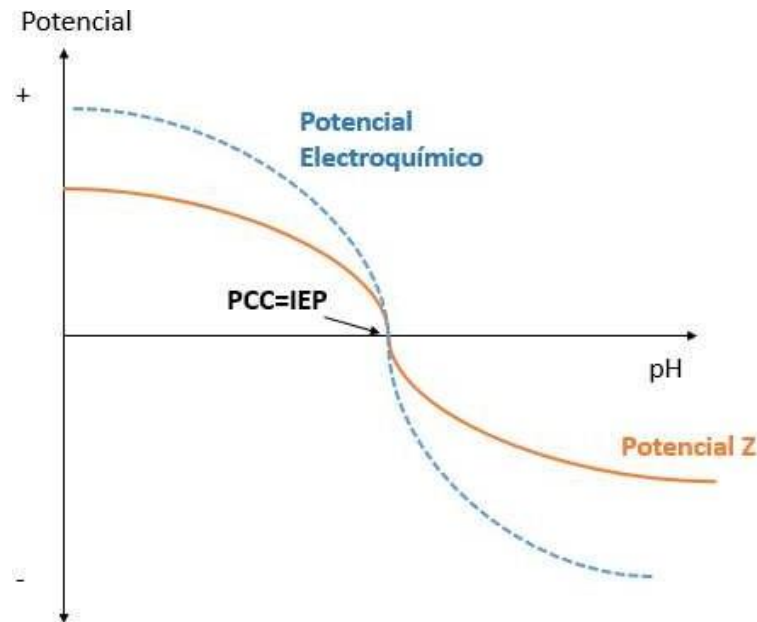


Figura 7. Potencial Z versus pH.

Fuente: (Napier-Munn, 2005)

La evaluación del efecto de un colector en una solución con un pH específico, en relación con el punto de carga cero ($pHPCC$) de un mineral y la constante de disociación ácida (pKa) del colector. Un colector es una sustancia que se utiliza en los procesos de flotación para facilitar la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire, permitiendo su separación del resto del material. Los colectores pueden ser aniónicos o catiónicos, dependiendo de la carga de los iones que producen cuando se disocian en solución, cuando el pH de la solución es mayor o igual al pKa del colector ($pH \geq pKa$), los colectores aniónicos pueden disociarse en iones. Esto significa que se separan en sus componentes cargados, lo que puede facilitar su interacción con las partículas minerales. Además, si el pH de la solución es mayor o igual al $pHPCC$ del mineral ($pH \geq pHPCC$), el potencial de la superficie del mineral es positivo. Esto significa que la superficie del mineral tiene una carga neta positiva, lo que puede afectar



la forma en que interactúa con los colectores y otros iones en la solución, por lo tanto, si la constante de disociación ácida del colector es menor o igual al $pHPCC$ del mineral ($pKa \leq pHPCC$), la adsorción del colector en la superficie del mineral puede ocurrir. La adsorción se refiere al proceso por el cual los átomos, iones o moléculas de una sustancia (en este caso, el colector) se adhieren a la superficie de otra sustancia (en este caso, el mineral). Por otro lado, para los colectores catiónicos, la adsorción del colector en la superficie del mineral solo ocurre en la doble capa eléctrica si la constante de disociación ácida del colector es mayor o igual al $pHPCC$ del mineral ($pKa \geq pHPCC$). La doble capa eléctrica es una estructura que se forma en la interfaz entre una superficie sólida y un líquido, y está compuesta por dos capas de carga opuestas. En este caso, los colectores catiónicos se adsorben en esta doble capa bajo las condiciones especificadas. (Napier-Munn, 2005)

Cuando un sólido está inmerso en un líquido, los iones en el líquido forman dos capas alrededor de la superficie del sólido. La primera capa, conocida como la capa Stern, está compuesta por iones que están firmemente asociados con la superficie del sólido. Estos iones se mantienen en su lugar, incluso cuando hay un movimiento relativo entre el sólido y el líquido. La segunda capa, conocida como la capa difusa, está compuesta por iones que son libres para moverse con el líquido. Estos iones pueden ser arrastrados por el movimiento del líquido, creando una separación entre las dos capas de iones, esta separación crea un plano de corte entre la capa Stern y la capa difusa. A lo largo de este plano de corte, se genera un potencial eléctrico entre las dos superficies. Este potencial

eléctrico se conoce como potencial electrocinético o potencial zeta, representado por el símbolo “ ξ ”.

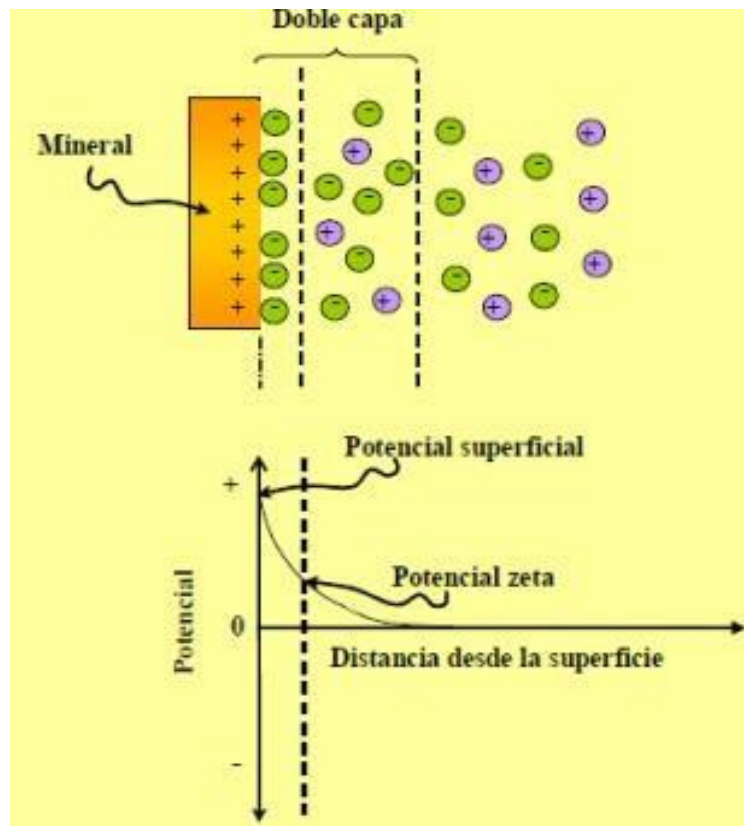


Figura 8. Potencial Zeta.

Fuente: (Astucuri, 1994)

El pH al cual el potencial superficial es cero se denomina punto cero de carga (PCC). Aquel al cual la potencial zeta es igual a cero, se denomina punto isoelectrico (IEP). En los óxidos y silicatos estos puntos son iguales.

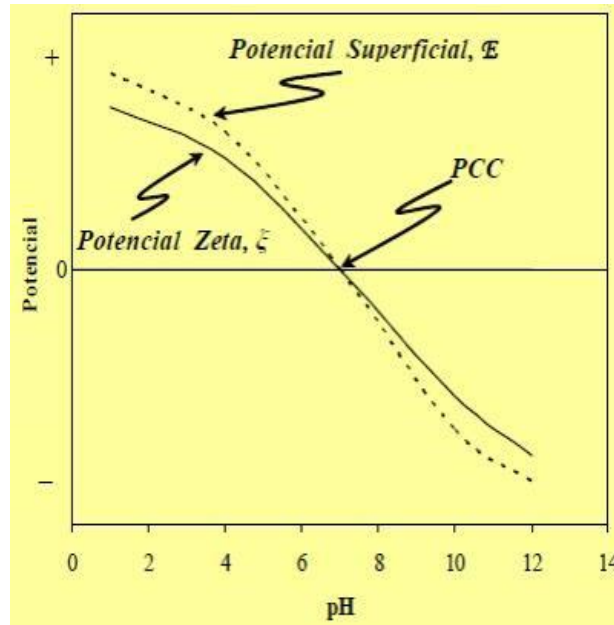


Figura 9. Representación del potencial de superficie y potencia Z.

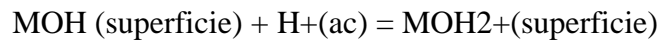
Fuente: (Astucuri, 1994)

a) **Potencial Electrocinético de los Minerales Oxidados**

Las propiedades de los minerales óxidos cuando interactúan con el agua. Los minerales óxidos, cuando entran en contacto con el agua, forman lo que se conoce como superficies hidroxiladas. Este proceso ocurre cuando el sistema alcanza un estado de equilibrio con la solución acuosa circundante. La carga superficial de estos óxidos, que depende del pH de la solución, puede explicarse por la disociación y/o adsorción de iones hidrógeno en la superficie hidroxilada. En otras palabras, los iones hidrógeno pueden separarse de la molécula de agua y adherirse a la superficie del óxido, o pueden simplemente adherirse a la superficie sin separarse de la molécula de agua. Este fenómeno está relacionado con los grupos hidroxilos (OH) presentes en la superficie del mineral óxido. (Suli et al., 2017)



(7)



(8)

Las ecuaciones (7) y (8) representan las reacciones químicas que pueden ocurrir en la superficie del mineral óxido. En la ecuación (7), MOH representa una molécula de óxido metálico con un grupo hidroxilo adjunto. Esta molécula puede disociarse en un ion metálico cargado negativamente (MO^-) y un ion hidrógeno (H^+). En la ecuación (8), una molécula de MOH puede reaccionar con un ion hidrógeno para formar un ion metálico con dos hidrógenos adjuntos (MOH_2^+).

En estas ecuaciones, M representa el átomo de metal en la interfaz entre el mineral óxido y la solución acuosa. Dependiendo del pH de la solución, los óxidos pueden llevar una carga positiva o negativa. En condiciones más ácidas, es decir, cuando el pH es menor que el punto isoeléctrico, los óxidos llevan una carga positiva. Por otro lado, en condiciones alcalinas, es decir, cuando el pH es mayor que el punto isoeléctrico, los óxidos llevan una carga negativa. Esta propiedad es fundamental para entender cómo los minerales óxidos interactúan con su entorno y cómo pueden ser manipulados en diversas aplicaciones industriales y científicas. (Suli et al., 2017)

2.2.4.5.1 Potencial Electrocinético de los Minerales Sulfurados

El potencial electrocinético, también conocido como potencial zeta, de los minerales sulfuros, especialmente aquellos con superficies



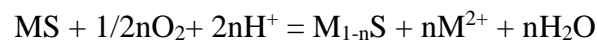
recién expuestas, es negativo a lo largo de todo el rango de pH. Esto significa que estas superficies tienen una carga neta negativa, independientemente del nivel de acidez o alcalinidad de la solución en la que se encuentren. Estas superficies son particularmente sensibles a la oxidación, un proceso químico que implica la pérdida de electrones. Una superficie de mineral sulfuroso que ha sido completamente oxidada puede experimentar cambios en su potencial zeta de hasta ± 80 mV en comparación con una superficie no oxidada. Esto indica que la oxidación puede tener un impacto significativo en las propiedades electrocinéticas de estos minerales, el punto isoeléctrico de los minerales sulfurosos, es decir, el pH en el que la carga neta de la superficie del mineral es cero, se determina bajo ciertas condiciones. Este punto isoeléctrico puede verse afectado por el grado de oxidación superficial del mineral. En muchos casos, lo que se mide es el punto isoeléctrico aparente, que refleja el grado de oxidación de la superficie del mineral. El potencial electrocinético de algunos minerales sulfurosos puede cambiar con el tiempo durante el acondicionamiento, un proceso que prepara los minerales para su procesamiento posterior. A medida que pasa el tiempo, la efectividad de este acondicionamiento puede disminuir, la oxidación de los minerales sulfurosos comienza con la disolución preferencial del metal, lo que resulta en la formación de una superficie rica en azufre y deficiente en metal. Esta superficie luego se oxida para formar tiosulfatos y azufre elemental. (Dudenkov et al., 1980)

El mecanismo aceptado para la etapa inicial de la oxidación de los sulfuros implica la migración del metal desde la capa más externa de la



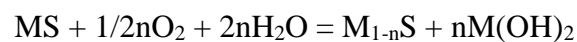
superficie del mineral, seguida de su disolución en soluciones ácidas. En soluciones alcalinas, se forma una capa de hidróxido metálico sobre la superficie del mineral, que es rica en azufre. Esta superficie rica en azufre se caracteriza por una deficiencia de metal en la red de sulfuros, que se manifiesta como polisulfuros o azufre elemental, dependiendo del grado de oxidación. La etapa inicial de la oxidación en la superficie de los minerales sulfurosos puede representarse con una ecuación química específica, que no se proporciona aquí. Esta ecuación proporcionaría una representación detallada de las reacciones químicas que ocurren durante la oxidación. (Dudenkov et al., 1980)

En condiciones ácidas:



(9)

En condiciones alcalinas:



(10)

El polisulfuro, un compuesto químico que contiene azufre, puede experimentar un proceso de oxidación adicional. En este proceso, el polisulfuro se transforma en otros compuestos de azufre, como el tiosulfato, el sulfito y los iones sulfato. Este proceso de oxidación puede ocurrir en una solución que es neutra o alcalina, es decir, una solución con un pH de 7 o superior. La superficie del mineral que es rica en azufre o deficiente en metal (denotada como $M_{1-n}S$) tiene propiedades hidrófobas, lo que significa que repele el agua. Esta característica es crucial para el



proceso de flotación con colectores, un método comúnmente utilizado en la minería para separar los minerales de la ganga, si en la superficie del mineral se forman hidróxidos, esta se vuelve hidrófila, es decir, atrae el agua. Esta propiedad puede deprimir la flotación del mineral, lo que significa que puede reducir la eficacia del proceso de flotación. Si la capa de hidróxido en la superficie del mineral es gruesa, puede incluso impedir la adsorción de los colectores, lo que dificulta aún más la flotación. Es importante tener en cuenta que las reacciones químicas que ocurren durante estos procesos, como las representadas por las ecuaciones (8) y (9), dependen de varias condiciones. Estas incluyen el pH de la solución, el contenido de oxígeno y el potencial de oxidación de la pulpa. Estos factores pueden influir en la velocidad y la eficacia de las reacciones, y por lo tanto, en el resultado final del proceso de flotación. Por lo tanto, es crucial controlar y optimizar estas condiciones para maximizar la eficacia de la flotación. (Dudenkov et al., 1980)

2.2.4.6 Adsorción química

En la adsorción química de los colectores, los compuestos pierden su individualidad química y forman nuevos compuestos superficiales. (Xiong et al., 2013a)

2.2.5 Contacto de Tres Fases

El análisis de las diferentes fases y sus interfaces nos conduce a la consideración del contacto trifásico, que es de suma importancia ya que refleja la realidad de lo que ocurre durante el proceso de flotación. En el mecanismo de



flotación, una partícula sólida se une a una burbuja de aire a través de un contacto trifásico, que posee propiedades únicas y especiales. (Muñiz Delgado, 2010)

Para un análisis más detallado, es útil visualizar inicialmente la fase sólida como una superficie hidrofóbica, es decir, que repele el agua, sumergida en agua, donde se introduce una burbuja de aire (como se puede ver en la Figura N° 10). En el caso más sencillo, esta superficie podría ser una placa de vidrio recubierta con un hidrocarburo. (Muñiz Delgado, 2010)

Es importante destacar que el contacto entre dos fases siempre crea una superficie, y el contacto entre una superficie y otra (que sería la tercera fase) necesariamente forma una línea. Por lo tanto, para describir matemáticamente esta línea de contacto trifásico, es más conveniente utilizar el ángulo formado por las superficies de contacto de las fases (como se puede ver en el ángulo θ en la Figura N° 10). (Muñiz Delgado, 2010)

Este ángulo es fundamental para entender cómo interactúan las diferentes fases y cómo estas interacciones pueden influir en el proceso de flotación. Por lo tanto, su estudio y comprensión son esenciales para optimizar el proceso de flotación y maximizar su eficiencia. (Muñiz Delgado, 2010)

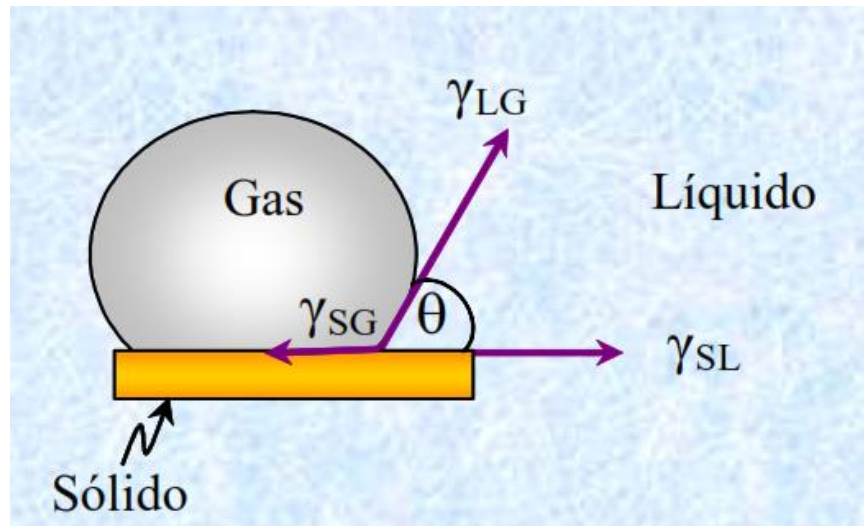


Figura 10. Definición del ángulo de contacto.

Fuente: (Alexander, 1963)

2.2.6 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es un concepto clave en el estudio de las interacciones entre diferentes fases. Para ilustrar este concepto, consideremos un escenario en el que, en lugar de una placa de vidrio, tenemos una superficie de mineral que ha sido hidrofobizada, es decir, tratada para repeler el agua, por un colector, si colocamos esta superficie de mineral debajo del agua e introducimos una burbuja de aire sobre ella, la burbuja se adherirá a la superficie, desplazando el agua. La línea de contacto trifásico, que es el punto de encuentro entre la burbuja de aire, el agua y la superficie del mineral, se extenderá en forma de círculo sobre el plano de la superficie del mineral, si trazamos una línea tangente a la superficie de la burbuja en cualquier punto de este contacto trifásico, el ángulo formado entre esta línea tangente y la superficie del mineral se conoce como el ángulo de contacto, denotado como θ . Este ángulo es fundamental para entender cómo interactúan las tres fases y puede proporcionar información valiosa sobre las propiedades de la superficie del mineral y su comportamiento durante el proceso



de flotación. Por lo tanto, su estudio y comprensión son esenciales para optimizar el proceso de flotación y maximizar su eficiencia. (Astucuri, 1994)

En el campo de la flotación, los ángulos de contacto desempeñan un papel crucial. Esto se debe a que proporcionan una conexión cuantitativa entre las propiedades hidrofóbicas de un mineral (o de un reactivo que induce la hidrofobicidad) y su capacidad para flotar. En otras palabras, el ángulo de contacto puede ser un indicador de cuán bien un mineral puede ser separado de otros materiales a través del proceso de flotación. (Muñiz Delgado, 2010)

Para establecer esta relación entre la mojabilidad de un mineral y el ángulo de contacto, no se utiliza directamente el ángulo θ , sino el coseno de este ángulo, es decir, $\text{Cos } \theta$. Si observamos superficies con diferentes niveles de mojabilidad, ya sea colocando una gota de agua sobre ellas en la atmósfera o introduciendo una burbuja de aire debajo del agua, podemos llegar a varias conclusiones, como se puede ver en la Figura N° 9. (Muñiz Delgado, 2010)

Una de las conclusiones clave es que existe una equivalencia entre las propiedades hidrofóbicas y aerofílicas. En otras palabras, una superficie que repele el agua (hidrofóbica) también tiende a atraer el aire (aerofílica), y viceversa. El ángulo de contacto, o más precisamente su coseno, refleja estas propiedades de manera cuantitativa. Por lo tanto, el estudio del ángulo de contacto y su coseno puede proporcionar información valiosa sobre las propiedades de la superficie de un mineral y su comportamiento durante el proceso de flotación. Esta información puede ser útil para optimizar el proceso de flotación y mejorar la eficiencia de la separación de minerales. (Linares Gutiérrez, 2001)

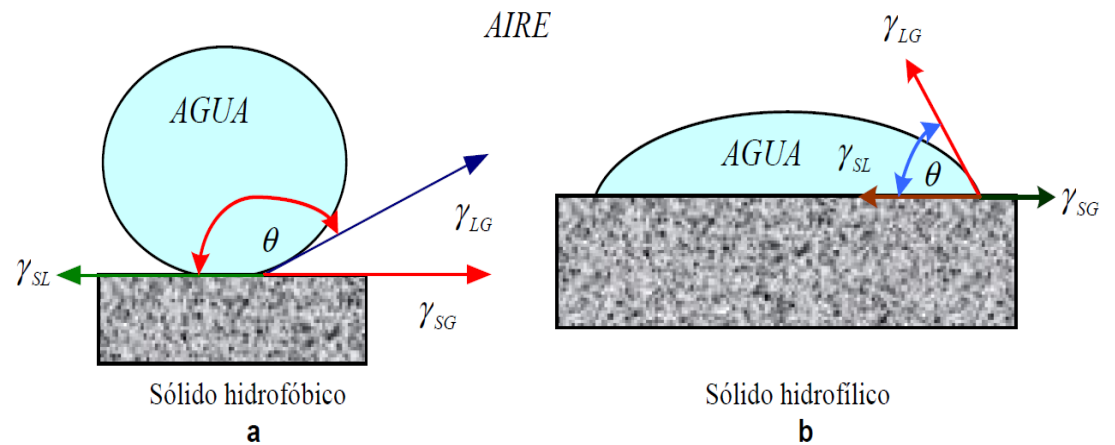


Figura 11. Ángulos de contacto en sólidos de distintas mojabilidades.

Fuente: (Alexander, 1963)

2.2.7 Histéresis de mojabilidad

Cuando se deposita una gota de líquido, sin importar su naturaleza, sobre una superficie que se encuentra en una posición inclinada (como se puede observar en la Figura 12), se desencadena un fenómeno interesante. Esta gota comienza a deslizarse hacia abajo, impulsada por la fuerza de la gravedad que actúa sobre ella, no obstante, este movimiento no es tan sencillo como parece. La gota de líquido también experimenta una resistencia al deslizamiento. Esta resistencia puede manifestarse de varias formas, como un retraso en el inicio del movimiento o incluso una negativa total a deslizarse por la superficie. (Alexander, 1963)

Este fenómeno de resistencia al movimiento se produce en la interfaz de contacto entre el líquido, la superficie y el aire, que forma un perímetro trifásico. A este fenómeno se le conoce como histéresis de mojabilidad. La histéresis de mojabilidad es un concepto clave en la física de superficies y tiene importantes implicaciones en una variedad de campos, desde la ingeniería de materiales hasta la biología. Es esencial para entender cómo los líquidos interactúan con las superficies y cómo podemos manipular estas interacciones para nuestros

propósitos, ya sea para aumentar o disminuir la mojabilidad de una superficie. Por lo tanto, la comprensión de la histéresis de mojabilidad puede tener aplicaciones prácticas significativas en la vida cotidiana y en la industria. (Alexander, 1963)

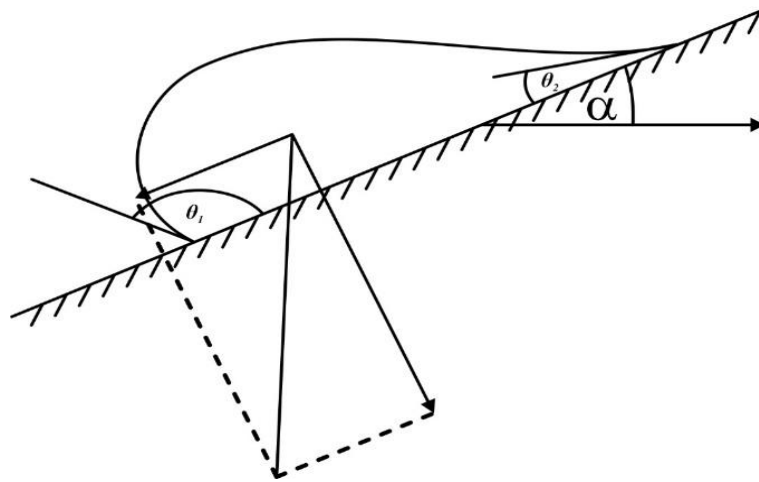


Figura 12. Fenómeno de histéresis de mojabilidad.

Fuente: (Alexander, 1963)

Un análisis detallado del fenómeno de la histéresis revela varios factores que influyen en su comportamiento. En primer lugar, se descubrió que la dirección de la histéresis es un factor crucial. Esto significa que la histéresis puede variar dependiendo de si la fase gaseosa está desplazando a la fase líquida (θ_2) o si la fase líquida está desplazando a la fase gaseosa (θ_1). En segundo lugar, se observó que el estado de movimiento de la gota también afecta la histéresis. Específicamente, se encontró que la histéresis estática, que se produce cuando la gota está en reposo, es significativamente mayor que la histéresis dinámica, que se produce cuando la gota está en movimiento. Finalmente, se determinó que la naturaleza de la superficie sobre la que se encuentra la gota también juega un papel importante en la histéresis. Al principio, se pensaba que la histéresis era



simplemente el resultado de las fuerzas de fricción generadas entre la gota y la superficie irregular debido a las imperfecciones de esta última. (Alexander, 1963)

Sin embargo, Rebinder demostró que la histéresis también puede ocurrir en superficies perfectamente pulidas y tratadas con reactivos de flotación, como los colectores y los depresores. Este hallazgo se ilustra en la Figura 13, que muestra dos series de experimentos realizados con galena, en ambos experimentos, se colocó una burbuja de aire sobre una superficie de galena perfectamente pulida y previamente tratada. En el primer experimento (caso A), la superficie fue tratada con bicromato de potasio, un depresor de la galena en los circuitos de flotación. En el segundo experimento (caso B), la superficie fue tratada con un xantato, que es un colector de galena. (Alexander, 1963)

En ambos casos, se utilizó una jeringa para evacuar lentamente el aire de la burbuja. Se encontró que en el caso A, prácticamente no había histéresis ni cambio en el ángulo de contacto. Sin embargo, en el caso B, se observó una marcada histéresis y un notable aumento en el ángulo de contacto. Este experimento destaca la importancia de la histéresis en el contacto trifásico y, en particular, en la adhesión de las partículas de mineral a las burbujas de aire. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para la comprensión y manipulación de los procesos de flotación en la industria minera. (Alexander, 1963)

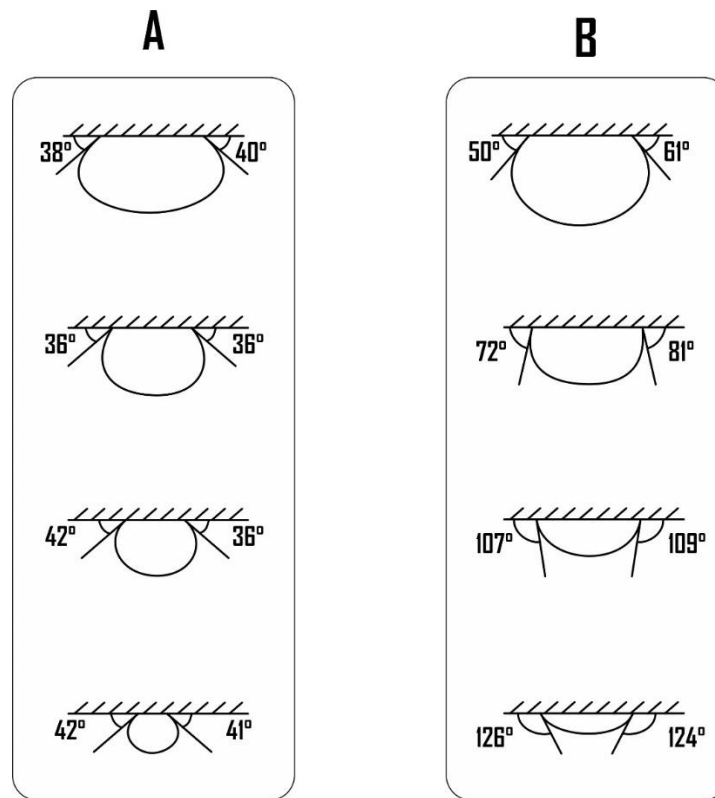


Figura 13. Histéresis de mojabilidad en partículas minerales.

Fuente: (Alexander, 1963)

2.2.8 Parámetros operacionales en flotación

En el proceso de flotación, existen varios parámetros operacionales que juegan un papel crucial. Aquí se proporciona una descripción más detallada y ampliada de estos parámetros:

- **Características asociadas a la etapa de molienda y clasificación:**
 - **Granulometría del mineral a flotar:** Se refiere al tamaño de las partículas del mineral que se someterá al proceso de flotación.
 - **Grado de oxidación durante la molienda:** Este parámetro indica el nivel de oxidación que el mineral experimenta durante la etapa de molienda.



- **Reactivos adicionados en la molienda:** Se refiere a los compuestos químicos que se añaden durante la molienda para mejorar la eficiencia del proceso de flotación.
 - **Tiempo de acondicionamiento:** Es el período durante el cual los reactivos tienen la oportunidad de interactuar con las partículas de mineral antes de la flotación.
 - **Grado de liberación:** Este término se refiere a la extensión en la que las partículas de mineral están libres de las partículas de ganga antes de la flotación.
 - **Densidad de pulpa:** Es la relación entre la masa de las partículas sólidas y el volumen total de la pulpa.
- **Características del proceso de flotación:**
- **Tipo y dosificación de reactivos químicos agregados:** Se refiere a los tipos de reactivos químicos utilizados en el proceso de flotación y la cantidad en que se añaden.
 - **Secuencia de adición de reactivos:** Este parámetro indica el orden en que se añaden los reactivos al proceso.
 - **Densidad de la pulpa:** Al igual que en la etapa de molienda, la densidad de la pulpa es un factor importante en el proceso de flotación.
 - **Temperatura de la pulpa y pH:** Estos parámetros indican las condiciones físicas y químicas de la pulpa durante el proceso de flotación.



- **Tiempo de acondicionamiento:** Al igual que en la etapa de molienda, el tiempo de acondicionamiento es crucial en el proceso de flotación.
- **Altura de la espuma:** Este parámetro se refiere a la altura de la capa de espuma que se forma durante el proceso de flotación.
- **Calidad del agua usada:** La calidad del agua utilizada en el proceso de flotación puede afectar la eficiencia del proceso.
- **Flujo de aire:** Este parámetro se refiere a la cantidad de aire que se introduce en el proceso de flotación.
- **Características relativas a la máquina de flotación:**
 - **Geometría de la celda:** Se refiere a la forma y tamaño de la celda de flotación utilizada en el proceso.
 - **Grado y tipo de aireación (auto aspirada o neumática):** Este parámetro indica el nivel y el método de aireación utilizado en el proceso de flotación.
 - **Tiempo de flotación (volumen útil de la celda):** Se refiere al tiempo durante el cual se lleva a cabo el proceso de flotación.
 - **Agitación de la pulpa:** Este parámetro indica el grado de agitación de la pulpa durante el proceso de flotación.
 - **Tipo de rebalse de espuma:** Se refiere al método utilizado para recoger la espuma que se forma durante el proceso de flotación.



- **Características de rotor y estator:** Estos parámetros se refieren a las características de los componentes de la máquina de flotación que generan la agitación y la aireación.
- **Características del banco de flotación:** Este parámetro se refiere a las características del conjunto de celdas de flotación utilizadas en el proceso.
- **Etapas de flotación recuperadoras:**
 - **Etapa Rougher o desbaste:** Esta es la primera etapa del proceso de flotación, donde se busca recuperar la mayor cantidad posible de mineral valioso.
 - **Etapa Scavenger o barrido:** En esta etapa, se busca recuperar el mineral valioso que no fue recuperado en la etapa de desbaste.
- **Etapas de flotación limpiadoras o concentradoras:**
 - **Etapa Cleaner o limpieza:** En esta etapa, se busca eliminar las impurezas que se hayan adherido a las partículas de mineral durante las etapas de desbaste y barrido.
 - **Etapa Recleaner o relimpieza:** Esta es la última etapa del proceso de flotación, donde se realiza una limpieza final para obtener un concentrado de alta calidad.

2.2.9 Pruebas de flotación

Las pruebas de flotación son esenciales para optimizar el proceso de flotación y se pueden dividir en tres tipos principales:



a. Pruebas de laboratorio semicontinuas (batch)

Según (Wills & Finch, 2015), las pruebas de laboratorio semicontinuas, también conocidas como pruebas batch, son una parte integral del estudio y optimización del proceso de flotación. En estas pruebas, se utilizan celdas de flotación de tamaño específico, comúnmente empleadas en la flotación de sulfuros. Estas celdas de prueba tienen un rango de trabajo de 1,6 a 5 litros y normalmente contienen entre 500 a 2000 gramos de sólidos molidos.

Las pruebas batch permiten el estudio y la manipulación de varias variables clave en el proceso de flotación. Estas variables incluyen:

- Tipo de reactivos: Los reactivos utilizados en el proceso de flotación pueden variar dependiendo del tipo de mineral que se está procesando. La elección del reactivo adecuado es crucial para la eficiencia del proceso.
- Dosis de reactivos: La cantidad de reactivo que se añade al proceso también puede afectar la eficiencia de la flotación. Es importante determinar la dosis óptima para maximizar la recuperación del mineral.
- Densidad de pulpa: La densidad de la pulpa, que es la relación entre la masa de las partículas sólidas y el volumen total de la pulpa, puede influir en la eficiencia del proceso de flotación.
- pH: El pH de la pulpa puede afectar la eficiencia de la flotación. Diferentes minerales responden de manera óptima a diferentes niveles de pH.
- Tipo de agua: El tipo de agua utilizada en el proceso de flotación puede afectar la eficiencia del proceso. Por ejemplo, el agua con alto contenido de sales puede afectar la eficacia de ciertos reactivos.



- Aireación y acondicionamiento: La aireación se refiere a la introducción de aire en el proceso de flotación, mientras que el acondicionamiento se refiere al tiempo que se permite que los reactivos interactúen con las partículas de mineral antes de la flotación.
- Temperatura: La temperatura a la que se realiza el proceso de flotación puede influir en la eficacia de la flotación. Algunos procesos pueden requerir temperaturas más altas o más bajas para una eficiencia óptima.

Estas pruebas de laboratorio semicontinuas son fundamentales para entender y optimizar el proceso de flotación, permitiendo a los ingenieros y científicos ajustar y afinar el proceso para obtener los mejores resultados posibles.

2.2.9.1 Pruebas de Ciclo o Pruebas de Flotación de Ciclo Cerrado ("Locked Cycle Flotation Tests")

Según (Á. A. Ortiz & Valencia, 1999), en las primeras etapas de la experimentación metalúrgica, es aconsejable realizar pruebas de flotación de desbaste (rougher) y desbaste-barrido (rougher-scavenger). Estas pruebas son rápidas y rentables, lo que las hace ideales para esta fase inicial del trabajo. Las pruebas de desbaste se centran en la recuperación máxima de minerales valiosos, mientras que las pruebas de desbaste-barrido buscan recuperar cualquier mineral valioso que no se haya recogido durante la etapa de desbaste, una vez que se ha seleccionado el reactivo o los reactivos adecuados basándose en los resultados de estas pruebas iniciales, se puede proceder a realizar pruebas más complejas. Estas pruebas más avanzadas pueden incluir etapas de limpieza, que se centran en la



eliminación de impurezas de las partículas de mineral recuperadas, y/o pruebas de ciclo cerrado. (Á. A. Ortiz & Valencia, 1999)

Las pruebas de ciclo cerrado, también conocidas como “Locked Cycle Flotation Tests”, son pruebas de flotación más sofisticadas y detalladas. En estas pruebas, se recirculan los productos de la flotación a través del proceso para simular un circuito de flotación en funcionamiento. Esto permite a los investigadores estudiar el rendimiento del proceso de flotación a lo largo de varios ciclos, proporcionando una visión más realista de cómo funcionaría el proceso en un entorno de producción a gran escala. (Á. A. Ortiz & Valencia, 1999)

Estas pruebas de ciclo cerrado son esenciales para optimizar el proceso de flotación y para entender cómo los diferentes parámetros y condiciones pueden afectar el rendimiento del proceso a lo largo del tiempo. Por lo tanto, son una herramienta valiosa para los ingenieros y científicos que trabajan en la mejora y optimización de los procesos de flotación. (Á. A. Ortiz & Valencia, 1999)

2.2.9.2 Pruebas continuas y de planta piloto

Según (Azañero Ortiz, 2010), el proceso de validación y optimización de un reactivo para el tratamiento de minerales implica varias etapas, que van desde pruebas de laboratorio hasta la implementación a escala industrial.

Para validar la eficacia de un reactivo identificado en las pruebas de laboratorio, es esencial realizar pruebas a escala industrial. Si los resultados obtenidos en el laboratorio se confirman a esta escala más



grande, entonces podemos concluir que este reactivo es el más adecuado para tratar el mineral en cuestión. En consecuencia, se recomendará su uso en la planta de procesamiento. Las pruebas industriales se llevarán a cabo en una sección específica o en toda la planta durante un periodo de tiempo suficiente para evaluar la efectividad del reactivo. Una vez que se haya demostrado su eficacia, el siguiente paso será realizar una evaluación económica. Esta evaluación considerará el costo del reactivo y los beneficios metalúrgicos obtenidos. (Azañero Ortiz, 2010)

En el diseño experimental de un circuito de flotación, se pueden distinguir cuatro etapas principales:

Etapla 1: En esta etapa, se realizan pruebas por lotes a escala de laboratorio. El objetivo es determinar y estandarizar las condiciones de trabajo óptimas.

Etapla 2: Esta etapa implica la simulación experimental de circuitos de flotación a nivel de laboratorio. Se utiliza la técnica de pruebas de ciclo y se aplican las mejores condiciones experimentales determinadas en la etapa anterior.

Etapla 3: En la tercera etapa, se realizan pruebas continuas de flotación a escala piloto. Estas pruebas tienen como objetivo verificar, complementar y/o extrapolar los resultados metalúrgicos obtenidos durante las dos etapas previas.

Etapla 4: La última etapa implica la realización de campañas experimentales a gran escala. El objetivo es ajustar las condiciones

operativas óptimas en la planta industrial misma, estableciendo así las condiciones definitivas para la operación.

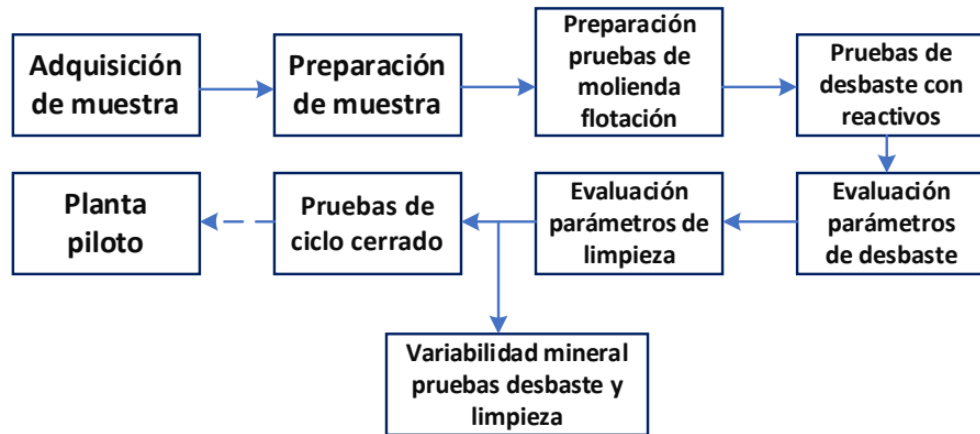


Figura 14. Flujograma para el desarrollo de flotación de sulfuros.

Fuente: (Thompson, 2016.)

2.2.10 Tiempo de residencia y cinética de flotación

Según (Xiong et al., 2013a), la prueba de cinética de flotación es un componente crítico en el diseño y escalado de circuitos de flotación. Esta prueba se realiza colocando una cantidad conocida de muestra en una celda de flotación que se agita con agua y reactivos. Se introduce aire y se agita la mezcla durante intervalos de tiempo preestablecidos, durante los cuales se recogen muestras del concentrado. A partir de la alimentación, el concentrado y las colas resultantes de la caracterización, se determina una curva de recuperación acumulada de minerales en función del tiempo, la prueba de cinética de flotación no solo es fundamental para el diseño de circuitos y el escalado, sino que también proporciona información valiosa sobre la eficacia de la flotación en diferentes condiciones. Al variar las condiciones de la prueba, como la concentración de reactivos, la velocidad de agitación y el tiempo de flotación, se puede obtener una

comprensión más profunda de cómo estos factores afectan la recuperación de minerales.

Por otro lado, (Azañero Ortiz, 2010), señala que el objetivo de una evaluación cinética es determinar el tiempo óptimo de flotación y los parámetros del modelo. En otras palabras, se busca identificar cuánto tiempo debe durar el proceso de flotación para maximizar la recuperación de minerales. Además, la evaluación cinética también puede ayudar a entender qué recuperación se puede obtener en un tiempo de flotación específico.

a) **Modelo de Garcia-Zuñiga**

El modelo de Garcia-Zuñiga, propuesto en 1953, es un modelo cinético de flotación de primer orden que se realiza en un sistema semi-batch. Este modelo es ampliamente utilizado en la industria de procesamiento de minerales debido a su capacidad para ajustar la mayoría de los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de flotación, permite calcular la constante de velocidad de flotación, un parámetro clave en el proceso de flotación. Esta constante de velocidad es esencial para entender cómo varía la velocidad de flotación con el tiempo y cómo esto afecta la eficiencia del proceso de flotación.

La ecuación del modelo de Garcia-Zuñiga es la siguiente:

$$R_t = R_\infty(1 - e^{-kt}) \quad (11)$$

Donde:

R_t es la recuperación de minerales en el tiempo t .

R_∞ es la recuperación máxima posible de minerales.



k es la constante de velocidad de flotación.

t es el tiempo.

Esta ecuación describe cómo la recuperación de minerales cambia con el tiempo en función de la constante de velocidad de flotación. A medida que el tiempo aumenta, la recuperación de minerales se acerca a su valor máximo R_{∞} .

2.2.10.1 Modelo de Agar

El modelo de Agar es una propuesta de modelo cinético de flotación de primer orden modificado. Este modelo introduce un factor de corrección, denotado como θ , que se utiliza para ajustar el tiempo inicial “0”. Este ajuste es crucial ya que permite una mejor representación de los procesos de flotación en sus etapas iniciales.

La ecuación del modelo de Agar se presenta de la siguiente manera:

$$R_t = R_{\infty}(1 - e^{-k(t+\theta)}) \quad (12)$$

2.2.10.2 Modelo de Kelsall

El Modelo de Kelsall, propuesto en 1962, ha demostrado ser un instrumento eficaz para describir y representar el proceso de flotación durante periodos de tiempo prolongados. Este modelo es particularmente útil para entender la cinética de la flotación, ya que integra dos constantes cinéticas distintas: una lenta (k_s) y una rápida (k_f), estas constantes representan las diferentes velocidades a las que ocurren los procesos de flotación. La constante rápida, k_f , se refiere a la velocidad a la que los minerales o partículas se adhieren a las burbujas de aire y suben a la

superficie del agua. Por otro lado, la constante lenta, k_s , representa la velocidad a la que los minerales o partículas se desprenden de las burbujas de aire y vuelven al fondo del tanque de flotación. (Astucuri, 1994)

Además de estas dos constantes, el Modelo de Kelsall también incluye el parámetro Φ . Este parámetro hace referencia a la fracción de materia orgánica que experimenta una flotación lenta. En otras palabras, Φ representa la proporción de partículas que se adhieren a las burbujas de aire a una velocidad más lenta (representada por k_s) en comparación con la velocidad más rápida (representada por k_f), el Modelo de Kelsall proporciona una descripción detallada y matemáticamente precisa de cómo diferentes factores y parámetros pueden afectar el proceso de flotación. Este modelo ha sido citado y utilizado en numerosos estudios y publicaciones, incluyendo el trabajo de (Astucuri, 1994), demostrando su relevancia y aplicabilidad en el campo de la flotación y el procesamiento de minerales.

$$R_t = R_\infty[\varphi(1 - \exp(-k_1 t)) + (1 - \varphi)(1 - \exp(-k_2 t))] \quad (13)$$

2.2.10.3 Modelo de Meyer y Klimpel (1984)

El Modelo de Meyer y Klimpel, introducido en 1984, es un marco teórico que asume una distribución rectangular de flotabilidades en el proceso de flotación. Este modelo es particularmente útil para entender cómo diferentes partículas o minerales se comportan durante el proceso de flotación, en este modelo, R_∞ representa la recuperación final a tiempos de flotación largos. En otras palabras, R_∞ es la proporción total de minerales o partículas que se espera que floten a la superficie después de

un tiempo de flotación suficientemente largo. Este parámetro es crucial para entender la eficiencia del proceso de flotación y para predecir el rendimiento de un sistema de flotación dado. (Muñiz Delgado, 2010)

El Modelo de Meyer y Klimpel ha sido citado y utilizado en numerosos estudios y publicaciones, incluyendo el trabajo de Muñiz Delgado en 2010, demostrando su relevancia y aplicabilidad en el campo de la flotación y el procesamiento de minerales.

$$R_t = R_\infty \left(1 - \frac{1}{kt} (1 - e^{-kt}) \right) \quad (14)$$

Por otro lado, Polling (1980) proporciona una perspectiva importante sobre la capacidad de flotación. Según Polling, “cuando se conoce el tiempo de residencia requerido, la capacidad de flotación se determina mediante un cálculo simple”. Esto significa que si se conoce la cantidad de tiempo que una partícula o mineral necesita para flotar a la superficie (el tiempo de residencia), entonces se puede calcular fácilmente la capacidad de flotación del sistema. Esta capacidad de flotación puede ser un indicador clave de la eficiencia del proceso de flotación. Por lo tanto, el conocimiento del tiempo de residencia requerido puede ser crucial para optimizar el proceso de flotación, y se resume aquí:

$$C = Q_{pulp} * R \quad (15)$$

Donde:

C: Capacidad total requerida de flotación, m³

Q_{pulp} : Flujo de pulpa volumétrico, m³/min.



R: Tiempo de residencia requerido, min.

Cuando es necesario calcular el volumen total de los tanques utilizados en un proceso, es crucial determinar el tamaño de las celdas. Este tamaño de las celdas se calcula utilizando una ecuación específica. Esta ecuación permite obtener una estimación precisa del tamaño de las celdas necesarias, lo que a su vez permite calcular el volumen total de los tanques. Este cálculo es esencial para el diseño y la optimización de los procesos que implican el uso de tanques, como la flotación en el procesamiento de minerales. La ecuación utilizada para este cálculo se proporcionará a continuación. (Xiong et al., 2013b)

$$\tau = V_{eff} / Q_{pulp} \quad (16)$$

Donde:

τ : Tiempo teórico de residencia, min.

V_{eff} : Volumen efectivo de celda, m³

Para calcular el volumen efectivo de un tanque utilizado en procesos como la flotación, es necesario considerar varios factores. En primer lugar, se deben restar los volúmenes ocupados por la capa de espuma y los componentes internos del tanque. Estos elementos ocupan espacio dentro del tanque y, por lo tanto, reducen el volumen disponible para el proceso de flotación. Además, es importante tener en cuenta la retención de aire. Este término se refiere a la cantidad de aire que queda suspendido en la pulpa durante el funcionamiento de la máquina de flotación. Este aire suspendido ocupa un volumen que también debe ser



restado del volumen total del tanque para obtener el volumen efectivo, el volumen efectivo del tanque no es simplemente su capacidad física, sino que es el resultado de restar el volumen ocupado por la capa de espuma, los componentes internos del tanque y el aire retenido en la pulpa. Este volumen efectivo es crucial para determinar la eficiencia del proceso de flotación y para diseñar y optimizar las operaciones de la planta. (Vilca Casazuela, 2019)

2.2.11 Eficiencia de separación

Según Subba (2016), quien hace referencia a Schulz (1970), el rendimiento metalúrgico de un proceso de beneficio se evalúa principalmente a través de dos parámetros: la ley del concentrado y la recuperación del mineral. Estos procesos de beneficio pueden variar en su ejecución, dando lugar a diferentes combinaciones de ley y recuperación.

Si tanto la ley como la recuperación son superiores en un caso específico en comparación con otro, la elección del proceso es sencilla. Sin embargo, si los resultados de una prueba indican una ley más alta pero una recuperación menor, la decisión se vuelve más compleja.

A lo largo del tiempo, ha habido numerosos intentos de fusionar estos dos parámetros - la recuperación y la ley del concentrado - en un solo índice que pueda representar de manera efectiva la eficiencia metalúrgica de la separación. Tras revisar estos intentos, Schulz propuso un índice denominado "eficiencia de separación". Este índice busca proporcionar una medida más completa y precisa del rendimiento de un proceso de beneficio, teniendo en cuenta tanto la ley del



concentrado como la recuperación del mineral. De esta manera, permite una evaluación más integral de la eficiencia metalúrgica de la separación.

$$\text{Eficiencia Separación} = \left(\frac{C * c * m * (c - f)}{F * f * c * (m - f)} \right) * 100$$

(17)

Donde:

C: % peso en concentrado F: 100% peso total

f: % grado en alimento

c: % grado en concentrado

m: % metal valioso en especie mineralógica

2.2.12 Evaluación de procesos de flotación

Los criterios para evaluar la eficacia de un proceso de flotación son diversos y cada uno ofrece una perspectiva única sobre el rendimiento del proceso.

A continuación, se detallan estos criterios:

- 1) **Recuperación metalúrgica:** Este criterio se refiere a la proporción entre la cantidad de material útil obtenido (multiplicado por su ley en el concentrado) y la cantidad de material útil presente inicialmente (multiplicado por su ley en la alimentación). Es una medida de cuánto del material útil se ha logrado extraer del mineral original.
- 2) **Recuperación en peso:** Este criterio es la relación entre la masa del concentrado obtenido y la masa total de la alimentación. Proporciona una idea de cuánto del peso total se ha recuperado en forma de concentrado.



- 3) **Razón de concentración:** Este criterio es la relación entre la masa total de la alimentación y la masa del concentrado. En términos prácticos, indica cuántas toneladas de mineral son necesarias para obtener una tonelada de concentrado.
- 4) **Razón de enriquecimiento:** Este criterio es la relación entre la ley del componente deseado en el concentrado y la ley del mismo componente en la alimentación. Proporciona una medida de cuánto se ha enriquecido el componente deseado a través del proceso de flotación.
- 5) **Relación grado y recuperación:** Este es uno de los parámetros más importantes en la flotación industrial. Es único para cada operación e incluso para cada tipo de mineral. La combinación de grado y recuperación es la medida más típica del rendimiento de la separación. Ambos se expresan en términos del valioso constituyente en el mineral. Esta relación permite una evaluación más completa del rendimiento del proceso de flotación, ya que tiene en cuenta tanto la calidad (grado) como la cantidad (recuperación) del material útil obtenido.

2.2.13 Diseño de circuitos de flotación

El diseño de los circuitos de flotación es un aspecto crucial en la industria minera. Este proceso implica la transición de los resultados obtenidos en el laboratorio a una escala industrial, pasando por una etapa intermedia de planta piloto.

Comúnmente, para llevar a cabo este escalamiento de datos de flotación, se emplean correlaciones empíricas. Estas correlaciones permiten proyectar los



resultados obtenidos en condiciones controladas de laboratorio a las condiciones más complejas y variables de una operación industrial.

Finalmente, para fines de control metalúrgico, las plantas concentradoras suelen contar con uno o más ensayos estándar de laboratorio. Estos ensayos son herramientas valiosas que permiten detectar variaciones en el proceso de flotación. Además, los resultados de estos ensayos pueden ayudar a determinar si es conveniente realizar cambios operacionales en la planta.

Por ejemplo, si los resultados de los ensayos indican una disminución en la recuperación del mineral o un cambio en la ley del concentrado, podría ser necesario ajustar los parámetros del proceso de flotación. Estos ajustes podrían incluir cambios en la dosificación de reactivos, la velocidad de agitación, el tiempo de flotación, entre otros.

Es importante mencionar que la Figura 15 (no proporcionada en el texto original) probablemente ilustra alguno de los conceptos mencionados anteriormente o muestra los resultados de los ensayos de laboratorio. Sin embargo, sin acceso a la figura, no se puede proporcionar una descripción precisa de su contenido.

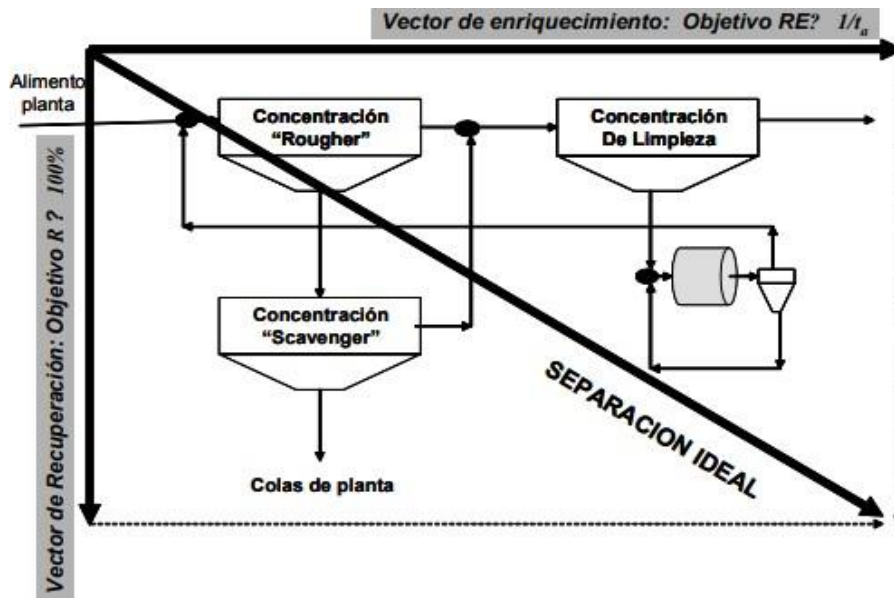


Figura 15. Circuito de flotación convencional.

Fuente: M. Oswaldo, A. Gaviria y O. Restrepo, 2008, U.N Colombia-Medellín.

2.2.14 Reactivos de Flotación

Los **Reactivos de Flotación** juegan un papel crucial en el proceso de flotación. Son la variable y el componente más importante en este proceso. No solo es relevante el tipo específico de reactivo que se añade al proceso, sino también la combinación completa de reactivos, conocida como la fórmula de reactivos.

La fórmula de reactivos es esencial para el proceso de flotación. Sin la correcta combinación de reactivos, la flotación simplemente no puede llevarse a cabo. Cada reactivo tiene un papel específico y su interacción puede afectar significativamente el resultado del proceso.

La adsorción de los reactivos en el proceso de flotación se basa en el equilibrio de iones en la pulpa. La pulpa es una mezcla de partículas de mineral y agua, y el equilibrio iónico en esta mezcla puede influir en cómo los reactivos se



adhieren a las partículas de mineral. Este equilibrio iónico puede ser manipulado a través de la adición de reactivos, lo que a su vez puede afectar la eficacia del proceso de flotación.

2.2.14.1 Clasificación de los Reactivos

Los reactivos utilizados en el proceso de flotación se pueden clasificar en tres categorías principales:

1. **Colectores:** Estos reactivos proporcionan propiedades hidrofóbicas a la superficie del mineral, lo que facilita su separación del agua. Los colectores son compuestos orgánicos de carácter heteropolar. La parte polar de estos compuestos es el grupo activo que se une a la superficie del mineral, disminuyendo la capa hidratada. Esta unión es favorecida por un bajo potencial electrocinético, creando condiciones favorables para la unión con las burbujas de aire. La parte apolar del colector se orienta hacia la solución, proporcionando a la superficie mineral propiedades hidrofóbicas.
2. **Modificadores:** Estos reactivos regulan las condiciones de funcionamiento de los colectores y aumentan su selectividad. Los modificadores crean condiciones apropiadas en la superficie del mineral para el funcionamiento selectivo de los colectores. Entre estos modificadores se pueden mencionar ácidos y bases inorgánicas para la regulación del pH; activantes, que son reactivos que ayudan a la formación de la superficie hidrofóbica; y



depresores, que son reactivos que ayudan a la hidratación de la superficie mineral.

3. **Espumantes:** Estos reactivos permiten la formación de burbujas de tamaño apropiado, facilitando la formación de espumas. Los espumantes son también compuestos orgánicos de carácter heteropolar. Se adsorben selectivamente en la interfase líquido-gas, es decir, son activos en la superficie, lo que los convierte en tensoactivos. La parte apolar de estos compuestos generalmente es un radical orgánico, mientras que la parte polar se caracteriza por la presencia de grupos como hidroxilo (OH-), carbonilo (-CO), carboxilo (-COOH), aminas (-NH₂) y sulfo.

a) **Clasificación de los Colectores**

Los colectores, que son fundamentales en los procesos de flotación, se pueden clasificar de acuerdo con su comportamiento en el agua. Cuando un colector se disocia en el agua, se forma un radical y un grupo polar, que puede ser un catión o un anión. En función de esta característica, los colectores se dividen en dos categorías principales: **aniónicos** y **catiónicos**.

Los colectores **aniónicos** son aquellos que, al disociarse, forman un anión. Por otro lado, los colectores **catiónicos** son aquellos que forman un catión al disociarse. Esta clasificación es esencial ya que determina cómo interactuarán estos colectores con las partículas minerales durante el proceso de flotación.

Además, existe un tercer grupo de colectores, conocidos como colectores **no iónicos**. Estos colectores son únicos porque no se disocian en el agua y actúan en forma molecular. Aunque este grupo es pequeño en comparación con los colectores aniónicos y catiónicos, juegan un papel importante en ciertos procesos de flotación.

El comportamiento de los colectores también está influenciado por sus grupos apolares y polares. El **grupo apolar** afecta la intensidad del colector, es decir, cuán fuertemente se unirá a las partículas minerales. Por otro lado, el **grupo polar** influye en la adsorción a la superficie mineral, determinando dónde y cómo se unirá el colector a la partícula mineral.

La Figura 16, que no se muestra aquí, proporciona una representación visual de esta clasificación de los colectores. Esta clasificación es esencial para entender cómo funcionan los diferentes colectores y cómo se pueden utilizar para optimizar los procesos de flotación.

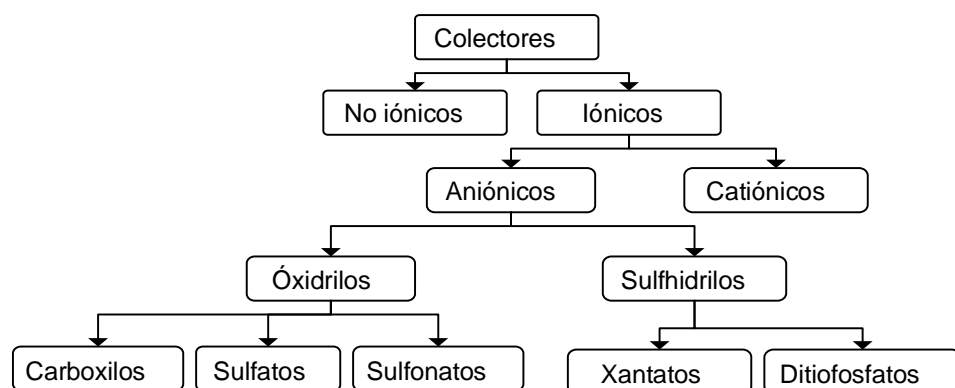


Figura 16. Clasificación de Colectores de Flotación.

Fuente: (Barry Wills, 2006)



Los colectores aniónicos sulfhidrilos son de gran importancia en la industria, ya que se utilizan como reactivos esenciales en la flotación de minerales sulfuros y metales nativos. Estos colectores poseen excelentes propiedades colectoras y son selectivos en un ambiente alcalino.

Según (Nagaraj, 1992), los colectores aniónicos son selectivos para minerales que presentan una carga superficial positiva, como la calcita, el fosfato, la fluorita, entre otros. Por otro lado, las aminas son selectivas para los minerales que presentan una carga superficial negativa. Los promotores Aero-704 y 726, que son productos de ácidos grasos producidos por Cytec, son colectores aniónicos utilizados para la flotación de minerales de hierro en un ambiente alcalino, especialmente cuando están acompañados de arenas de sílice.

(Cuti Taquima & Lupo Olivo, 2019), mencionan que los productos de sulfonatos de petróleo son ampliamente utilizados para la flotación de minerales de hierro en impurezas de arenas, así como en el tratamiento de cromita, cianita, granates y feldspatos en condiciones ácidas. En condiciones alcalinas, estos colectores se utilizan para la flotación de baritina, algunos carbonatos de cobre, boro y elementos de tierras raras. Los promotores Aero-845 y 830, que son aniónicos basados en alquil succinamato, han sido desarrollados para ofrecer una mayor selectividad. Son excelentes colectores para la flotación de barita, celestita y sheelita en un ambiente alcalino, y para casiterita en un ambiente ácido.



Los colectores catiónicos, por otro lado, se utilizan para la flotación de micas y feldespato, y se activan con ácido fluorhídrico tanto en condiciones ácidas como básicas.

La aerofina-3416A es un colector derivado de la familia de los sulfhidrilos y se utiliza para la flotación de minerales de cobre y zinc, activándose con sulfato de cobre. Según (Xia et al., 2015), este colector también es eficaz para la galena y los metales preciosos, pero es selectivo contra los sulfuros de hierro. Entre sus características destacan su baja espumación en minerales que contienen arcillas, su rápida cinética y su buena colección de partículas de tamaño medio.

El colector Aero-412, también derivado de los sulfhidrilos, es una mezcla de mercaptobenzotiazol y ditiófosfato. Según (Marion et al., 2017), este colector es selectivo contra los sulfuros de hierro en un ambiente alcalino, y es eficaz para la recolección de minerales polimetálicos y minerales de oro piríticos en condiciones ácidas. Es un colector más fuerte que los ditiófosfatos y también se utiliza para la flotación de minerales óxidos tras una sulfuración previa.

Según (K. Lee et al., 2007), el colector Aeropromoter-MX-5160, que es una mezcla de componentes activos de ditiófosfato y monotiófosfatos con propiedades sulfudizantes y solubles en agua, se aplica en la flotación de sulfuros de cobre, molibdeno, zinc, plomo y metales nativos en condiciones básicas, y presenta selectividad frente a la pirita.



2.3 TEORÍA DE LA FLOTACIÓN DE ÓXIDOS

La flotación diferencial o selectiva es un proceso que permite la separación de menas complejas. Este método se basa en la separación individual de minerales con propiedades de flotación similares, como el cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), plata (Ag) y oro (Au), a partir de una única mena. Este proceso es económicamente justificable, ya que implica el uso de diversos reactivos, entre los que se incluyen colectores espumantes, depresantes y activadores.

La flotación de minerales de plomo puede llevarse a cabo de manera eficiente en un circuito de alcalinidad media, con un pH entre 8 y 9. Para ello, se utilizan colectores sulfhídricos, como los xantatos y el aceite de pino, así como el ácido cresílico y alcoholes como espumantes. En estas condiciones, también flotan los minerales de plomo.

Para prevenir la flotación del zinc y el hierro en la primera etapa de este proceso, es necesaria una depresión eficiente. Los minerales de zinc no flotan en las condiciones mencionadas, a menos que sean activados con iones cúpricos.

La flotación es un método de concentración de minerales de gran importancia en la industria metalúrgica extractiva. Sin este proceso, sería difícil llevar a cabo etapas posteriores, como la tostación, la conversión y la fusión. Existen varios tipos de flotación:

2.3.1 Flotación por espumas

La flotación por espumas es un proceso de gran relevancia en la industria de la minería y la metalurgia. Este método se basa en la separación de minerales que se encuentran en suspensión en el agua.

El proceso comienza con la introducción de burbujas de aire en el agua que contiene los minerales. Estas burbujas se adhieren a los minerales valiosos,



formando una especie de "espuma" en la superficie del agua. Esta espuma, que contiene los minerales valiosos adheridos a las burbujas de aire, puede ser recolectada y separada del resto del agua.

Este método es especialmente eficaz para separar minerales que tienen una afinidad natural por el aire, lo que les permite adherirse a las burbujas de aire y flotar a la superficie. Por otro lado, los minerales que no tienen esta afinidad permanecen en el agua y se hunden, lo que permite su separación de los minerales valiosos.

La flotación por espumas es un proceso altamente eficiente y económico, que permite la separación de minerales valiosos de manera rápida y con un alto grado de pureza. Además, este método es ampliamente utilizado en la industria debido a su versatilidad, ya que puede ser adaptado para separar una amplia variedad de minerales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la eficacia de la flotación por espumas puede verse afectada por diversos factores, como las propiedades químicas y físicas de los minerales, las condiciones del agua y la presencia de impurezas. Por lo tanto, es esencial realizar un análisis cuidadoso de estos factores antes de implementar este proceso.

2.3.1.1 Flotación bulk

La flotación bulk es un término que se utiliza en la industria de la minería y la metalurgia para describir un tipo específico de proceso de flotación. Aunque el término puede no ser muy preciso, generalmente se refiere a un proceso de flotación que se realiza en una sola etapa, con desgaste y agotamiento.



En la flotación bulk, se separa un mineral simple o un conjunto de minerales valiosos de las gangas, que son los minerales o rocas sin valor comercial que se encuentran mezclados con los minerales de interés. Este proceso se realiza mediante la introducción de burbujas de aire en una suspensión de agua y minerales. Los minerales valiosos se adhieren a las burbujas de aire y flotan a la superficie, donde pueden ser recolectados, mientras que las gangas se hunden y quedan en el fondo.

Este método es especialmente útil cuando se trata de menas que contienen varios minerales valiosos, ya que permite la separación y recuperación de estos minerales en una sola etapa. Sin embargo, debido al desgaste y agotamiento que se produce durante el proceso, la eficacia de la flotación bulk puede disminuir con el tiempo. Por lo tanto, es importante monitorizar y ajustar regularmente las condiciones del proceso para mantener su eficacia.

A pesar de estas limitaciones, la flotación bulk es un método de separación mineral ampliamente utilizado debido a su eficacia, economía y versatilidad. Sin embargo, es esencial tener en cuenta que la eficacia de este proceso puede verse afectada por diversos factores, como las propiedades físicas y químicas de los minerales, las condiciones del agua y la presencia de impurezas. Por lo tanto, es crucial realizar un análisis cuidadoso de estos factores antes de implementar este proceso.

2.3.1.2 Flotación Selectiva

La **Flotación Selectiva** es una técnica de separación de minerales que se caracteriza por su simplicidad. Esta técnica se utiliza para separar



minerales con propiedades de flotación similares, como el cobre, el plomo, la plata y el oro, cuando estos se encuentran en una misma mena.

En el contexto de los minerales polimetálicos, la flotación selectiva es especialmente útil. Los minerales polimetálicos son aquellos que contienen más de un tipo de metal en su composición. En estos casos, la flotación selectiva permite separar cada uno de los metales presentes en la mena, facilitando su posterior procesamiento y aprovechamiento.

La flotación selectiva se realiza en varias etapas. En cada etapa, se añaden reactivos químicos específicos al agua que contiene la mena triturada. Estos reactivos hacen que ciertos minerales se adhieran a las burbujas de aire que se generan en el agua, mientras que otros minerales no lo hacen. De esta manera, los minerales que se adhieren a las burbujas pueden ser separados del resto.

Es importante destacar que la eficacia de la flotación selectiva depende de varios factores, como la composición de la mena, las propiedades de los minerales presentes, las condiciones de operación y los reactivos utilizados. Por lo tanto, es esencial realizar un estudio detallado de la mena y de los minerales presentes antes de llevar a cabo el proceso de flotación selectiva. Esto permitirá seleccionar los reactivos y las condiciones de operación más adecuadas para lograr una separación eficaz de los minerales.

2.3.2 Fundamento técnico de la flotación de óxidos

El fundamento técnico de la flotación de óxidos se basa en un proceso físico-químico que permite la separación de sólidos finamente divididos. Este



proceso se lleva a cabo mediante la adhesión selectiva de la superficie de la partícula a una burbuja de aire o a un líquido, dependiendo del caso. Esta adhesión a la fase gaseosa se ve enormemente facilitada por una modificación de la superficie de la partícula realizada por reactivos químicos activos sobre superficies, también conocidos como surfactantes.

El entorno en el que se realiza la separación es bastante complejo y está compuesto por varias fases:

- **La fase líquida:** que generalmente es agua, es química y físicamente muy activa.
- **La fase gaseosa:** que generalmente es aire, es relativamente simple.
- **La fase sólida:** La que puede ser considerada como infinitamente variable. Las burbujas de aire actúan como balones y proveen de la flotabilidad necesaria para llevar los minerales seleccionados a la superficie de la pulpa, donde una espuma estable retiene al mineral

Las burbujas de aire actúan como globos y proporcionan la flotabilidad necesaria para llevar los minerales seleccionados a la superficie de la pulpa. Aquí, una espuma estable retiene al mineral, permitiendo que sea extraído como concentrado. Mientras tanto, aquellos materiales que no se han adherido a las burbujas de aire permanecen sumergidos y se eliminan del proceso como relaves.

En el proceso de flotación, se obtiene adhesión entre la superficie de las partículas minerales recubiertas y las burbujas de aire, que están subiendo a través de la pulpa. Las burbujas proporcionan suficiente flotabilidad para hacer que las



partículas suban y formen una espuma razonablemente estable que pueda ser extraída por desespumación.

Los pasos que conforman la operación unitaria de flotación son los siguientes:

- a) El mineral molido (malla 48,297u) se mezcla con agua
- b) La pulpa formada de este modo es diluida con agua una consistencia entre 25 y 45% en sólidos en peso
- c) Pequeñas cantidades de surfactantes químicos son adicionados a la pulpa para modificar las superficies de minerales determinados.
- d) Se adiciona el colector escogido, este actuará sobre el mineral que se desea recuperar por flotantes, lo hará hidrofóbico.
- e) Luego adiciona otro reactivo que ayuda a formar espuma (espumante)
- f) La pulpa químicamente tratada en un depósito apropiado tiene aire introducido por agitación.
- g) El mineral como parte de la espuma sube hacia la superficie, donde es extraído.

Este proceso, aunque parece sencillo, requiere un conocimiento profundo de la composición del mineral y de las propiedades de los reactivos utilizados. Por lo tanto, es esencial realizar un estudio detallado antes de llevar a cabo el proceso de flotación. Esto permitirá seleccionar los reactivos y las condiciones de operación más adecuadas para lograr una separación eficaz de los minerales.



2.3.3 Química del proceso de flotación de óxidos

En un medio acuoso alcalino, la mayoría de los minerales sulfurados sufren un proceso de oxidación superficial, para el caso particular de la galena. Por otro lado, hay evidencias que demuestran que bajo ciertas circunstancias tales como una exposición prolongada a soluciones oxigenadas previas a la introducción del colector, se forma sobre la galena especies sulfuradas de tipo tiosulfato.

Mediciones por espectroscopía IR y aspectos termodinámicos muestran que esas especies son reemplazadas por los xantatos, esta reacción podría ser considerada como una desorción de tiosulfato y absorción de xantato, siendo la reacción la siguiente.



(18)

Termodinámicamente es la reacción más favorable para la formación de xantato de plomo, sin embargo, se ha experimentado que las multicapas de xantato de plomo son hidrofóbicas, del mismo modo se ha observado que es posible obtener la adhesión galena-burbuja a un pH 8 antes que se forme tiosulfato básico de plomo en la superficie del mineral.

2.3.4 El hidroxamato

En la industria de flotación de minerales óxidos, se incluyen los siguientes colectores: quelante (como hidroxamatos), aniónicos (como los ácidos grasos) y sulfonatos del petróleo. Los catiónicos como las aminas también se utilizan para separar los minerales. (Xu et al., 2022)

Los colectores aniónicos quelantes más disponibles en el mercado, es el producto de hidroxamato y son: A-6493, 6494 y S-9849 (productos recomendados de Cytec). Se utilizan para la recuperación de diferentes minerales, sobre todo en la flotación de óxidos de cobre sin sulfuración previa y en pocas oportunidades para la flotación de caolín, minerales de cobalto, pirolusita y tierras raras; recientemente en la flotación directa de fosfatos. El colector Aeropromoter-6493, es un colector derivado del aquil hidroxamato; recomendado por el representante de Cytec, durante el taller de exposición de reactivos de flotación. (K. Lee et al., 2009)

El hidroxamato tiene como formula general:

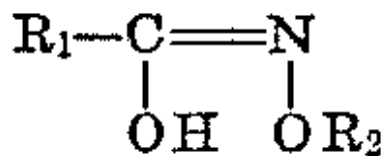


Figura 17. Formula general Hidroxamato.

Fuente: (Marion et al., 2017)

El hidroxamato octílico de potasio sigue el esquema que se presentó en la figura 1, donde R₁ es un alifático o grupo arilo que puede tener de 5 a 10 átomos y R₂ es un miembro selecto de un grupo que consiste de hidrógeno y un metal alcalino.[1]. Esta estructura presenta un tautómero el cual tiene la siguiente estructura:

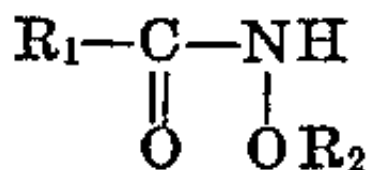


Figura 18. Formula general del Tautómero Hidroxamato.

Fuente: (Marion et al., 2017)

La flotación ha sido usada para recuperar satisfactoriamente sulfuros metálicos, carbón y crisocola obteniendo resultados satisfactorios, por lo cual es factible usarla para flotar óxidos de cobre.

2.3.5 Diagrama de Flujos de Flotación de Óxidos

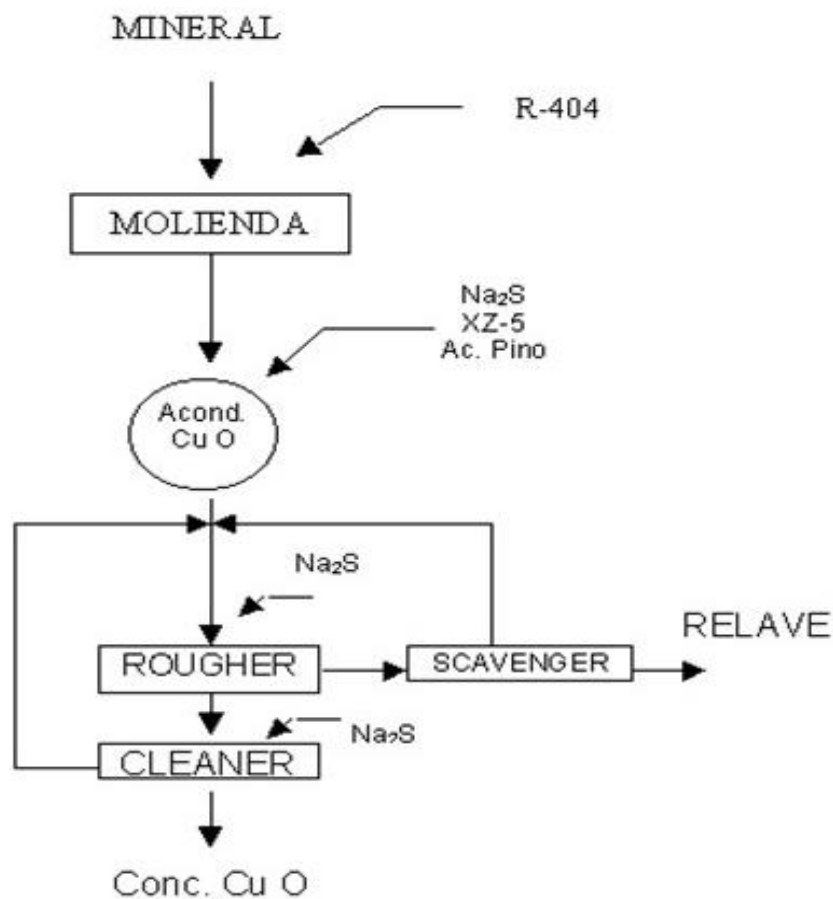


Figura 19. Diagrama de Flotación de CuO.

Fuente: (Azañero Ortiz, 2010)

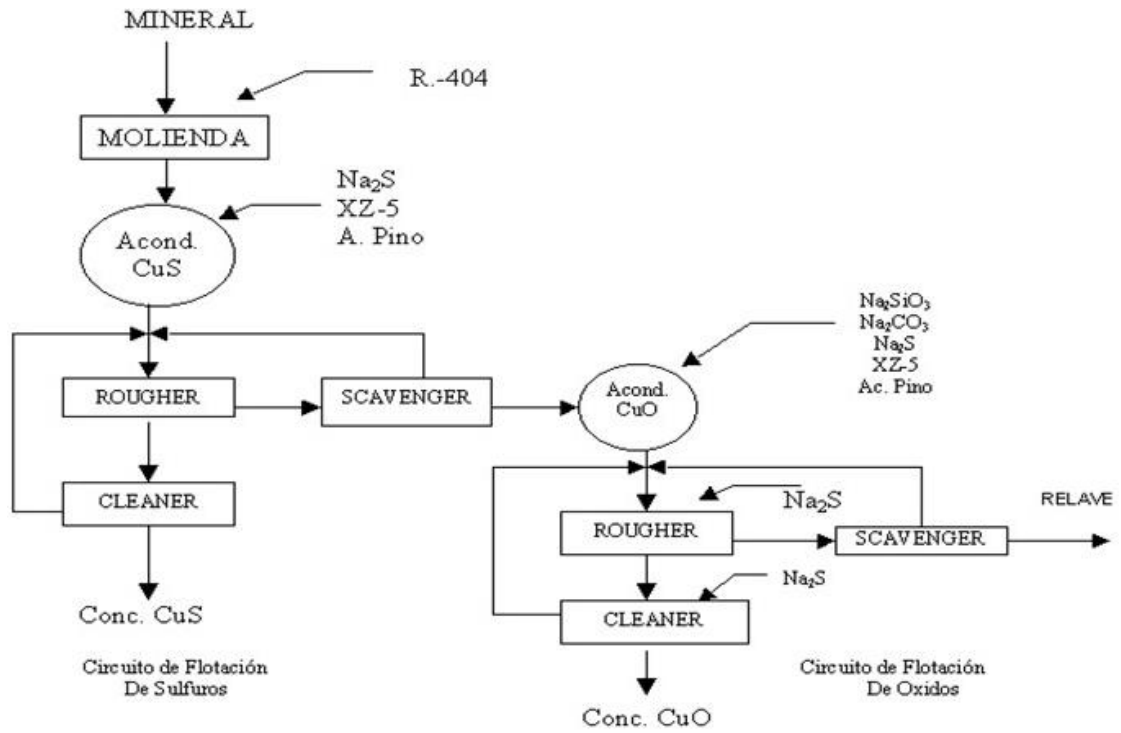


Figura 20. Diagrama de Flujo de Flotación CuS y Flotación de CuO

Fuente: (Azañero Ortiz, 2010)



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO

3.1.1 Generalidades

La actividad que desarrolla la **Empresa Minera Silver MINSPERU S.A.C.** en el paraje San Carlos es una explotación minera subterránea polimetálica, también la empresa desarrollara actividades de beneficio de mineral, para ello se instaló una Planta de beneficio Polimetálica, de nombre Planta Concentradora del proyecto San Carlos.

El área de beneficio se encuentra en terreno superficial autorizado (ver Anexo Documentos), en dicha área se instalaron equipos de operación de la planta concentradora, cochas de concentrados, presa relavera y sus componentes etc.

3.1.2 Ubicación y acceso

3.1.2.1 Ubicación política

La Planta Concentradora San Carlos se encuentra ubicado en paraje San Carlos el distrito de Paratia, provincia de Lampa, departamento de Puno. Más detalles ver plano de ubicación.

3.1.2.2 Ubicación geológica

La Planta Concentradora San Carlos, se encuentra dentro de la concesión minera metálica ANDEAN 1107, en el cuadrángulo de Ocuvi (31-u) según carta geológica nacional en la zona 19-L, cuyas coordenadas UTM Psad-56 se presenta en el Tabla N° 6.

Tabla 1*Coordenada de la concesión minera Metálica ANDEAN 1107.*

COORDENADAS UTM PSAD 56		
VERTICE	ESTE	NORTE
V-1	324 000.00	8 301 000.00
V-2	324 000.00	8 299 000.00
V-3	322 000.00	8 299 000.00
V-4	322 000.00	8 298 000.00
V-5	319 000.00	8 298 000.00
V-6	319 000.00	8 299 000.00
V-7	320 000.00	8 299 000.00
V-8	320 000.00	8 300 000.00
V-9	321 000.00	8 300 000.00
V-10	321 000.00	8 301 000.00

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2016.**3.1.2.3 Ubicación de componentes de la planta concentradora:**

En el Tabla N° 4 se indica las coordenadas UTM de componentes de la planta, también se presenta en el plano general de distribuciones de las instalaciones.

Tabla 2*Ubicación de Componentes de la Planta Concentradora.*

DETALLE	ESTE
Casa Fuerza	321902.57
Depósito de Combustible	321915.00
Cancha de Volatilización	321921.94
Área Temporal de Residuos Sólidos Industriales	321885.64
Tanque de almacenamiento de Aguas	321958.06
Área para Sección Chancado	321919.90
Sección Molienda y Remolienda	321912.18
Sección Flotación	321909.46
Área para Cochas de Concentrado	321901.80
Área para Secado de Concentrado	321887.46
Área para instalaciones Auxiliares en Planta (Taller de mantenimiento, almacén, laboratorio, sala primeros auxilios, oficinas, entre otros.)	321906.38
Letrinas Sanitarias	321875.00

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, junio del 2017.



3.1.3 Descripción de la actividad

3.1.3.1 Características de mineral a procesar

La mineralización está conformada principalmente por vetas, conteniendo minerales de esfalerita con inclusiones de calcopirita y galena cristalizada, plomo, zinc, cobre con bajo contenido de plata como mena; como minerales de ganga se tiene al cuarzo, pirita, rodonita y otros.

El depósito del mineral de la mina Españolita y mina San Cristóbal es un yacimiento con minerales de sulfuro como:

- **Galena (PbS):** Es mena principal que se encuentra asociado a los minerales sulfuros de cobre, es más blanquecino si contiene plata.
- **Esfalerita (ZnS):** también conocido como blenda, Se encuentra íntimamente ligado a este tipo de yacimientos por lo que viene con los sulfuros de cobre, plomo y plata.
- **Calcopirita (CuFeS₂):** Muy escasa, masiva en pequeñas concentraciones.

3.1.3.2 Descripción de actividad de beneficio

La Planta Concentradora San Carlos se localiza a 180 m. de distancia desde la Bocamina la españolita y 250 m. de distancia de la bocamina San Cristóbal, que, está ubicado en paraje San Carlos, las operaciones de la planta se desarrollarán en la cota de 4770 a 4810 m.s.n.m.



En el desarrollo de actividades de beneficio tiene las siguientes etapas:

- Etapa de Chancado.
- Etapa de Molienda y Clasificación.
- Etapa de Flotación de Minerales.
- Secado de Concentrado.

3.1.3.3 Distribución de la planta concentradora

La Planta concentradora estará distribuida de la siguiente manera:

- Cancha de mineral y tanque de agua
- En sección chancado está conformado por tolva de grueso, chancadora de quijada, fajas transportadoras y tolva de fino,
- En la sección de molienda está conformado por molino de 4'x4', molino de bolas de 3'x4', fajas alimentadoras de mineral, clasificador helicoidal.
- En la sección de flotación está conformado por celdas unitarias, celdas Denver y cochas de concentrado.
- En sección secado de concentrados que es una plataforma amplia donde se depositaran los concentrados para su secado y filtrado, posteriormente se cargaran a los camiones metaleros.
- Presa relavera.

3.1.3.4 Requerimiento de energía

La energía requerida es para los equipos de operación planta, como en sección chancado, molienda, flotación y otros tal como se indica en el



Tabla N° 5, la energía será generada por un grupo electrógeno que funciona a combustible diesel.

Se adquirida un generador eléctrico que se utilizara para alumbrado de las instalaciones de la planta concentradora, esto en caso de que la planta se encuentre paralizada.

Tabla 3

Requerimiento de Energía.

LEYENDA			
N°	DESCRIPCION	HP	Kw
1	Tolva de Gruesos: Capacidad 50 TM	-	
2	Parrilla Estática		
3	Chancadora de Quijadas: 9" x 12"	20	
4	Faja Transportadora N° 01	5	
5	Tolva de Finos: Capacidad 50 TM		114
6	Faja Transportadora N° 02:	5	
7	Molino de Bolas Comesa: 4 Ø ' x 4'	60	
8	Clasificador Helicoidal: 1.5' Ø x 16'	5	
9	Molino de Bolas Comesa: 3 Ø' x 4'	60	
10	Banco 06 Celdas Denver 32" x 32"	45	
11	Bomba Horizontal: 2 ½" x 2 " N° 01	10	
12	Acondicionador: 3' Ø x 4'	3	
13	Banco 02 Celdas Denver 32" x 32"	15	
14	01 Celda Circular: 5' Ø x 5' N° 01	10	92
15	01 Celda Circular: 5' Ø x 5' N° 02	10	
16	Bomba Horizontal: 2 ½" x 2 " N° 02	10	
17	Cochas de Concentrados (BOMBA DE AGUA)	15	
18	Acondicionador: 3' Ø x 4' (lechada de cal)	3	

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2016.

3.2 OPERACIONES UNITARIAS EN LA PLANTA CONCENTRADORA

3.2.1 Cancha de minerales

Comúnmente denominado **CANCHA DE GRUESOS**, en este lugar son almacenados los minerales procedentes de la mina San Carlos, está ubicado en la parte superior oeste de la Planta concentradora, en un área de 1 hectárea. El mineral bruto es almacenado de acuerdo a su composición mineralógica. Se



almacena mineral de un tamaño aproximado que varía desde 20 pulgadas hasta 2 o 3 pulgadas: Los más gruesos son triturados manualmente usando combos.

El traslado de mineral a la tolva de gruesos lo realizan los obreros con la ayuda de un **Scoop R 1600 G (CAT)**, de una capacidad de 2.4 m³ por pala.

3.2.2 Área de chancado

Es donde se reduce el tamaño del mineral para su procesamiento de un tamaño promedio de 16" hasta $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$ " previamente hecho ya un blending, son descargados directamente a la tolva de gruesos de capacidad de 50 TM, con ayuda de un Scoop R 1600 G (CAT).

La Planta Concentradora San Carlos, comprende de solo una etapa de trituración, que consiste en una Chancadora de Quijadas: 9" x 12", y de una Parrilla Estática de $\frac{3}{4}$ " de abertura, el UNDER pasa de frente a la faja transportadora N° 1.

3.2.2.1 Tolva de gruesos

Es una caja metálica construido por planchas de acero de $\frac{1}{4}$ " de espesor, que descansa sobre una base de concreto armado, la Tolva de gruesos sirve como depósito, y alimentador a la Chancadora de Quijadas, donde se da inicio al beneficio del mineral.

Esta Tolva de Gruesos está ubicada en la parte superior de la Planta, a un lado de la Cancha de Gruesos, la alimentación a esta Tolva de Gruesos se realiza por la parte superior de la misma mediante un Scoop R 1600 G (CAT).

a) Capacidad de la tolva

Para hallar la capacidad de la tolva se debe tener la gravedad específica del mineral y el volumen de la tolva.

3.2.2.1.1 Determinación de la gravedad específica

Para determinar la gravedad específica del mineral, se ha utilizado el método de fiola.

$$G.e. = (M - P) / (W + M - P - S)$$

Para conocer la gravedad específica del mineral de la Planta Concentradora SanCarlos. Se tomó 3 muestras con pesos diferentes; de 50, 75 y 100gr. A malla -10, con una fiola de 500ml.

Tabla 4

Pruebas de Determinación de Gravedad Especifica.

PRUEBA	PESOS	P	M	W	S	G.e
1	50	176,6	226,6	672,9	707,7	3,2895
2	75	176,6	251,6	672,9	726,1	3,4404
3	100	176,6	276,6	672,9	743	3,3445
					G.e	3,3581

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2017.

3.2.2.1.2 Volumen de la tolva:

La forma de la tolva de gruesos está formada por tres áreas de distintas formas; la primera es de forma rectangular, la segunda es de forma.

Una vez hallado la gravedad específica del mineral y el volumen de la tolva podemos determinar la capacidad húmeda de tolva y la capacidad húmeda de tolva de gruesos.



$$\text{Capacidad de tolva} = 19.96 * 2.5 = 49.9 \text{ TMH}$$

$$\text{Capacidad de tolva} = 49.9 * 0.94 = 46.906 \text{ TMS}$$

3.2.2.2 Parrilla estática (Grizzly)

Los minerales provenientes de las minas siempre poseen minerales finos y gruesos, para no causar inconvenientes en el chancado se instala una zaranda estacionaria, esta ayuda a una separación de finos y gruesos; los finos son denominados **UNDER** y los gruesos **OVER**, esta zaranda está ubicada debajo de la boca de la tolva de gruesos y encima de la chancadora.

Medidas: 63'' x 20'' x 13''

Angulo de inclinación: 22°

Abertura de la zaranda: 8 - 10 mm

Capacidad del grizzly: T = 16.95 TC/H

3.2.2.3 Chancadora de quijadas (9" x 12")

Está formado por un marco pesado o un sólido bastidor que lleva una quijada fija y otra móvil que esta es pivoteada con un movimiento oscilatorio por medio de juntas abisagradas y brazos movidos por un eje principal y el cuerpo central o pitman sobre el cual gira excéntricamente.

La conminución del mineral es debido al movimiento que posee la quijada móvil que esta se aleja de la quijada fija permitiendo el avance del mineral triturado hacia la parte inferior de la boca (SET), esta acción se

repite hasta que el mineral triturado abandone la descarga del chancado, este chancado debe tener una conminución de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{4}$ " de granulometría.

Tabla 5

Características de la Chancadora de Quijada.

Abertura de entrada	9" x 12"
Abertura de salida	3/4" x 16"
Potencia del motor	20Hp
r.p.m.	1765
voltaje	220v/380v/440v
amperaje	52.0A /30.1A /26.0A
cos(ϕ)	0,85

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, Abril del 2017.

Capacidad de la chancadora: $T = 6.532$ TCPH

3.2.2.4 Faja transportadora que alimenta a la tolva de finos

La faja transportadora N° 1 está ubicada a la salida de la Chancadora y sirve como Alimentador a la Tolva de Finos, esta faja tiene una inclinación lateral para que no haya pérdida de mineral.

Tabla 6

Características de la faja transportadora N° 1.

longitud de eje	12,01
diámetro de polea	0,3
ancho de faja	0,453
altura de inclinación	3,3
marca	pirelly vulcanizado
tipo	flexible - 250
tiempo de vuelta	36

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2020.

Capacidad de la faja: $Cap = 5.528$ TMS/hr



3.2.2.5 Tolva de finos

El mineral ya triturado de la chancadora se deposita en una tolva de finos, que sirve de alimentación al molino. La planta metalúrgica cuenta con dos tolvas de finos, para esta campaña se ha utilizado la tolva de finos de forma cilíndrica en la parte superior y de forma cónica en la parte inferior.

Capacidad Teórica = 55.46TMPD

Para hallar la capacidad práctica de la tolva consideramos un factor de 0.25 menos de la capacidad teórica debido a los espacios muertos o vacíos entre los minerales y paredes de la tolva.

Capacidad Práctica = 41.6 TMPD

3.2.3 Área de molienda

Corresponde entre los límites de la Tolva de Finos hasta la salida del **UNDER** del clasificador helicoidal, dentro del área de molienda se realiza el acondicionamiento del mineral, con agua y con algunos reactivos (depresores), la función principal de esta etapa es la buena liberación del mineral para su posterior tratamiento de concentración por flotación.

3.2.3.1 Faja transportadora del molino

Esta faja transportadora alimenta al molino la carga medida y controlada por un operador para ser alimentada al molino respectivamente Figura N° 25, la capacidad que se alimenta al molino es de 1 kg por

segundo. Esta faja transportadora enlaza la salida de la tolva de finos y la entrada al molino.

Tabla 7

Características de la faja transportadora N° 2.

Longitud de eje	2,41
diámetro de polea	0,43
ancho de faja	0,38
marca	pirelly vulcanizado
tipo	flexible - 150
tiempo de vuelta	60

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, Abril del 2020.

Factor de faja:

$$Factor\ de\ Faja = \frac{x\ kg}{pie} * \frac{3.281\ pie}{1\ m} * \frac{1\ Ton}{1000\ kg} * \frac{680.400\ m}{hr} = 2.232\ Ton/hr$$

Cálculo de capacidad de faja: **Cap = 48.211 TNHPD**

3.2.3.2 Molino de bolas 4 x 4 COMESA

La molienda constituye el paso final del proceso de reducción de tamaño, por regla general, el problema consiste en reducir el género a un tamaño limite que se encuentra normalmente entre malla 145 y 200; el análisis correspondiente se realiza tomando muestras alternativas de las tres guardias, muestras de la descarga del molino y del clasificador helicoidal la mejor recuperación del mineral se realiza a un 58 % solidos de malla -200, el molino de bolas 4 x4 Comesa realiza el proceso de molienda primaria.

Tabla 8*Características del Molino COMESA 4' x 4'.*

MOLINO	COMESA
Diámetro, ft	4
Largo, ft	4
Dientes Catalina	144
Dientes Piñón	14
f polea del motor, pulg.	9
f polea del volante, pulg	49.60
N° de Chaquetas	25
Altura del Lifter, cm	7
22 chaquetas de:	62Kg c/u
3 chaquetas de:	39Kg c/u
D interno lifter-lifter	46pulg.

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2020.Capacidad máxima de molienda: **$Cap_{max} = 2.86 TCPH$** Velocidad crítica: **$Vc = \frac{76.8}{\sqrt{4}}$** **$Vc = 38.40 RPM$** **3.2.3.3 Molino de bolas secundario 3 x 4 (remolienda)**

Es una molienda adicional, cuya finalidad es también preparar el mineral con las características tales como la liberación de mineral valioso, el producto de la molienda secundaria pasara por un clasificador, los finos pasaran al circuito de flotación y los gruesos retornaran a la remolienda, de esta manera se trabaja en circuito cerrado.

Tabla 9*Características del Molino de Bolas Secundario COMESA 3' X 4'.*

MOLINO	COMESA
Diámetro, ft	3
Largo, ft	4
Dientes Catalina	144
Dientes Piñón	14
f polea del motor, pulg	8,86
f polea del volante, pulg	36,22

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2020.



Capacidad máxima de molienda: $Cap_{max} = 5.98 \text{ TCPH}$

Velocidad crítica: $Vc = \frac{76.8}{\sqrt{3}}$

$$Vc = 344.24 \text{ RPM}$$

3.2.3.4 Clasificador helicoidal

Su fin es seleccionar las partículas gruesas de las finas teniendo en cuenta un tamaño de corte, las partículas finas van hacia el **OVER** del clasificador Helicoidal y los gruesos van hacia el **UNDER**, debido a una presión se realiza la separación. El mineral grueso es transportado a un molino de 3' x 4'.

Tabla 10

*Características del Clasificador Helicoidal 16' * 15" Ø.*

CLASIFICADOR HELICOIDAL 16' * 15"	
Diámetro, ft	15
Largo, ft	16
Angulo de inclinacion	14° - 15°
Motor	Weg 22v
HP	5
RPM	1710

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2020.

Carga circulante

La carga circulante = $2.49 \times 100 = 249\%$

Entonces el tonelaje de la descarga del molino es: $2.49 \times 1.8 = 4,$
482 TM

3.2.4 Área de flotación

En esta sección recibe la carga del rebose del Clasificador, donde se pone en contacto 4 elementos; mineral, agua, reactivos y aire, que será sometido a un



proceso de separación de minerales valiosos de las gangas, que se efectúa desde sus pulpas por medio de burbujas de aire, que selectivamente hace que el grupo de minerales valiosos floten a la superficie, para ello primeramente la carga de pulpa ingresa a la celda unitaria de 5'x5', la totalidad de las colas de la celda unitaria se descargará en la primera celda circular W. Serrano 6' x 7', cuyas espumas pasarán a las cochas de concentrado final y la cola será descargada en la segunda celda circular 6' x 7' (1er rougher), las colas de esta se descarga a la tercera celda circular 6'x 7' (2do rougher) y las espumas descargan a la única celda Denver 32" x 32", de limpieza, cuyas espumas se juntan a las de la segunda celda circular y mediante una bomba Warman 2 1/2" x 2" descargan en las cochas de almacenamiento de concentrados. Las espumas de la tercera celda circular se unen a las espumas de la limpieza y retornan a la segunda celda circular, las colas de la tercera celda circular descargan al primer banco de 4 celdas horizontales 32" x 32" (1er scavenger) y las espumas de esta descargan a la segunda celda circular mediante una bomba Warman 2 1/2" x 2", las colas del primer scavenger descargan al segundo banco de 04 celdas horizontales (2º scavenger), cuyas espumas retornan al primer banco scavenger, y las colas descargan al cajón de la bomba Comersa S.R.L 4" x 3", para ser trasladados mediante una tubería de 4" a la cancha de relaves.

3.2.4.1 Cochas de filtración y cochas de recuperación

Son hechos de material concreto armado, la planta metalúrgica presenta cuatro cochas de filtración o depósitos; dos para el concentrado de plomo, dos para el concentrado de cobre, cuyas dimensiones se presenta a continuación.

- Cocha de concentrado de plomo

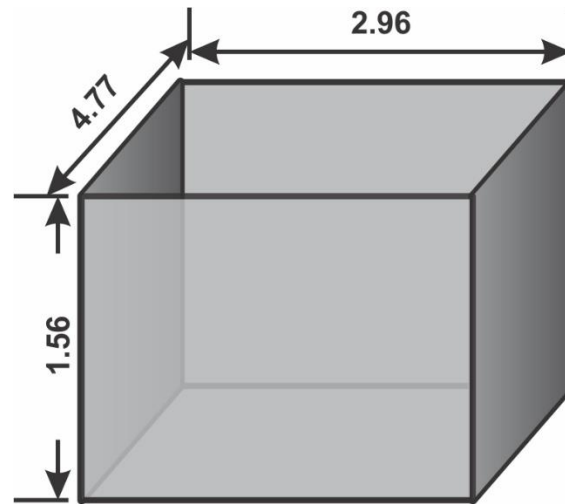


Figura 21. Se observa la cocha de concentrado de Pb de la Planta San Carlos.

Fuente: Elaboración Propia.

Capacidad = 63.48 Ton

- Cocha de concentrado de Cobre

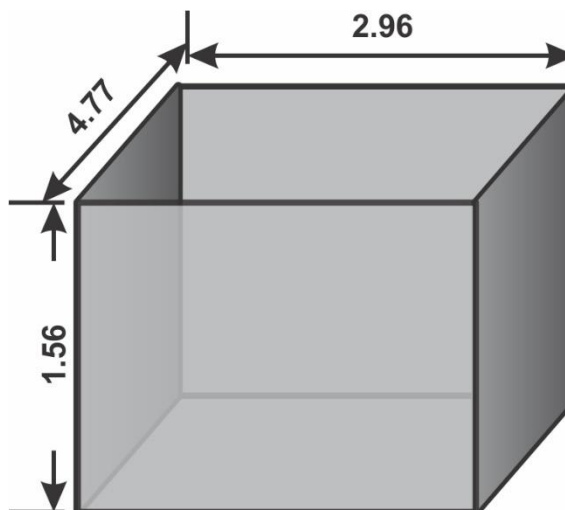


Figura 22. Se observa la cocha de concentrado de Cu de la Planta San Carlos.

Fuente: Elaboración Propia.

Capacidad = 63.48 Ton

A estos depósitos se alimenta la pulpa concentrada por medio de tuberías, a medida que esta va llenándose



se van colocando maderas con lonas de filtración, estas lonas ayudan a que el concentrado no escape en forma de pulpa, ya que por acción de gravedad las partículas valiosas se sedimentan y el agua es eliminado casi limpia, y si se produce escape de concentrado, cada cocha tiene en la salida un canal que desvía hacia la cocha de recuperación, que cada circuito contiene dos cochas.

3.2.5 Deposición del relave

Después de la flotación del concentrado de zinc, su relave es enviado a la relavera como relave general a una distancia aproximada de 5m. El depósito del relave estima en un volumen de 153m^3 de pulpa, que es depositado diariamente; el depósito de relave se localiza al lado este de la planta en la parte baja, se ha adecuado para permitir una sedimentación natural de las partículas sólidas y lograr que el agua clarificada sea expulsada por tuberías a una canaleta, una vez tratada se transporta los desechos de agua a la poza de captación de agua de planta.

Esta relavera esta reforzada por muro de contención, para este muro se ha considerado una longitud de 270m por una altura de 5m, con forma de un trapezoide truncado con un ancho de 2.5m en la base y 1m en la parte superior.

3.3 FLOW SHEET DE LA PLANTA

Adjunto en anexos.

3.4 MATERIALES Y EQUIPOS DE LABORATORIO

3.4.1 Materiales

- Sacos de Polietileno



- Bolsas de plástico
- Sacos de Polietileno
- Manta de Cuarteo
- Periódico
- Brocha
- Rodillo
- Baldes de plástico (4)
- Bandejas (10)
- Pala metálica
- Pipetas 10 ml
- Espátula
- Probeta de 1 litro
- Pizeta de 500 ml
- Jeringa de 10 ml (10)
- Baguetas de vidrio (10)
- Vaso precipitado de 10 ml (10)
- Papel filtro
- Luna reloj (vidrio)

3.4.2 Equipos

- Papel panpeha
- Balanza de precisión
- Chancadora de quijadas $2\frac{1}{4} \times 3\frac{1}{2}$
- Celda de flotación denver
- Equipo de Ro-Tap
- Mufla



- Mallas Tyler -10
- Molino de bolas
- Reloj Cronómetro
- Balanza de Kg

3.4.3 Reactivos

- CaO
- Xantato Z-6
- AP-404
- Sulfuro de sodio
- HOP
- A-208
- Aceite de Pino
- Floculante

3.4.4 Equipos de Protección

- Mameluco
- Tapón de oídos
- Mascarilla de silicona
- Guantes de jebe
- Gafas de seguridad
- Calzado de seguridad

3.5 PROCEDIMIENTO PARA LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN

El procedimiento de prueba de flotación a nivel de laboratorio se realiza utilizando muestras de mineral que sean representativas del material que se está trabajando y/o que se va a tratar en la Planta Concentradora. Este proceso es fundamental para garantizar que



los resultados obtenidos sean lo más cercanos posible al comportamiento metalúrgico real de la planta.

Para lograr esto, es esencial seguir los procedimientos metodológicos adecuados. Estos procedimientos incluyen la selección cuidadosa de las muestras de mineral, asegurando que sean verdaderamente representativas del lote completo de mineral. Además, se deben utilizar técnicas de flotación apropiadas y precisas, y se deben registrar y analizar cuidadosamente todos los resultados.

Este enfoque metódico y detallado ayuda a garantizar que los resultados de las pruebas de laboratorio proporcionen una representación precisa del rendimiento que se puede esperar en la planta concentradora. De esta manera, se pueden hacer ajustes y mejoras informadas en el proceso de flotación, lo que resulta en una mayor eficiencia y productividad.

En resumen, el procedimiento de prueba de flotación a nivel de laboratorio es un proceso esencial y complejo que requiere una atención meticulosa a los detalles y un profundo conocimiento de los principios de la flotación y el comportamiento de los minerales. Este procedimiento se describe en detalle a continuación.

3.5.1 Muestreo en cancha de mineral

Para garantizar la representatividad de la muestra, es crucial que tanto el geólogo como el metalurgista tengan una comprensión clara de las implicaciones metalúrgicas de las diversas características del mineral. Estas características pueden incluir las especies minerales presentes y sus asociaciones, el grado de diseminación de los minerales, el grado de empañamiento u oxidación, y la ley del mineral.



El objetivo principal es obtener una muestra que sea verdaderamente representativa de la mena que se va a tratar. Para ello, se realiza un muestreo en diferentes puntos de la mena. Este enfoque asegura que la muestra sea suficientemente representativa para llevar a cabo las pruebas de flotación de minerales mixtos de cobre.

El procedimiento para obtener esta muestra es el siguiente:

- **Trazado de la superficie del mineral:** Primero, se traza una cuadrícula sobre la superficie del mineral. Esta cuadrícula ayuda a asegurar que las muestras se tomen de manera uniforme a través de toda la superficie.
- **Extracción de muestras de mineral:** A continuación, se extraen pequeñas muestras de mineral de cada cuadrado de la cuadrícula. Es importante que estas muestras sean lo suficientemente pequeñas para ser manejables, pero lo suficientemente grandes para ser representativas del mineral en ese cuadrado particular.
- **Etiquetado y embolsado de las muestras:** Una vez que se ha extraído la cantidad deseada de muestra, cada muestra se etiqueta y se embolsa en sacos de polietileno. El etiquetado es crucial para mantener un registro de dónde se tomó cada muestra, mientras que el embolsado ayuda a preservar la integridad de la muestra hasta que se realicen las pruebas.

Este procedimiento detallado y metódico asegura que las muestras de mineral sean representativas y adecuadas para las pruebas de flotación de minerales mixtos de cobre. Con una muestra representativa, los resultados de las pruebas de flotación serán más precisos y útiles para la Planta Concentradora.



3.5.2 Chancado y Zarandeo

El mineral que se recoge en el campo de mineral se somete a un proceso riguroso y meticulado para prepararlo para su uso. Este proceso comienza con etapas de chancado y zarandeo, utilizando un tamiz de malla Tyler 10 μ . El objetivo de estas etapas es reducir el tamaño del mineral hasta que el 100% pase a través de la malla 10.

Este proceso de reducción de tamaño se realiza en etapas sucesivas, utilizando un tamiz de llama Tyler 10, que tiene una abertura de 1.68 mm. A través de este proceso, el tamaño del mineral procedente de la mina se reduce desde un tamaño inicial de 4 pulgadas hasta que el 100% del mineral puede pasar a través de la malla.

Para llevar a cabo este proceso, se utiliza una chancadora de quijada. Esta máquina tiene una abertura de descarga, o "set", de $\frac{1}{4}$ pulgada. El producto de la chancadora se somete a un tamizaje adicional con una zaranda de malla 10 Tyler de 30 cm x 30 cm. Los finos de la chancadora de quijada, es decir, las partículas más pequeñas, se convierten en parte del producto final. Mientras tanto, las partículas más grandes, o "gruesos", se alimentan de nuevo a la chancadora para un procesamiento adicional.

Este proceso de preparación de muestras se puede visualizar en la figura N°20. Esta figura proporciona una representación visual del proceso, lo que facilita la comprensión de las diferentes etapas y cómo se relacionan entre sí. En resumen, el proceso de preparación de muestras es un procedimiento cuidadosamente diseñado y ejecutado que asegura que el mineral esté en la condición correcta para su uso posterior.

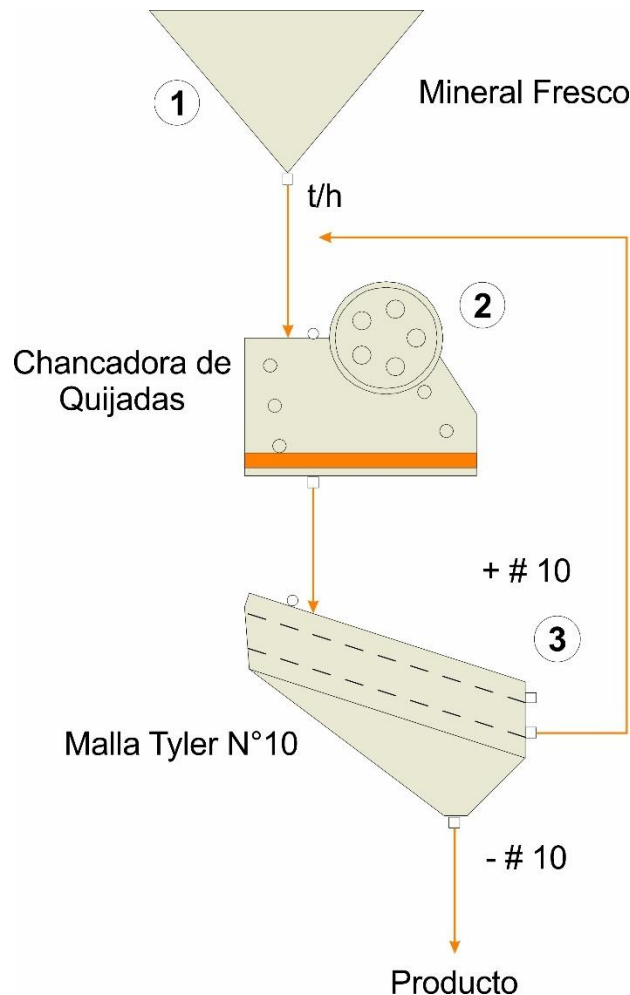


Figura 23. Esquema de preparación de la muestra

Fuente: Elaboración Propia.

3.6 HOMOGENIZACIÓN Y PARTICIÓN DE MUESTRAS

Después de haber sido cuidadosamente reducida de tamaño, la muestra total, que pesa 70 Kg, fue sometida a un proceso de homogeneización. Este proceso, realizado a mano mediante una técnica conocida como paleo, es esencial para asegurar que todas las partes de la muestra sean uniformes y representativas del lote completo.

Posteriormente, la muestra homogeneizada se dividió en 6 cúmulos de igual volumen. Esta división se realizó en forma radial, utilizando una técnica precisa conocida



como paleo fraccionado verdadero. Este método garantiza una división equitativa y precisa de la muestra, asegurando que cada cúmulo sea representativo del lote completo.

Cada uno de estos cúmulos fue luego sometido a una partición mecánica. Este proceso se llevó a cabo utilizando divisores sectoriales, herramientas especializadas diseñadas para dividir muestras de manera precisa y uniforme. Como resultado de este proceso, se obtuvieron sub-muestras de aproximadamente 1000 gramos cada una.

Este procedimiento meticuloso y detallado asegura que las sub-muestras obtenidas sean representativas de la muestra total. Estas sub-muestras son fundamentales para realizar pruebas y análisis adicionales, proporcionando información valiosa sobre las características y propiedades del mineral. En resumen, este procedimiento es un componente esencial de la preparación de muestras en el campo de la metalurgia y la minería. Cada paso del proceso es crucial para garantizar la precisión y la utilidad de los resultados de las pruebas de flotación de minerales mixtos de cobre.

3.6.1 Muestreo por paleo fraccionario

Este proceso implica la extracción de porciones del total de la muestra utilizando una pala. Estas porciones se depositan luego en la parte superior de varios cúmulos que se ubican alrededor del área de trabajo. En este estudio en particular, se optó por formar 6 cúmulos.

Una vez que se distribuyó la totalidad de la muestra, se obtuvieron 6 cúmulos de igual volumen. Este resultado es un testimonio del cuidado y la precisión con los que se llevó a cabo el proceso de distribución. Las fracciones obtenidas a través de este método, conocido como paleo fraccionado, son representativas de la muestra total y están listas para su análisis posterior.

La figura N° 21 ilustra este proceso y muestra cómo se ven los cúmulos después de la distribución de la muestra. Cada cúmulo es una representación a escala de la muestra total, lo que permite realizar pruebas y análisis en una muestra manejable sin perder la representatividad de la muestra total.

En resumen, el paleo fraccionado es un método eficaz para preparar muestras para su análisis, asegurando que cada submuestra sea representativa del lote completo de mineral. Este método es fundamental para obtener resultados precisos y confiables en las pruebas de flotación de minerales mixtos de cobre.

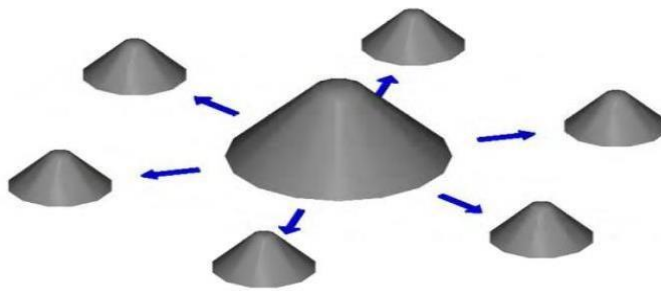


Figura 24. Obtención de cúmulos mediante paleo fraccionario.

Fuente: (Farfan Chicca & Huaracallo Choque, 2019)

3.7 DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE CINÉTICA DE MOLIENDA

Las pruebas de molienda son una parte integral del proceso de preparación de la muestra. Estas pruebas se utilizan para determinar las curvas de cinética de moliendabilidad, que son esenciales para entender cómo se comporta el mineral durante el proceso de molienda. Para obtener estos datos, se llevaron a cabo diversas pruebas de molienda, cada una diseñada para proporcionar información valiosa sobre las propiedades de moliendabilidad del mineral.

La determinación de las curvas de molienda es un proceso que permite estimar los tiempos que deben pasar las partículas dentro del molino para alcanzar la granulometría

requerida. La granulometría, o el tamaño de las partículas del mineral, es un factor crítico que puede afectar la eficacia de las pruebas de flotación. Por lo tanto, es crucial asegurarse de que las partículas del mineral sean del tamaño correcto antes de realizar estas pruebas.

Para llevar a cabo las pruebas de molienda, se utilizó un molino estándar de laboratorio experimental. Este molino, que tiene un diámetro de 22 cm y una longitud de 27 cm, es ideal para este tipo de pruebas debido a su tamaño y capacidad.



Figura 25. Molino de laboratorio experimental.

Fuente: (Farfan Chicca & Huaracallo Choque, 2019)

3.8 CARGA DE BOLAS Y VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL MOLINO DE LABORATORIO

Tabla 11

Características del molino de bolas de laboratorio.

CARACTERÍSTICAS DEL MOLINO DE BOLAS		
Dimensiones	0.7 ϕ x 0.9 pies	
Diámetro	20 cm	0.66 pies
Largo	26 cm	0.85 pies

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2020.



3.8.1 Carga de bolas

Para calcular la carga de bolas en un molino, utilizamos una expresión matemática específica. Esta expresión nos permite determinar la cantidad y el tamaño de las bolas que se deben utilizar en el molino para lograr una molienda eficiente.

La distribución de tamaños de las bolas es un aspecto crucial en este proceso. Para determinar esta distribución, recurrimos al método de Taggart, un enfoque ampliamente reconocido en el campo de la ingeniería metalúrgica.

El método de Taggart considera varios factores, incluyendo el tamaño del mineral, la dureza del mineral, y las características específicas del molino. Al tener en cuenta estos factores, el método de Taggart nos permite seleccionar una distribución de tamaños de bolas que maximiza la eficiencia de la molienda.

El cálculo de la carga de bolas y la determinación de la distribución de tamaños de bolas son pasos esenciales en el proceso de molienda. Estos pasos nos permiten optimizar el proceso de molienda y mejorar la recuperación de minerales valiosos. A continuación, se detalla la expresión matemática utilizada para estos cálculos.

$$W = 80 \times D^2 \times L \quad (29)$$

Cuando introducimos los datos correspondientes a las dimensiones del molino en la ecuación 29, obtenemos un resultado específico. Este resultado es el producto de un cálculo matemático que toma en cuenta las dimensiones particulares del molino que estamos utilizando. Es importante recordar que cualquier cambio en estas dimensiones podría alterar el resultado, lo que a su vez

podría tener un impacto en nuestras conclusiones o decisiones posteriores. Por lo tanto, es crucial asegurarse de que los datos de las dimensiones del molino se midan y se registren con precisión antes de realizar este cálculo. A continuación, presentamos el resultado obtenido al reemplazar los datos de las dimensiones del molino en la ecuación 29.

$$W = 80 \times [0.656168]^2 \times 0.853018$$

$$W = 29.381792 \text{ lbs}$$

$$W = 13.34 \text{ Kg}$$

Tabla 12

Características del molino de bolas de laboratorio.

Diámetro de bola (cm)	% Distribución	Peso Kg	Peso de cada bola	N° de bolas
3.81	54.25	7.27	0.32	23.00
2.54	31.72	4.25	0.25	17.00
1.91	14.03	1.88	0.19	10.00
	100.00	13.40		

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2020.

3.8.2 Volumen del molino

$$V = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * L \quad (30)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 30 se obtiene el siguiente resultado:

$$V = \pi * (10)^2 * 25$$

$$V = 8168.134 \text{ cm}^3$$

3.8.3 Velocidad crítica del molino

$$V_c = \frac{76.8}{\sqrt{D}} \quad (31)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 31 se obtiene el siguiente resultado:

$$V_c = \frac{76.8}{\sqrt{20}}$$

$$V_c = 94.81 \text{ RPM}$$

3.8.4 Velocidad de operación del molino

$$V_o = 0.8 * V_c \quad (32)$$

Reemplazando los datos en la ecuación 18 se obtiene el siguiente resultado:

$$V_o = 0.80 * 94.81$$

$$V_o = 75.85 \text{ RPM}$$

- Procedimiento

- 1) **Preparación de las muestras:** Para cada una de las pruebas que se van a realizar, se debe pesar 1 Kg de mineral. En total, se realizarán 8 pruebas, por lo que necesitarás 8 Kg de mineral.
- 2) **Preparación del molino:** Una vez pesado, el mineral se vierte en el molino. A continuación, se añaden 750 ml de agua para facilitar el proceso de molienda. También se deben añadir los reactivos necesarios para el tipo de mineral que se está moliendo. Una vez añadidos el agua y los reactivos, se tapa el molino para evitar la pérdida de material durante la molienda.



- 3) **Molienda:** El proceso de molienda se realiza a diferentes tiempos para observar cómo afecta el tiempo de molienda al tamaño de las partículas del mineral. En este caso, se realizarán moliendas de 6, 7, 8 y 10 minutos.
- 4) **Tamizado:** Después de cada molienda, se pesan 100 gramos del mineral molido y se tamizan utilizando una malla # - 200. Este proceso permite separar las partículas según su tamaño y obtener una distribución de tamaños de partículas para cada tiempo de molienda.
- 5) **Análisis de los resultados:** Por último, se grafican los resultados obtenidos. En el eje Y se coloca el porcentaje de material que pasa a través de la malla # -200, y en el eje X se coloca el tiempo de molienda. De esta manera, se obtiene una curva que muestra cómo varía la distribución de tamaños de partículas con el tiempo de molienda para cada una de las 8 pruebas realizadas.

Este procedimiento detallado y cuidadoso asegura que se obtengan resultados precisos y reproducibles, lo que es fundamental para entender el comportamiento del mineral durante la molienda y optimizar el proceso de flotación.

Tabla 13

Características del molino de bolas de laboratorio.

Tiempo (min.)	% -200 mallas
7	67.23
7.5	70.41
8	73.08
8.5	73.33
9	74.07
9.5	75.86
10	78.57
10.5	79.31

Fuente: Empresa Minera Silver Minsperu S.A.C, abril del 2020.

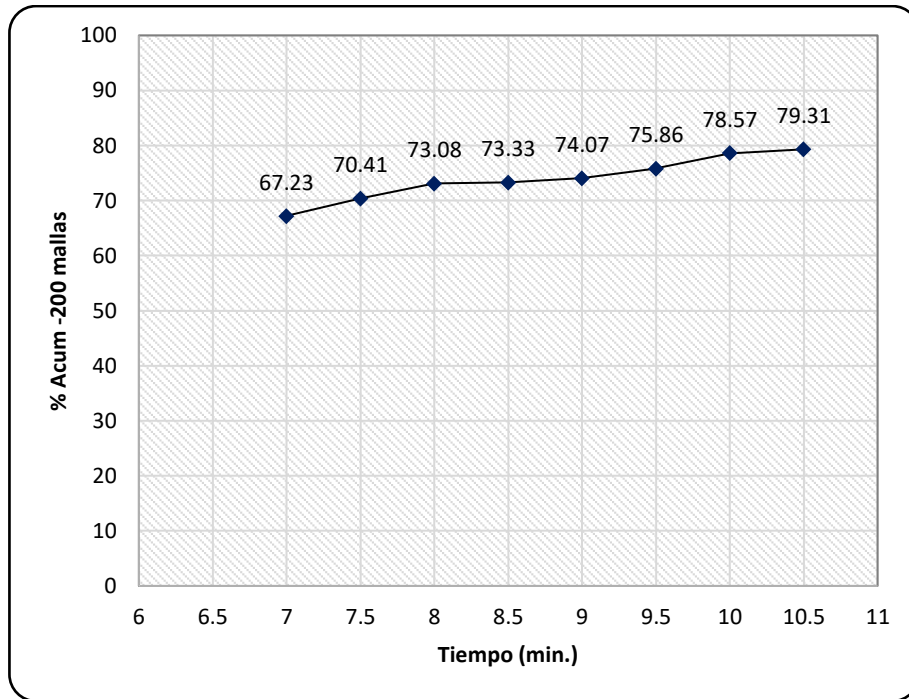


Figura 26. % Acumulado de malla -200 Vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia

3.9 PRUEBAS DE FLOTACIÓN

Para evitar errores de evaluación y dar a todos los reactivos en prueba la misma oportunidad de demostrar sus propiedades, es fundamental que las pruebas se realicen en condiciones idénticas a la prueba estándar. Esto significa que factores como la granulometría, la dilución, la dosificación de reactivos, el tiempo de acondicionamiento y flotación, el nivel de pulpa, las RPM, y la remoción de espumas, entre otros, deben ser consistentes en todas las pruebas.

Durante el proceso de flotación, es de suma importancia que la técnica empleada sea la misma para todas las pruebas. Esto incluye aspectos como la inclinación, la profundidad, la modalidad y la frecuencia de remoción de espumas, y la frecuencia de lavado. El objetivo es eliminar en lo posible el error experimental, que podría llevar a conclusiones erróneas.



Un método eficaz para conocer el grado de error que uno puede cometer durante una prueba de flotación es realizar la prueba estándar por triplicado. Si la prueba se realiza correctamente, los resultados metalúrgicos, incluyendo los pesos de los productos, deben ser similares entre sí. Esto indica que la preparación de la muestra antes y después de las pruebas se ha llevado a cabo con el debido cuidado y precisión.

La consistencia y la precisión son fundamentales en todas las etapas del proceso de prueba de flotación. Al seguir estos principios, se pueden obtener resultados precisos y confiables que permiten evaluar de manera efectiva las propiedades de los reactivos y optimizar el proceso de flotación (Dudenkov et al., 1980).

El primer paso en la preparación de los reactivos para las pruebas es rotular las jeringas. Este paso es crucial para evitar cualquier confusión que pueda llevar a la mezcla accidental de los reactivos, lo cual podría arruinar la prueba. Al rotular las jeringas, se crea una clara distinción entre los diferentes reactivos, lo que facilita enormemente el proceso de preparación.

Para la preparación de los reactivos, se deben utilizar pomos de plástico. Cada reactivo se mezcla en un pomo diferente, con la excepción del HOP. Este enfoque garantiza que cada reactivo se mantenga puro y sin contaminar, lo que es esencial para la precisión de las pruebas.

En el caso de los reactivos líquidos, el primer paso es determinar el peso de una gota de cada uno de ellos. Esto se hace calibrando la jeringa que se va a utilizar. Este paso es importante para asegurar que se utilice la cantidad correcta de reactivo en cada prueba.

Para los aerofloats, se deben utilizar jeringas de 1 ml, ya que estas producen gotas más pequeñas. Para el Aceite de Pino, se utilizará una jeringa de 5 ml. La elección del tamaño de la jeringa depende del tamaño de las gotas que se necesiten para cada reactivo.



En resumen, la preparación de los reactivos para las pruebas de flotación es un proceso cuidadoso y detallado que requiere precisión y atención al detalle. Al seguir estos pasos, se puede asegurar que los reactivos estén correctamente preparados y listos para su uso en las pruebas (Cuti Taquima & Lupo Olivo, 2019).

- **Procedimiento**

- El proceso de flotación de minerales comienza con la introducción de la pulpa, una mezcla de mineral y agua, en la celda de flotación. Este es un paso crucial, ya que la pulpa contiene el mineral que se va a separar.
- A continuación, se añade la cantidad necesaria de agua a la celda de flotación, utilizando una probeta de 1000 cm³ para medir con precisión. Esta agua ayuda a facilitar el proceso de flotación.
- Después, se añaden los reactivos a la celda de flotación, siguiendo la dosificación específica para cada reactivo. Los reactivos juegan un papel fundamental en el proceso de flotación, ya que ayudan a separar el mineral valioso de la ganga.
- Una vez añadidos los reactivos, se realiza un tiempo de acondicionamiento de 5 minutos para el colector espumante y los modificadores. Este tiempo permite que los reactivos interactúen con el mineral y prepara la pulpa para la flotación.
- A continuación, se inyecta aire manualmente a la celda de flotación. Primero, se inyecta parcialmente para oxigenar la pulpa.



Luego, se inyecta completamente para formar burbujas y se inicia el proceso de flotación del mineral durante un tiempo establecido.

- Las burbujas que se forman en la parte superior de la celda contienen la parte valiosa del mineral. Estas burbujas se separan utilizando una paleta, con un movimiento de 20 paletas por minuto. Las burbujas separadas se disponen en una bandeja para luego ser secadas. Tanto el concentrado como el relave se secan, se pesan y se envían al análisis químico.
- Finalmente, el concentrado y el relave se acopian en bandejas, se secan y se pesan para su respectivo balance metalúrgico. Este balance es esencial para evaluar la eficiencia del proceso de flotación y para hacer ajustes si es necesario.

3.10 METODOLOGIA

3.10.1 Formulación del diseño experimental

El propósito principal de la formulación del diseño experimental llevado a cabo en las pruebas metalúrgicas es determinar el porcentaje de recuperación de los mixtos de cobre. Este proceso se realiza mediante la flotación utilizando el colector **Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP)**. El objetivo es optimizar la recuperación del proceso seleccionado, teniendo en cuenta las múltiples variables que añaden complejidad al proceso.

Cuando se realizan experimentos iniciales, es recomendable asumir que las variables de respuesta son funciones lineales de los factores definidos. Por lo tanto, se pueden representar mediante las siguientes ecuaciones:



$$Y_1 = b + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + e$$

$$Y_2 = b + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + c$$

El diseño experimental de tipo factorial, representado como $2^3 = N$, es útil para determinar los modelos matemáticos lineales mencionados anteriormente. Al mismo tiempo, proporciona información precisa sobre el proceso investigado con un número mínimo de experimentos y a un costo mínimo.

El primer paso en la utilización del diseño factorial seleccionado es realizar la codificación de las variables independientes (factoriales). Esto implica ajustar sus valores para que varíen de -1 a +1. Este ajuste es necesario para adaptar las variables al modelo matemático propuesto. En otras palabras, se trata de transformar las coordenadas naturales (Z_1, Z_2, \dots, Z_k) a coordenadas dimensionales (X_1, X_2, \dots, X_k) .

Este enfoque permite una exploración sistemática y eficiente del espacio de diseño, lo que puede conducir a una mejor comprensión de los efectos de las variables en el proceso y, en última instancia, a una optimización más efectiva del proceso de recuperación de cobre.

3.10.2 Análisis estadístico

Para el estudio de las variables involucradas en el proceso de flotación, se llevó a cabo un análisis estadístico utilizando el método ANOVA (Análisis de Varianza). Este análisis es una herramienta poderosa que permite examinar cómo diferentes variables independientes pueden influir en una variable dependiente.

En este caso, el análisis ANOVA se aplicó para investigar cómo diversas variables del proceso de flotación pueden afectar los resultados obtenidos. Estas



variables pueden incluir aspectos como el tipo de mineral, la concentración de reactivos, el tiempo de flotación, entre otros.

El análisis se realizó utilizando el software MINITAB 19, una herramienta estadística ampliamente reconocida tanto en la industria como en el ámbito académico. MINITAB 19 ofrece una variedad de funciones para el análisis de datos, incluyendo el análisis ANOVA, facilitando así la interpretación de los resultados y la toma de decisiones basada en datos.

El análisis ANOVA realizado en MINITAB 19 proporcionó una visión detallada y valiosa de las variables del proceso de flotación, permitiendo una mejor comprensión de su comportamiento y potencialmente conduciendo a mejoras en la eficiencia del proceso.

3.10.2.1 Diseño factorial 2^k

El diseño factorial, representado como 2^k , es una técnica estadística que se utiliza para estudiar el efecto de múltiples factores en dos niveles cada uno, en relación con las respuestas. En otras palabras, se busca explorar la relación entre los factores (variables independientes) y las respuestas (variables dependientes).

En este estudio en particular, se están examinando tres factores. Por lo tanto, el estudio consta de 2^3 tratamientos, lo que equivale a $2*2*2 = 8$ tratamientos diferentes o puntos de diseño. Aquí, $2^k = N$, donde:

- **2 representa los niveles de las pruebas.** Estos niveles podrían ser, por ejemplo, dos condiciones diferentes bajo las cuales se realiza cada prueba.



- **K representa los factores o número de variables.** En este caso, hay 3 variables que se están estudiando.
- **N representa el número de experimentos.** En este estudio, se realizarán 8 pruebas.

Por lo tanto, este diseño factorial permitirá examinar cómo cada uno de los tres factores afecta las respuestas, tanto individualmente como en interacción con los otros factores. Este enfoque proporciona una visión completa y detallada de las relaciones entre las variables, lo que puede ser invaluable para entender y optimizar el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre.

3.10.2.2 Evaluación de las variables por diseño experimental

Las pruebas experimentales de flotación se organizaron siguiendo un diseño factorial. Este diseño es una técnica estadística que permite estudiar el efecto de varias variables al mismo tiempo. En este caso, se consideraron tres variables, lo que resulta en un total de $2^3=8$., combinaciones diferentes a probar.

Este plan de trabajo implicó la realización de 8 pruebas de flotación distintas. Además, se llevaron a cabo 3 pruebas centrales adicionales. En estas pruebas, las variables se consideraron en sus niveles mínimos y máximos. Esto permite explorar el rango completo de cada variable y entender mejor su impacto en los resultados de la flotación.

Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 16. Esta tabla proporciona una visión detallada de cómo cada combinación de variables afecta los resultados de la flotación. Al analizar estos resultados,



se pueden identificar las combinaciones de variables que conducen a los mejores resultados de flotación, lo que puede ser invaluable para optimizar el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre.

3.10.2.3 Variables del proceso

- **Variable dependiente**

Porcentaje de Recuperación

- **Variable independiente**

Hidroxamato HOP (kg/Tn)

Granulometría (% -200)

Tiempo de Flotación (min)

El diseño experimental que se implementó se basó en un diseño factorial completo. Este tipo de diseño es una herramienta poderosa que permite explorar el efecto de varios factores en un proceso. En este caso, se realizaron un total de 8 corridas experimentales, cada una con una combinación única de los niveles de los factores.

Además de estas 8 corridas, se llevaron a cabo 3 pruebas centrales adicionales. Estas pruebas son fundamentales para evaluar la reproducibilidad y la precisión de los resultados experimentales. Nos permiten verificar que los resultados obtenidos son consistentes y confiables, y nos dan una medida de la variabilidad inherente en el proceso experimental.

Todos estos detalles del diseño experimental se presentan en la Tabla 16. Esta tabla proporciona una descripción completa de cada prueba, tanto en su forma natural como codificada. La forma natural se refiere a los valores reales de los factores tal como se utilizaron en las pruebas. Por otro lado, la forma codificada transforma estos valores a una escala estandarizada, lo que facilita el análisis y la interpretación de los resultados.

Es importante destacar que la Tabla 16 contiene tanto los datos naturales como los codificados para las pruebas experimentales. Esto significa que puedes ver tanto los valores reales utilizados en las pruebas (datos naturales) como los valores estandarizados que facilitan el análisis (datos codificados).

Tabla 14

Datos naturales y codificadas para las pruebas experimentales.

Natural				
Factor	Unidad	Mínimo	Máximo	Central
X ₁ : Hidroxamato HOP	(kg/Tn)	0.26	0.82	0.54
X ₂ : Granulometría	(% -200)	65	80	72.5
X ₃ : Tiempo de Flotación	(min)	16	30	23
Codificada				
Factor	Unidad	Nivel (-)	Nivel (+)	Nivel (0)
X ₁ : Hidroxamato HOP	(kg/Tn)	-1	1	0
X ₂ : Granulometría	(% -200)	-1	1	0
X ₃ : Tiempo de Flotación	(min)	-1	1	0

Fuente: Elaboración Propia.

Al introducir estos valores en el software estadístico MINITAB 19, obtenemos el número total de pruebas que necesitamos ejecutar. En este caso, se realizarán 8 pruebas principales y 3 pruebas centrales adicionales.

Cada una de estas pruebas se diseñará para explorar diferentes combinaciones de variables.

En cada prueba, ajustaremos las variables de acuerdo con el plan generado por MINITAB 19. Esto nos permitirá observar cómo diferentes combinaciones de variables afectan los resultados de la flotación. Al final, podremos analizar los datos recopilados para entender mejor las relaciones entre las variables y optimizar el proceso de flotación.

Tabla 15

Variables en escala codificada para las pruebas experimentales.

N°	X1	X2	X3	Y
1	-1	-1	-1	77.32
2	1	-1	-1	79.91
3	-1	1	-1	84.83
4	1	1	-1	87.33
5	-1	-1	1	85.09
6	1	-1	1	89.53
7	-1	1	1	91.89
8	1	1	1	96.66
9	0	0	0	91.77
10	0	0	0	90.35
11	0	0	0	92.38

Fuente: Elaboración Propia.

Todos estos detalles del diseño experimental se presentan en la Tabla 18. Esta tabla proporciona una descripción completa de cada prueba, tanto en su forma natural como codificada. La forma natural se refiere a los valores reales de los factores tal como se utilizaron en las pruebas. Por otro lado, la forma codificada transforma estos valores a una escala estandarizada, lo que facilita el análisis y la interpretación de los resultados.

Finalmente, interpretamos los resultados de las pruebas de flotación que se presentan en la tabla. Cada prueba proporcionó un porcentaje de recuperación de cobre, que es el resultado final que se busca optimizar en el proceso de flotación. Los resultados variaron desde un 77.32% hasta un 96.66% de recuperación de cobre, dependiendo de las condiciones específicas de cada prueba.

Tabla 16

Variables en escala natural para las pruebas experimentales.

N°	Z1		Z2	Z3	Y
	Hidroxamato HOP (kg/Tn)	Granulometría (% -200)	Granulometría (% -200)	Tiempo de Flotación (min)	
1	0.26	65	65	16	77.32
2	0.82	65	65	16	79.91
3	0.26	80	80	16	84.83
4	0.82	80	80	16	87.33
5	0.26	65	65	30	85.09
6	0.82	65	65	30	89.53
7	0.26	80	80	30	91.89
8	0.82	80	80	30	96.66
9	0.54	72.5	72.5	23	91.77
10	0.54	72.5	72.5	23	90.35
11	0.54	72.5	72.5	23	92.38

Fuente: Elaboración propia.

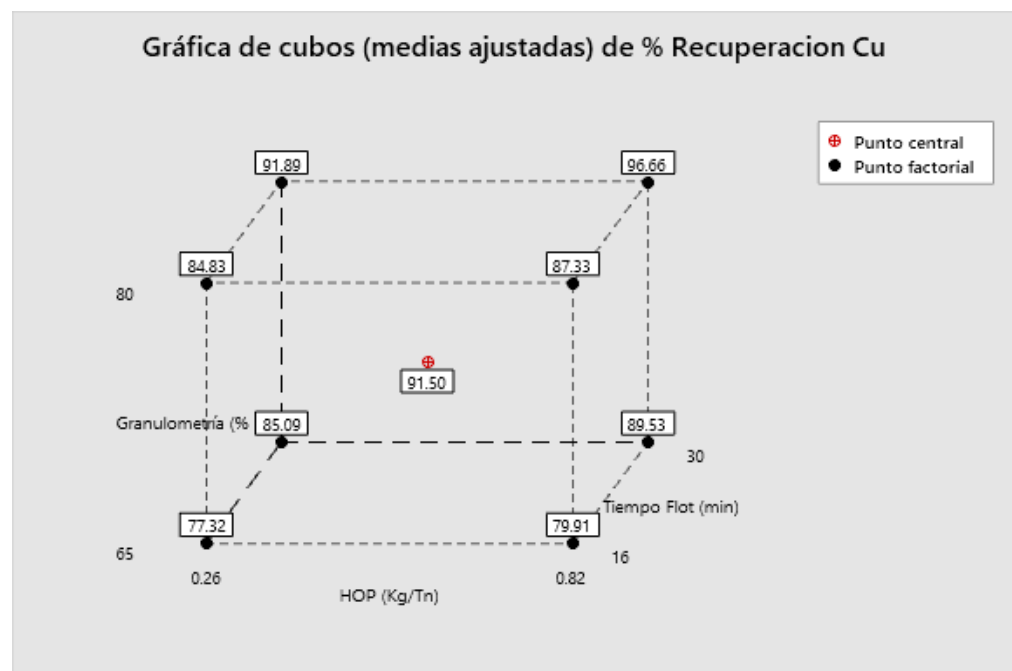


Figura 27. Representación Geométrica de 2^3 (medias de los datos).

Fuente: Elaboración propia



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN A NIVEL LABORATORIO Y EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE FLOTACIÓN

Después de llevar a cabo una serie de pruebas de flotación en el laboratorio Metalúrgico de la empresa minera SILVER MINSPERU S.A.C., se obtuvieron resultados significativos. Estas pruebas, que fueron meticulosamente diseñadas y ejecutadas, proporcionaron datos valiosos sobre el proceso de flotación.

Cada prueba fue única y se centró en un aspecto específico del proceso de flotación. Esto permitió obtener una visión detallada y completa de cómo diferentes variables y condiciones pueden afectar los resultados de la flotación.

Los resultados obtenidos de estas pruebas de flotación son fundamentales para entender y optimizar el proceso de flotación. Proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en el proceso de flotación.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de flotación realizadas. Estos resultados se describen en detalle, proporcionando una visión clara y completa de los hallazgos de cada prueba. Cada descripción incluye los parámetros de la prueba, los resultados obtenidos y su interpretación en el contexto del proceso de flotación. Con esta información, se puede obtener una comprensión profunda del proceso de flotación y cómo mejorar su eficiencia y efectividad.

Prueba N° : 01
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 75.86% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0

Tabla 17

Prueba N°01 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS							
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHIE R		FLOTACIO N ROUGHER		t = 4 min		t = 5min		t = 4 min		FLOTACION SCAVENGE R		ACONDIC . OXIDOS		FLOTACIO N OXIDOS		TOTAL	
		A		R		R		R		R		R	R		R		R	g, cc,	gotas	Kg/TMS	CONSUM O
CaO		-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010
Xantato Z-6	1	-	4	-	-	2.5	-	-	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9 CC	0.090	
AP-404	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010	
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	-	2	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 CC	0.600	
HOP	10	3	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.5 CC	0.750	
A - 208	1	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020	
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5 gotas	0.080	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 18

Balance metalúrgico de la prueba N°01.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.200	1.000	2.200	32.000	10.000	22.000	100.000	100.000	100.000	10.771
Conc. Cu	92.843	9.284	26.650	6.350	20.300	24.743	5.896	18.847	77.321	59.087	85.583	
R	907.157	90.716	0.800	0.450	0.350	7.257	4.082	3.175	22.679	40.913	14.417	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.200	0.100	0.541	32.000	9.978	22.022	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 02
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 74.07% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0

Tabla 19

Prueba N°02 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS			
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHER		FLOTACIO N		ACONDIC. SCAVENGE		FLOTACIO N		ACONDIC. SCAVENGE		FLOTACIO N		CONSUM O	
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	TOTAL	g, cc, gotas	Kg/TMS	
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010		
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	-	-	2.5	-	-	-	9 CC	0.090		
AP-404	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010		
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	-	-	2	-	-	-	6 CC	0.600		
HOP	10	1	1	-	-	-	-	-	-	1.5	-	-	-	3.5 CC	0.350		
A - 208	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020		
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	1	-	-	-	-	0.5	-	-	-	2.5 gotas	0.080		

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 20

Balance metalúrgico de la prueba N°02.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.200	1.000	2.200	32.000	10.000	22.000	100.000	100.000	100.000	10.569
Conc. Cu	94.612	9.461	27.028	8.360	18.668	25.572	7.910	17.662	79.912	71.984	84.057	
R	905.388	90.539	0.710	0.340	0.370	6.428	3.078	3.350	20.088	28.016	15.943	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.200	0.110	0.505	32.000	10.988	21.012	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 03
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 73.33% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0
 Tabla 21

Prueba N°03 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS CONSUMO		
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE		ACONDIC. SCAVENGE		ACONDIC. ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE			FLOTACION N OXIDOS	
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min		TOTAL	g, cc, gotas
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	-	-	-	2.5	-	-	-	9 CC	0.090
AP-404	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	-	-	-	2	-	-	-	6 CC	0.600
HOP	10	1.5	1	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	45 CC	0.450
A - 208	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	1	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	2.5 gotas	0.080

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 22

Balance metalúrgico de la prueba N°03.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.200	1.000	2.200	32.000	10.000	22.000	100.000	100.000	100.000	9.880
Conc. Cu	101.218	10.122	26.820	8.540	18.280	27.147	8.644	18.503	84.833	75.034	90.345	
R	898.782	89.878	0.540	0.320	0.220	4.853	2.876	1.977	15.167	24.966	9.655	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.200	0.115	0.490	32.000	11.520	20.480	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 04
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 72.41% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0
 Tabla 23

Prueba N°04 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS CONSUMO	
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE		ACONDIC. SCAVENGE		ACONDIC. SCAVENGE		ACONDIC. SCAVENGE			TOTAL
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min		
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	9 CC	0.090
AP-404	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	6 CC	0.600
HOP	10	2	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4 CC	0.400
A - 208	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5 gotas	0.080

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 24

Balance metalúrgico de la prueba N°04.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.200	1.000	2.200	32.000	10.000	22.000	100.000	100.000	100.000	10.084
Conc. Cu	99.171	9.917	28.180	8.610	19.570	27.946	8.539	19.408	87.332	76.572	93.087	10.084
R	900.829	90.083	0.450	0.290	0.160	4.054	2.612	1.441	12.668	23.428	6.913	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.200	0.112	0.552	32.000	11.151	20.849	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 05
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 73.08% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0
 Tabla 25

Prueba N°05 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS CONSUMO	
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACION ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACION N OXIDOS			
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5 min	TOTAL	g, cc, gotas		Kg/TMS
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	-	-	2.5	-	-	-	9 CC	0.090
AP-404	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	-	-	2	-	-	-	6 CC	0.600
HOP	10	2.5	1	-	-	-	-	-	-	1.5	-	-	-	5 CC	0.500
A - 208	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	1	-	-	-	-	0.5	-	-	-	2.5 gotas	0.080

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 26

Balance metalúrgico de la prueba N°05.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.250	0.900	2.350	32.500	9.000	23.500	100.000	100.000	100.000	9.742
Conc. Cu	102.652	10.265	26.940	9.340	17.600	27.654	9.588	18.067	85.090	80.428	87.791	
R	897.348	89.735	0.540	0.260	0.280	4.846	2.333	2.513	14.910	19.572	12.209	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.250	0.119	0.474	32.500	11.921	20.579	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 06
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 67.23% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0
 Tabla 27

Prueba N°06 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS			
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHER		FLOTACION N		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACION SCAVENGE R		ACONDIC. N OXIDOS		FLOTACION N OXIDOS		TOTAL	Kg/TMS
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	g, cc,	gotas		
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010	
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	-	-	-	2.5	-	-	-	9 CC	0.090	
AP-404	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010	
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	-	-	-	2	-	-	-	6 CC	0.600	
HOP	10	3	0.5	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	5.5 CC	0.550	
A - 208	1	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020	
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	-	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	2.5 gotas	0.080	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 28

Balance metalúrgico de la prueba N°06.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.250	0.900	2.350	32.500	9.000	23.500	100.000	100.000	100.000	9.561
Conc. Cu	104.592	10.459	27.820	9.480	18.340	29.097	9.915	19.182	89.531	82.187	93.866	
R	895.408	89.541	0.380	0.240	0.140	3.403	2.149	1.254	10.469	17.813	6.134	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.250	0.121	0.510	32.500	12.064	20.436	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 07
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 78.57% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0

Tabla 29

Prueba N°07 de la flotación.

FLOTACION: MIXTOS DE COBRE															
REACTIVOS	% SOLUCIÓN	MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHER		FLOTACIO N ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACIO N SCAVENGE R		ACONDIC. FLOTACIO N		REACTIVOS CONSUM O	
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	TOTAL	g, cc, gotas
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	2.5	-	-	-	-	-	9 CC	0.090
AP-404	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	2	-	-	-	-	-	6 CC	0.600
HOP	10	3.5	2	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	7.5 CC	0.750
A - 208	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	1	-	-	0.5	-	-	-	-	-	2.5 gotas	0.080

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla

Balance metalúrgico de la prueba N°07.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu	% T	% Cu Ox.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.080	0.840	2.240	30.800	8.400	22.400	100.000	100.000	100.000	9.257
Conc. Cu	108.025	10.802	26.200	5.980	20.220	28.302	6.460	21.843	91.891	83.800	94.592	
R	891.975	89.198	0.280	0.140	0.140	2.498	1.249	1.249	8.109	16.200	5.408	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.080	0.077	0.530	30.800	7.709	23.091	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 08
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 79.31% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0

Tabla 31

Prueba N°08 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS			
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHE R		FLOTACIO N		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACIO N		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACIO N		CONSUM O	
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	TOTAL	g, cc, gotas	Kg/TMS	
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010		
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	-	-	2.5	-	-	-	9 CC	0.090		
AP-404	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010		
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	-	-	2	-	-	-	6 CC	0.600		
HOP	10	4	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	8 CC	0.800		
A - 208	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020		
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	1	-	-	-	-	0.5	-	-	-	2.5 gotas	0.080		

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 32

Balance metalúrgico de la prueba N°08.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACION			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.080	0.840	2.240	30.800	8.400	22.400	100.000	100.000	100.000	
Conc. Cu	128.771	12.877	23.120	6.020	17.100	29.772	7.752	22.020	96.662	90.814	98.904	7.766
R	871.229	87.123	0.118	0.090	0.028	1.028	0.784	0.244	3.338	9.186	1.096	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.080	0.085	0.395	30.800	8.536	22.264	100.000	100.000	100.000	100.000

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 09
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 71.43% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0

Tabla 33

Prueba N°09 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS							
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHIE R		FLOTACIO N ROUGHER		t = 4 min		t = 5min		t = 4 min		FLOTACION SCAVENGE R		ACONDIC . OXIDOS		FLOTACIO N OXIDOS		TOTAL	
		t = 10 min	t = 5 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5 min	g, cc,	gotas	Kg/TMS	CONSUM O
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	-	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9 CC	0.090
AP-404	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 CC	0.600
HOP	10	2.5	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.5 CC	0.750
A - 208	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5 gotas	0.080

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 34

Balance metalúrgico de la prueba N°09.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.080	0.840	2.240	30.800	8.400	22.400	100.000	100.000	100.000	9.548
Conc. Cu	104.729	10.473	26.990	5.980	21.010	28.266	6.263	22.004	91.774	83.324	94.502	
R	895.271	89.527	0.283	0.140	0.143	2.534	1.253	1.280	8.226	16.676	5.498	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.080	0.075	0.567	30.800	7.516	23.284	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 10
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 70.37% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0
 Tabla 35

Prueba N°10 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE												REACTIVOS CONSUMO	
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACION N ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACION N OXIDOS			TOTAL g, cc, gotas
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min		
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	-	-	2.5	-	-	-	9 CC	0.090
AP-404	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	6 CC	0.600
HOP	10	2.5	1	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	5.5 CC	0.550
A - 208	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	-	1	-	-	-	0.5	-	-	-	2.5 gotas	0.080

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 36

Balance metalúrgico de la prueba N°10.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACIÓN			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.250	0.900	2.350	32.500	9.000	23.500	100.000	100.000	100.000	9.607
Conc. Cu	104.092	10.409	28.210	9.480	18.730	29.364	9.868	19.496	90.352	82.109	95.188	
R	895.908	89.591	0.350	0.240	0.110	3.136	2.150	0.985	9.648	17.891	4.812	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.250	0.120	0.528	32.500	12.018	20.482	100.000	100.000	100.000	

Fuente: Elaboración Propia.

Prueba N° : 11
 Peso de muestra : 1000 gr
 Grado de Molienda : 72.41% # -200
 PH Flotación Cu : 10.0

Tabla 37

Prueba N°11 de la flotación.

REACTIVOS	% SOLUCIÓN	FLOTACION: MIXTOS DE COBRE										REACTIVOS			
		MOLIEND A		ACONDIC. ROUGHE R		FLOTACIO N ROUGHER		ACONDIC. SCAVENGE R		FLOTACIO N SCAVENGE R		ACONDIC. FLOTACIO N		CONSUM O	
		t = 10 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5min	t = 4 min	t = 4 min	t = 5 min	t = 4 min	t = 5 min	TOTAL	Kg/TMS
CaO	Puro	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10 CC	0.010	
Xantato Z-6	1	-	4	-	2.5	-	-	2.5	-	-	-	-	9 CC	0.090	
AP-404	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1 CC	0.010	
Sulfuro de sodio	10	-	2	-	2	-	-	2	-	-	-	-	6 CC	0.600	
HOP	10	3	2.5	-	-	-	-	2	-	-	-	-	7.5 CC	0.750	
A - 208	1	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	2 CC	0.020	
Aceite de Pino	Puro	-	1	-	1	-	-	0.5	-	-	-	-	2.5 gotas	0.080	

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 38

Balance metalúrgico de la prueba N°11.

COMPONENTES	PESO Gramos	PESO %	LEYES			CONTENIDO, TMS			% RECUPERACION			RATIO
			% Cu T	% Cu Ox.	% Cu Sulf.	TM Cu	TM Cu Ox.	TM Cu Sulf.	Cu T	Cu Ox.	Cu Sulf.	
F	1000.000	100.000	3.080	0.840	2.240	30.800	8.400	22.400	100.000	100.000	100.000	
Conc. Cu	107.581	10.758	26.448	5.980	20.468	28.453	6.433	22.020	92.380	83.738	95.252	9.295
R	892.419	89.242	0.263	0.140	0.123	2.347	1.249	1.098	7.620	16.262	4.748	
C. Calculada	1000.000	100.000	3.080	0.077	0.541	30.800	7.683	23.117	100.000	100.000	100.000	100.000

Fuente: Elaboración Propia.



4.2 RESULTADOS ESTADÍSTICO DE LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN

En el marco del diseño experimental que se implementó, se llevaron a cabo **8 pruebas de flotación** junto con **3 pruebas centrales adicionales**. Estas pruebas fueron diseñadas para explorar y entender mejor los efectos de varias variables en el proceso de flotación.

La variable independiente en este estudio fue el **Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP)**, un colector que se utiliza comúnmente en la industria minera para la flotación de minerales. Este colector juega un papel crucial en la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire, lo que es fundamental para el éxito del proceso de flotación.

Además, se consideró el **porcentaje de granulometría -#200** como otra variable independiente. La granulometría se refiere a la distribución del tamaño de las partículas en una muestra de mineral, y puede tener un impacto significativo en la eficiencia del proceso de flotación.

El **tiempo de flotación** también se consideró como una variable independiente. El tiempo de flotación puede influir en la cantidad de mineral que se recupera, así como en la calidad del concentrado resultante.

La **variable dependiente** en este estudio fue el **porcentaje de recuperación**. Este es un indicador clave de la eficacia de un proceso de flotación, ya que mide la proporción del mineral valioso que se ha podido recuperar en el concentrado.

Por lo tanto, este experimento buscaba entender cómo la variación en el tipo de colector, el porcentaje de granulometría y el tiempo de flotación podría afectar al porcentaje de recuperación en un proceso de flotación. Los resultados de este estudio



podrían tener implicaciones significativas para la optimización de los procesos de flotación en la industria minera. Las pruebas centrales adicionales proporcionaron un mayor nivel de robustez y confiabilidad a los resultados obtenidos.

Los datos recolectados en el desarrollo de los experimentos fueron tabulados, analizados y graficados por el software estadístico Minitab 19.

4.2.1 Efectos estimados para el porcentaje de recuperación

En el diseño experimental conocido como 2^3 , se tiene la capacidad de examinar tres factores principales. Este diseño permite la realización de dos iteraciones dobles, que son repeticiones del experimento bajo las mismas condiciones para dos de los factores, y una iteración triple, que es una repetición del experimento para los tres factores simultáneamente.

Este tipo de diseño es muy útil cuando se quiere entender el efecto de varios factores y sus interacciones en un resultado de interés. Al realizar múltiples iteraciones, se puede obtener una estimación más precisa de los efectos de los factores y reducir la variabilidad en los resultados.

En la Figura 30, que muestra los efectos principales, se pueden identificar los efectos individuales de cada uno de los tres factores, así como las interacciones entre ellos. Esta figura es una herramienta poderosa para visualizar y entender cómo cada factor y sus interacciones contribuyen al resultado final.

Tabla 39

Resultado del cálculo de efectos.

Término	Efecto	Coef	EE del
			coef.
Constante		86.570	0.368
HOP (Kg/Tn)	3.575	1.788	0.368
Granulometría (% -200)	7.215	3.608	0.368
Tiempo Flot (min)	8.445	4.223	0.368
HOP (Kg/Tn)*Granulometría (% -200)	0.060	0.030	0.368
HOP (Kg/Tn)*Tiempo Flot (min)	1.030	0.515	0.368
Granulometría (% -200)*Tiempo Flot (min)	-0.250	-0.125	0.368
HOP (Kg/Tn)*Granulometría (% -200)*Tiempo Flot (min)	0.105	0.053	0.368
Pt Ctral		4.930	0.705

Fuente: Elaboración propia.

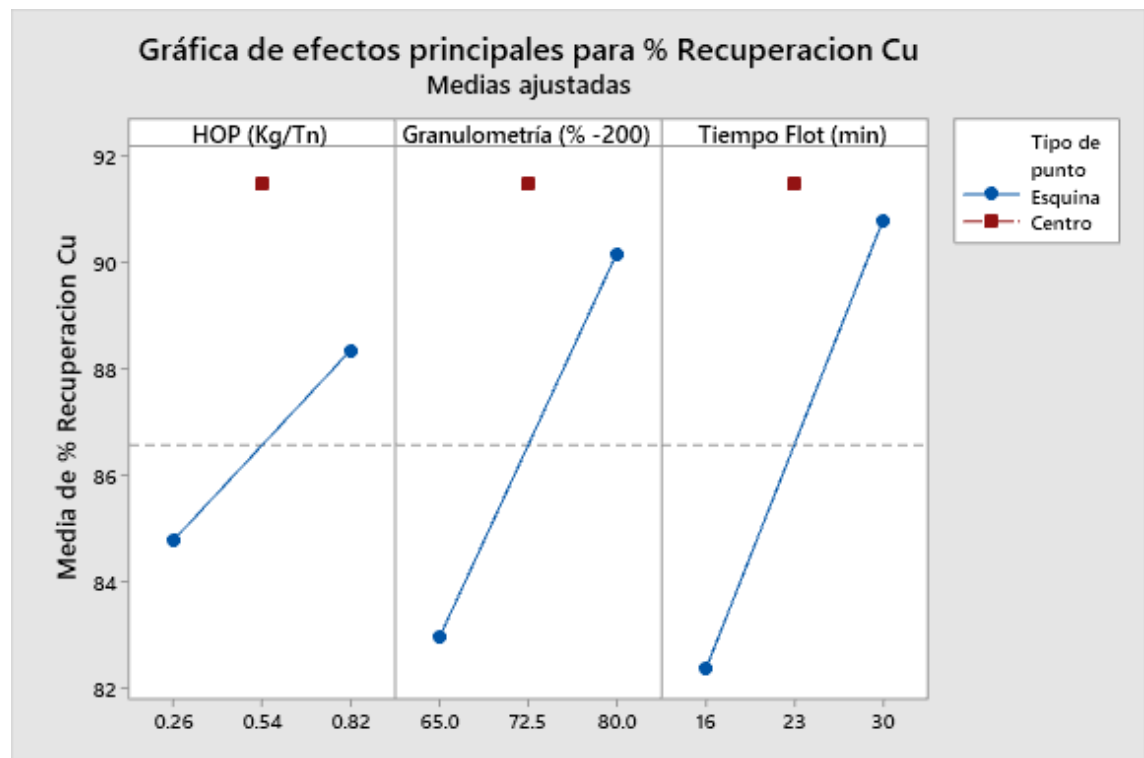


Figura 28. Grafica de Efectos principales.

Fuente: Elaboración propia.

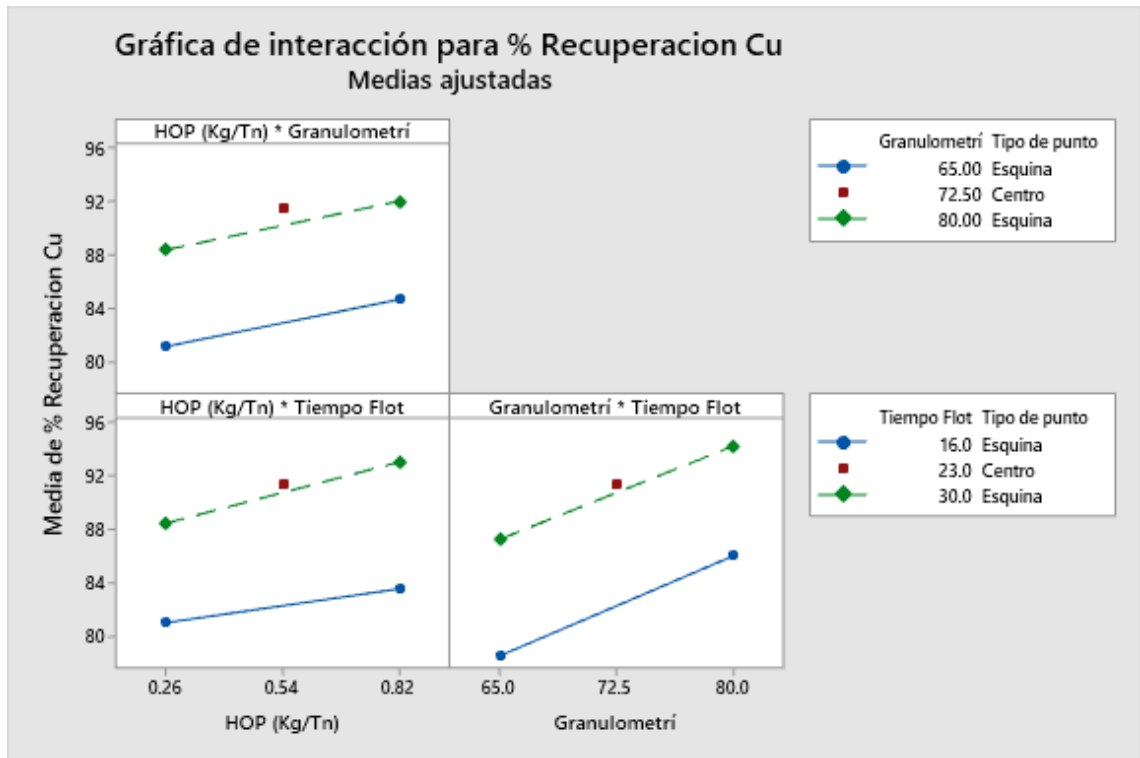


Figura 29. Grafica de Interacción.

Fuente: Elaboración propia.

- Tiempo de Flotación (minutos):** Este factor juega un papel crucial en la variable de respuesta, que es el porcentaje de recuperación de cobre (% de recuperación Cu). Se ha observado que cuando el tiempo de flotación aumenta desde su nivel más bajo (16 minutos) hasta su nivel más alto (30 minutos), tiene un impacto positivo en la recuperación de cobre. Este aumento en el tiempo de flotación se traduce en un incremento significativo del 8.445% en la recuperación de cobre. Esto sugiere que el tiempo de flotación es un parámetro crítico en el proceso de flotación.
- Granulometría (% -#200):** La granulometría es otro factor que tiene un efecto significativo en la variable de respuesta (% de recuperación Cu). Se ha encontrado que cuando la granulometría aumenta desde su nivel más bajo (65 % -#200) hasta el más alto (80 % -#200), se observa un impacto positivo en la recuperación de cobre. Este cambio en la granulometría



resulta en un aumento del 7.215% en la recuperación de cobre. Esto indica que la granulometría es un factor importante a considerar en el proceso de flotación.

- **Concentración de Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP):** En contraste, la concentración de HOP tiene un efecto menos pronunciado en la variable de respuesta (% de recuperación Cu). Un cambio en la concentración de HOP, desde el nivel más bajo hasta el más alto, tiene una influencia relativamente leve en la recuperación del cobre, que se traduce en un aumento del 3.575% en la recuperación. Aunque este efecto es menor en comparación con los otros dos factores, sigue siendo relevante para el proceso de flotación.
- **Comportamiento del Gráfico:** Al observar las relaciones entre los factores principales y el punto central en el gráfico, se nota una curvatura muy pronunciada. Esto sugiere que los cambios en los niveles de estos factores tienen un impacto significativo en la recuperación de cobre. Además, su efecto no es lineal, lo que implica que deben ser considerados cuidadosamente al diseñar y optimizar el proceso de flotación de minerales mixtos. Esta observación subraya la importancia de un análisis cuidadoso de los datos y la necesidad de considerar todas las variables y sus interacciones al optimizar el proceso de flotación.

4.2.2 Análisis de varianza para porcentaje de recuperación de cobre

La Figura 32 nos ofrece una visión jerárquica de cómo los distintos factores afectan a la variable de respuesta, que en este contexto es el porcentaje de recuperación de cobre. Esta representación jerárquica nos permite identificar



de manera clara y ordenada los factores que ejercen un mayor impacto en la variable de respuesta.

En el proceso de flotación con Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP), las variables e interacciones que resultan ser significativas son: el Tiempo de Flotación (min), la Granulometría (% -#200) y la cantidad de Hidroxamato Octílico de Potasio HOP (Kg/Tn). Estos factores son los que más influyen en el porcentaje de recuperación de cobre. Esto implica que estas variables son cruciales en la optimización del proceso de flotación de minerales mixtos de cobre. Por lo tanto, cualquier cambio en estos factores puede tener un efecto considerable en la recuperación de cobre.

Para corroborar estas observaciones, se puede hacer referencia al valor de probabilidad que se encuentra en la Tabla 42 del Análisis de Varianza (ANOVA). Este análisis proporciona información adicional sobre la relevancia estadística de estos factores. El análisis de ANOVA es una herramienta útil que ayuda a confirmar la importancia de estos factores en el proceso y respalda la conclusión de que las interacciones mencionadas tienen un impacto significativo en la variable de respuesta. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta estos factores al buscar optimizar el proceso de flotación.

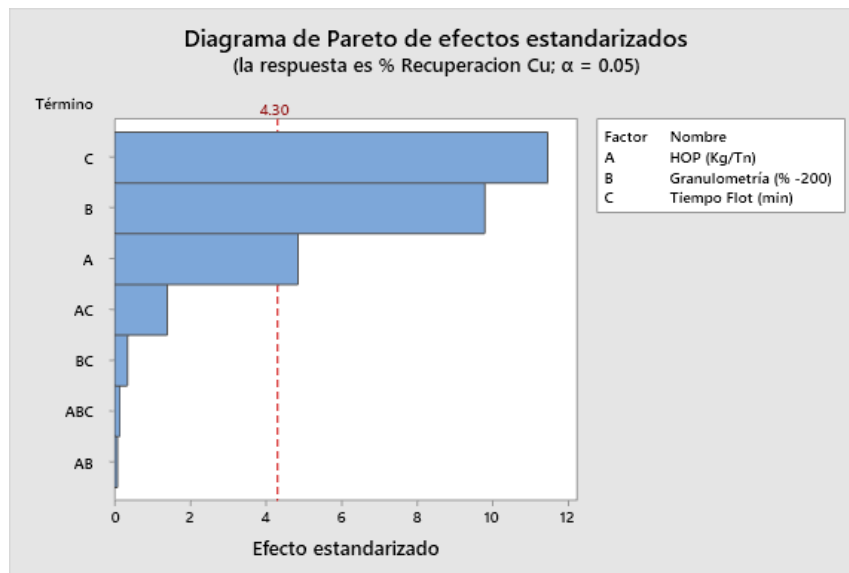


Figura 30. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40

Análisis de varianza (ANOVA).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	327.615	40.952	37.75	0.026
Lineal	3	272.310	90.770	83.67	0.012
HOP (Kg/Tn)	1	25.561	25.561	23.56	0.040
Granulometría (% -200)	1	104.112	104.112	95.97	0.010
Tiempo Flot (min)	1	142.636	142.636	131.47	0.008
Interacciones de 2 términos	3	2.254	0.751	0.69	0.636
HOP (Kg/Tn)*Granulometría (% -200)	1	0.007	0.007	0.01	0.942
HOP (Kg/Tn)*Tiempo Flot (min)	1	2.122	2.122	1.96	0.297
Granulometría (% -200)*Tiempo Flot (min)	1	0.125	0.125	0.12	0.767
Interacciones de 3 términos	1	0.022	0.022	0.02	0.900
HOP (Kg/Tn)*Granulometría (% -200)*Tiempo Flot (min)	1	0.022	0.022	0.02	0.900
Curvatura	1	53.029	53.029	48.88	0.020
Error	2	2.170	1.085		
Total	10	329.784			

Fuente: Elaboración propia

El diseño factorial 2k con réplicas centrales, que se utiliza en este estudio, no cumple con la suposición de linealidad. Esto significa que el comportamiento del proceso de flotación no sigue una relación lineal con los cambios en los factores. Esta observación se confirma mediante una prueba de curvatura, cuyos



resultados se pueden encontrar en la Tabla 42 del análisis de varianza (ANOVA). Es importante destacar que el valor de probabilidad asociado al efecto de curvatura es de 0.020, lo cual es significativamente inferior al límite de valor de significancia estándar de 0.05. Esto proporciona una evidencia estadística sólida de que la suposición de linealidad no se cumple en el proceso de flotación estudiado.

Además, el análisis de la Tabla 42 del ANOVA revela que los tres efectos principales son significativos en relación con la variable respuesta, que en este caso es el porcentaje de recuperación de cobre. Esto implica que estos factores tienen un impacto estadísticamente significativo en la recuperación de cobre en el proceso de flotación. Sin embargo, se menciona que las interacciones entre los factores son estadísticamente nulas, lo que sugiere que no tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.

Estos hallazgos indican que el proceso de flotación estudiado es no lineal y que todos los factores específicos son críticos para determinar la recuperación de cobre. Por lo tanto, es esencial considerar estas no linealidades y factores significativos al optimizar y controlar el proceso de flotación para lograr una recuperación de cobre óptima. Estos resultados subrayan la importancia de un enfoque más complejo y matizado en la optimización del proceso de flotación, que tenga en cuenta tanto los factores individuales como sus interacciones.

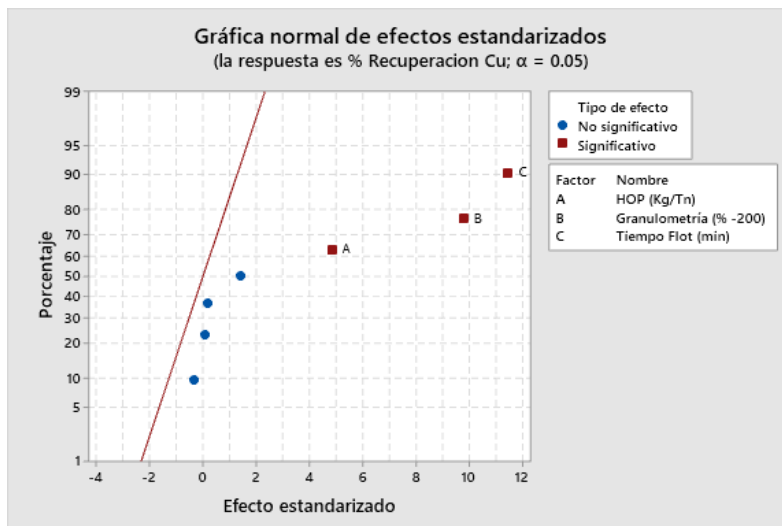


Figura 31. Normalidad de efectos estandarizados.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41

Análisis de T-Student.

Término	Valor T	Valor p	FIV
Constante	235.08	0.000	
HOP (Kg/Tn)	4.85	0.040	1.00
Granulometría (% -200)	9.80	0.010	1.00
Tiempo Flot (min)	11.47	0.008	1.00
HOP (Kg/Tn)*Granulometría (% -200)	0.08	0.942	1.00
HOP (Kg/Tn)*Tiempo Flot (min)	1.40	0.297	1.00
Granulometría (% -200)*Tiempo Flot (min)	-0.34	0.767	1.00
HOP (Kg/Tn)*Granulometría (% -200)*Tiempo Flot (min)	0.14	0.900	1.00
Pt Ctral	6.99	0.020	1.00

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 43 presenta el valor de T, que es un indicador de la significancia de los factores en el proceso de flotación. Este valor nos permite entender la importancia de cada factor y su influencia positiva en la respuesta del proceso.

En particular, el Tiempo de Flotación (min) tiene un valor de T de 11.47, lo que indica una alta significancia en el proceso. Esto sugiere que el tiempo de flotación es un factor crítico en la recuperación de cobre y que cualquier cambio



en este parámetro puede tener un impacto considerable en la eficiencia del proceso.

Por otro lado, la Granulometría (% -200) tiene un valor de T de 9.80, lo que también indica una significancia importante. Esto implica que el tamaño de las partículas de mineral tiene un efecto notable en la recuperación de cobre.

Finalmente, la concentración de Hidroxamato Octílico de Potasio HOP (Kg/Tn) tiene un valor de T de 4.85. Aunque este valor es menor que los otros, todavía indica una significancia relevante. Esto significa que la concentración de HOP es un factor a tener en cuenta en el proceso de flotación.

Estos valores de T, por lo tanto, resaltan la importancia de estos tres factores en el proceso de flotación y sugieren que deben ser cuidadosamente controlados y optimizados para maximizar la recuperación de cobre.

4.2.3 Coeficiente de regresión para porcentaje de recuperación

Tabla 42

Coefficiente de regresión.

	Coefficiente	Estimado
	Constante	31.0
A	Hidroxamato HOP (kg/Tn)	5.3
B	Granulometría (% -200)	0.572
C	Tiempo de Flotación (min)	0.77

Fuente: Elaboración propia

Esta interfaz muestra la ecuación de regresión que se ha calibrado para ajustarse a los datos recopilados. Esta ecuación es el resultado de un análisis estadístico que busca encontrar la mejor relación entre las variables independientes (los factores) y la variable dependiente (la respuesta).



La ecuación del modelo ajustado que se presenta es el producto de este análisis. Esta ecuación es una representación matemática de cómo los factores influyen en la respuesta. Se puede utilizar para predecir la respuesta en función de los valores de los factores, y también para entender cómo cada factor contribuye a la respuesta.

Es importante recordar que esta ecuación es un modelo, una simplificación de la realidad. Aunque se ha ajustado para reflejar los datos lo mejor posible, puede no capturar todas las complejidades del proceso real. Por lo tanto, siempre debe utilizarse con precaución y en el contexto de un entendimiento más amplio del proceso.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \% \text{ Recuperación Cu} = & 31.0 + 5.3 \text{ HOP (Kg/Tn)} + 0.572 \text{ Granulometría (\% -200)} + 0.77 \\ & \text{Tiempo Flot (min)} - 0.068 \text{ HOP (Kg/Tn)*Granulometría (\% -200)} \\ & + 0.00 \text{ HOP (Kg/Tn)*Tiempo Flot (min)} - 0.0043 \text{ Granulometría} \\ & (\% -200)*\text{Tiempo Flot (min)} + 0.0036 \text{ HOP} \\ & (\text{Kg/Tn}) * \text{Granulometría (\% -200)} * \text{Tiempo Flot (min)} + 4.930 \text{ Pt} \\ & \text{Ctral} \end{aligned}$$

En el contexto en el que nos encontramos, es importante mencionar que los valores correspondientes a las variables se presentan en sus unidades de medida originales. Esto significa que no se han transformado, escalado ni modificado de ninguna manera, conservando así su formato y magnitud inicial. Esta precisión es crucial para mantener la integridad de los datos y asegurar que las interpretaciones y conclusiones derivadas de ellos sean válidas y confiables.

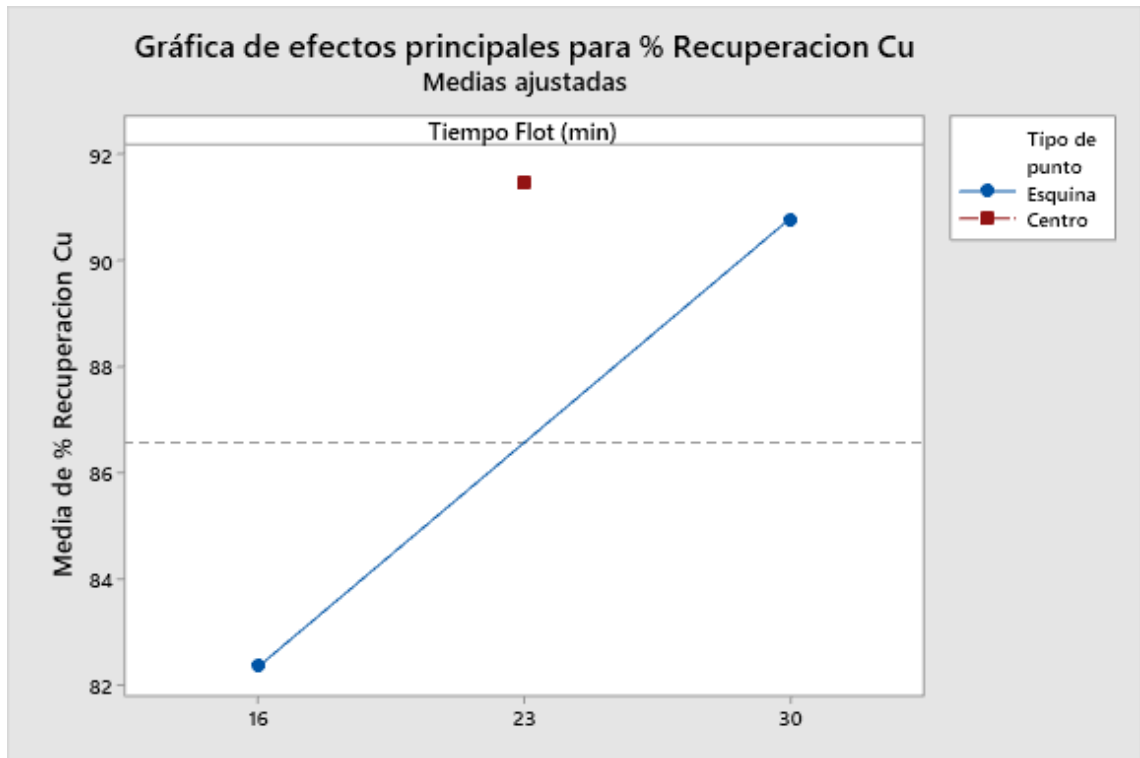


Figura 32. Gráfica de efectos principales para % Recuperación Cu Vs Tiempo de Flotación.

Fuente: Elaboración propia.

Basándonos en la interpretación de la Figura 34 que es una gráfica de Efectos Principales para el porcentaje de Recuperación de Cobre en función del Tiempo de Flotación, se puede deducir que existe una correlación directa entre estas dos variables. Es decir, a medida que se incrementa el tiempo de flotación en el proceso, se observa un aumento proporcional en la recuperación de cobre. Esta relación sugiere que el tiempo de flotación juega un papel crucial en la eficiencia de la recuperación de cobre, destacándose como la variable de mayor relevancia en este contexto. Por lo tanto, cualquier ajuste o modificación en el tiempo de flotación podría tener un impacto significativo en la cantidad de cobre recuperado. Esto subraya la importancia de un control preciso y cuidadoso del tiempo de flotación durante el proceso.

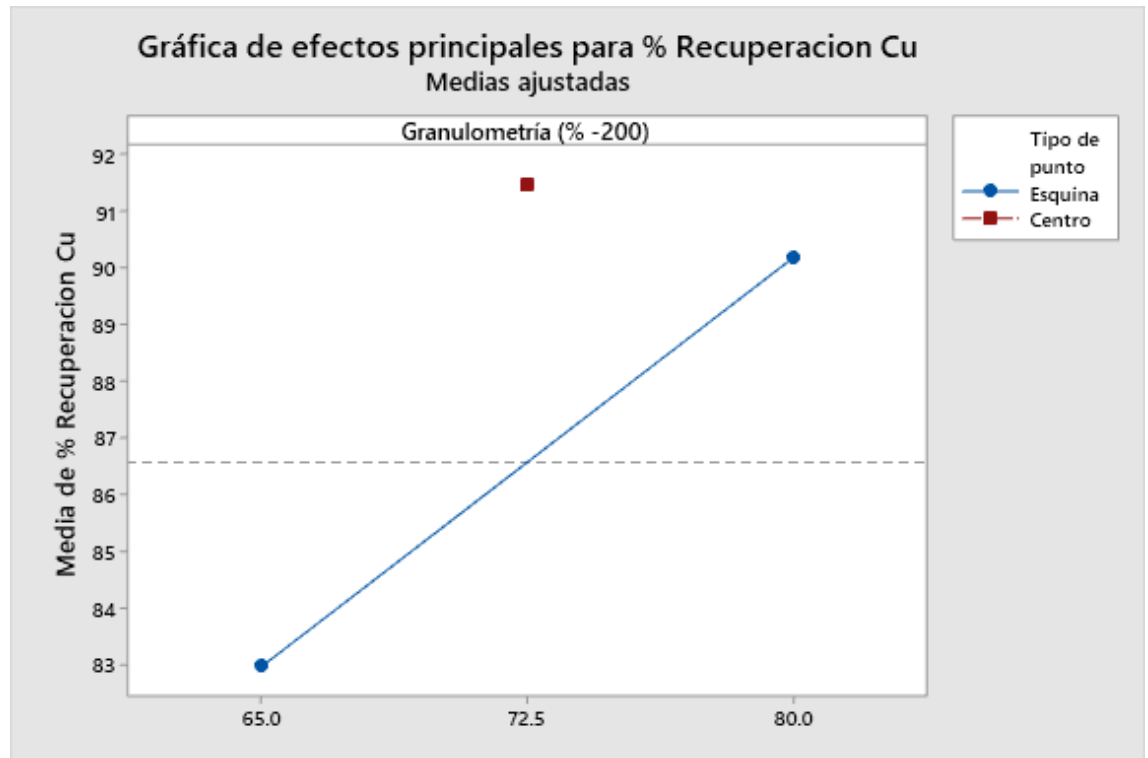


Figura 33. Gráfica de efectos principales para % Recuperación Cu Vs Granulometría.

Fuente: Elaboración propia.

Según la interpretación de la Figura 35 que relaciona la Recuperación de Cobre con la Granulometría, se puede inferir que existe una tendencia ascendente moderada en la recuperación de cobre a medida que aumenta el porcentaje de granulometría. Esto sugiere que un incremento en la granulometría puede resultar en una mejora, aunque leve, en la recuperación del cobre. Además, se destaca que la molienda se considera adecuada cuando el 80% de las partículas son menores a 200 micrones (#200). Este punto parece ser el óptimo para maximizar la recuperación de cobre, lo que subraya la importancia de un control riguroso del tamaño de partícula en el proceso de molienda. En resumen, la granulometría juega un papel importante, aunque no tan crítico como otras variables, en la eficiencia de la recuperación de cobre.

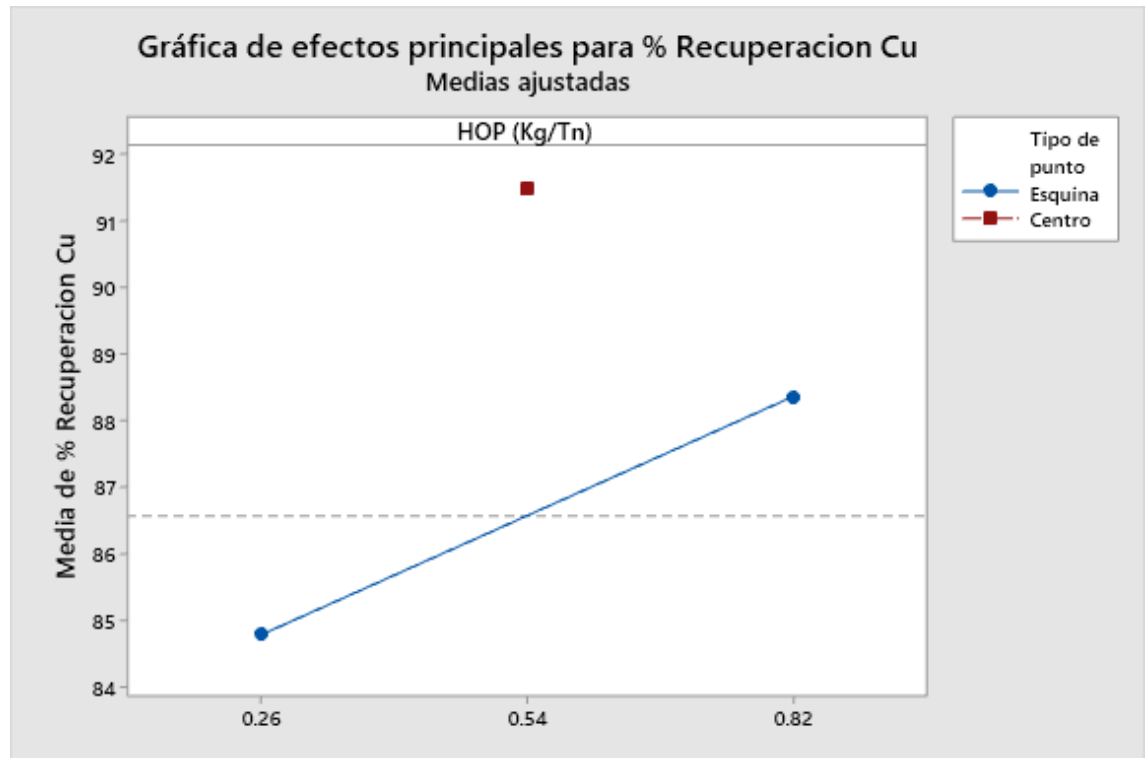


Figura 34. Gráfica de efectos principales para % Recuperación Cu Vs HOP.

Fuente: Elaboración propia.

Al observar la gráfica que relaciona la Recuperación de Cobre con el consumo del Hidroxamato octílico de potasio (HOP), se puede inferir que existe una correlación directa entre estas dos variables. Esto significa que a medida que se incrementa el consumo del Hidroxamato octílico de potasio, se observa un aumento correspondiente en la recuperación de cobre. Esta relación indica que el Hidroxamato octílico de potasio juega un papel fundamental en la eficiencia de la recuperación de cobre, y que su consumo es un factor clave en este proceso. Por lo tanto, cualquier cambio en el consumo del Hidroxamato octílico de potasio podría tener un impacto directo en la cantidad de cobre recuperado. Esto subraya la importancia de un control riguroso del consumo del Hidroxamato octílico de potasio durante el proceso de flotación.

4.2.4 Grado de confianza

Tabla 43

Grado de confianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Valor P	Razón F	Distribución F (95%,1,4)	Significativo
Modelo	327.615	8	40.952	0.026	37.75	-	-
Lineal	272.310	3	90.770	0.012	83.67	-	-
HOP (Kg/Tn)	25.561	1	25.561	0.040	23.56	7.71	SI
Granulometría (% -200)	104.112	1	104.112	0.010	95.97	7.71	SI
Tiempo Flot (min)	142.636	1	142.636	0.008	131.47	7.71	SI
Interacciones de 2 términos	2.254	3	0.751	0.636	0.69	-	-
HOP (Kg/Tn)*Granulometría (% -200)	0.007	1	0.007	0.942	0.01	7.71	NO
HOP (Kg/Tn)*Tiempo Flot (min)	2.122	1	2.122	0.297	1.96	7.71	SI
Granulometría (% -200)*Tiempo Flot (min)	0.125	1	0.125	0.767	0.12	7.71	NO
Interacciones de 3 términos	0.022	1	0.022	0.900	0.02	-	-
HOP (Kg/Tn)*Granulometría (% -200)*Tiempo Flot (min)	0.022	1	0.022	0.900	0.02	7.71	NO
Curvatura	53.029	1	53.029	-	48.88	-	-
Error	2.170	2	1.085	-	-	-	-
Total	329.784	10	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En el análisis de los datos presentados en la Tabla 45, se ha realizado un cálculo del error experimental. Este cálculo se basa en la suposición de que las interacciones presentes en la tabla son equivalentes al error experimental y que su significancia es nula para el proceso en estudio. La fórmula utilizada para calcular el error experimental es la siguiente:

$$S^2_{error} = \frac{S^2_{interacciones}}{Grados\ de\ libertad} = \frac{2.276}{4} = 0.569$$

Un factor se considera significativo al nivel del 95% si su valor F práctico es mayor que el valor F obtenido de las tablas de distribución F. El valor F práctico se calcula dividiendo la varianza del efecto entre el error experimental, como se muestra a continuación:

$$F\ Practicó = \frac{S^2_{efecto}}{S^2_{error}}$$



Para los efectos A, B y C, los valores F prácticos calculados son 44.923, 182.974 y 250.678 respectivamente, como se muestra a continuación:

- Efecto A: $F_{\text{Practicó}} = \frac{S^2_{\text{efecto}}}{S^2_{\text{error}}} = \frac{25.561}{0.569} = 44.923$
- Efecto B: $F_{\text{Practicó}} = \frac{S^2_{\text{efecto}}}{S^2_{\text{error}}} = \frac{104.112}{0.569} = 182.974$
- Efecto C: $F_{\text{Practicó}} = \frac{S^2_{\text{efecto}}}{S^2_{\text{error}}} = \frac{142.636}{0.569} = 250.678$

Según las tablas estadísticas de significancia para la prueba de Fisher (ver Anexo N°02), los valores F para un nivel de significancia del 95% y 99%, para 1 y 4 grados de libertad respectivamente, son 7.71 y 21.20.

Por lo tanto, dado que los valores F prácticos (F_0) para los efectos A, B y C son mayores que los valores F de las tablas, se puede concluir que las tres variables son significativas tanto al 95% como al 99% de significancia. Esto implica que estas variables tienen un impacto significativo en el proceso en estudio.

- **CONCLUSIONES DEL TEST DE FISHER**

Las conclusiones derivadas del Test de Fisher para el proceso en estudio son las siguientes:

Efecto A: Concentración del Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP):

Este efecto es significativo para el proceso, ya que cumple con la relación

$$F_{\text{practico}} > F_{\text{tablas}}$$

(44.923 > 7.71). Esto indica que la concentración del reactivo HOP tiene un impacto significativo en el proceso. Por lo tanto, es crucial manejar con cuidado la concentración de HOP para optimizar el proceso.



Efecto B: Granulometría del mineral: Este efecto también es significativo para el proceso, ya que cumple con la relación

$$F_{practico} > F_{tablas}$$

(182.974 > 21.20). Esto sugiere que la granulometría del mineral tiene un impacto considerable en el proceso. Por lo tanto, se recomienda utilizar concentraciones de granulometría cercanas al nivel superior para optimizar el proceso.

Efecto C: Tiempo de flotación total: Este efecto es igualmente significativo para el proceso, ya que cumple con la relación

$$F_{practico} > F_{tablas}$$

(250.678 > 21.20). Esto implica que el tiempo total de flotación tiene un impacto significativo en el proceso. Por lo tanto, se puede deducir que se debe emplear un tiempo de flotación aproximado al nivel máximo para optimizar el proceso.

Estas conclusiones subrayan la importancia de estos tres factores - la concentración de HOP, la granulometría del mineral y el tiempo total de flotación - en la eficacia del proceso. Por lo tanto, se deben manejar estos factores con precisión para optimizar el proceso y maximizar la eficiencia.

4.2.5 Matriz de correlación para los efectos estimados

Tipo de correlación : Pearson

Filas utilizadas : 11

ρ : correlación en parejas de Pearson

Tabla 44

Correlación de efectos.

	HOP (Kg/Tn)	Granulometría (% -200)
Granulometría (% -200)	0.000	
Tiempo Flot (min)	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45

Correlaciones en parejas de Pearson.

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
Granulometría (% -200)	HOP (Kg/Tn)	0.000	(-0.600; 0.600)	1.000
Tiempo Flot (min)	HOP (Kg/Tn)	0.000	(-0.600; 0.600)	1.000
Tiempo Flot (min)	Granulometría (% -200)	0.000	(-0.600; 0.600)	1.000

Fuente: Elaboración propia

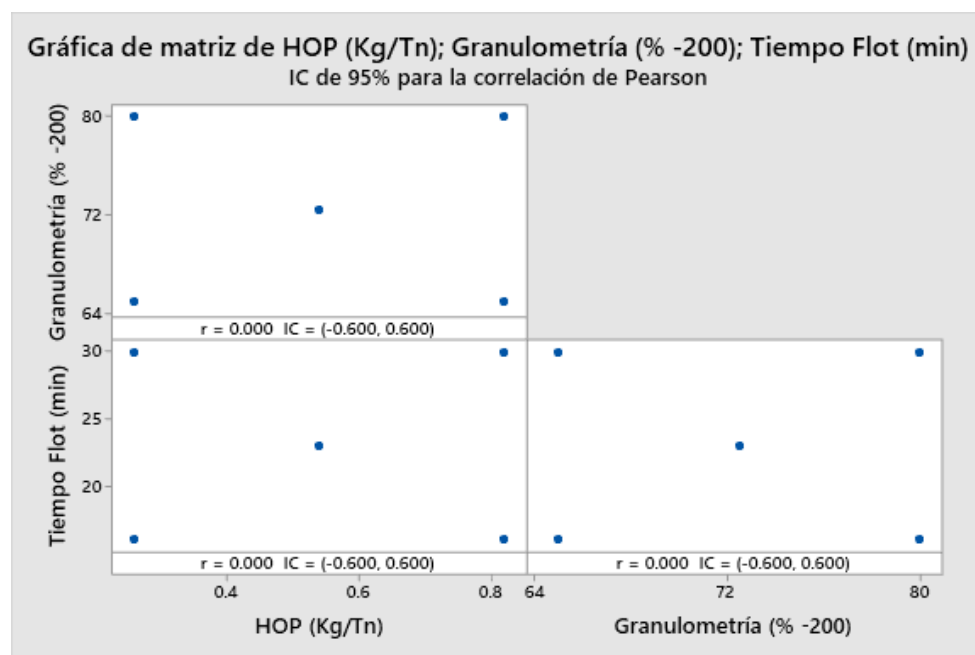


Figura 35. Gráfica de matriz de HOP (Kg/Tn); Granulometría (% -200); Tiempo Flot (min) IC de 95% para la correlación de Pearson.

Fuente: Elaboración propia.

En un diseño perfectamente ortogonal, la matriz de correlación se presenta como una matriz diagonal con unos (1's) en la diagonal principal y ceros (0's) en todas las demás posiciones. Esto se debe a que cada efecto es independiente de los demás, es decir, no están correlacionados.

Si en la matriz aparece cualquier término distinto de cero fuera de la diagonal principal, esto indica que los efectos correspondientes a esa fila y columna específicas están correlacionados. En otras palabras, la variación en uno de los efectos puede estar relacionada con la variación en el otro.

Sin embargo, en el caso que nos ocupa, la matriz de correlación no muestra ninguna correlación entre ninguno de los efectos. Esto significa que todos los efectos son independientes entre sí. Como resultado, se obtendrán estimaciones "limpias" para todos estos efectos, es decir, las estimaciones de los efectos no estarán sesgadas por la correlación con otros efectos.

En resumen, la matriz de correlación es una herramienta valiosa para entender las relaciones entre los diferentes efectos en un diseño experimental. En este caso particular, la ausencia de correlación entre los efectos nos permite obtener estimaciones precisas y no sesgadas de cada efecto. Esto es crucial para la interpretación correcta de los resultados del estudio y para la toma de decisiones basada en estos resultados.

4.2.6 Resultados estimados para porcentaje de recuperación

Tabla 46

Resultados usando el modelo matemático.

Fila	Observados Valores	Ajustados Valores	Inferior 95.0% para Media	Superior 95.0% para Media
1	77.320	77.320	78.513	77.698
2	79.910	79.910	80.806	80.586
3	84.830	84.830	85.431	85.801
4	87.330	87.330	87.783	88.448
5	85.090	85.090	85.501	86.251
6	89.530	89.530	90.173	90.458
7	91.890	91.890	92.828	92.523
8	96.660	96.660	97.811	97.081

Fuente: Elaboración propia



La información que está observando es una tabla que presenta información detallada sobre los valores de Recuperación, los cuales han sido generados utilizando un modelo matemático ajustado específicamente para este propósito.

Esta tabla se compone de varios elementos clave:

- **Valores Observados de Recuperación:** Estos son los valores que se han obtenido directamente de los experimentos realizados. Si existen, se incluirán en la tabla.
- **Valor Predicho de Recuperación:** Este es el valor de Recuperación que se ha estimado utilizando el modelo ajustado. Este valor se basa en los factores experimentales y puede variar dependiendo de estos.
- **Intervalos de Confianza del 95.0% para la Respuesta Media:** Estos intervalos representan el rango dentro del cual se espera que caiga la verdadera respuesta media con un 95.0% de confianza.

Cada fila de la tabla corresponde a un conjunto específico de valores para los factores experimentales. Estos factores son variables que pueden influir en el resultado de la Recuperación y se han obtenido de su archivo de datos.

Para generar pronósticos para combinaciones adicionales de los factores experimentales, puede agregar filas adicionales al final de su archivo de datos. En cada nueva fila, debe introducir los valores correspondientes para los factores experimentales. Sin embargo, la celda correspondiente a la respuesta debe dejarse vacía.

Una vez que regrese a esta ventana después de haber agregado las nuevas filas, encontrará que se han generado pronósticos adicionales en la tabla para estas

nuevas filas. Es importante mencionar que estos pronósticos adicionales no afectarán de ninguna manera el modelo ajustado originalmente. El modelo permanecerá constante y solo se utilizará para generar estos nuevos pronósticos.

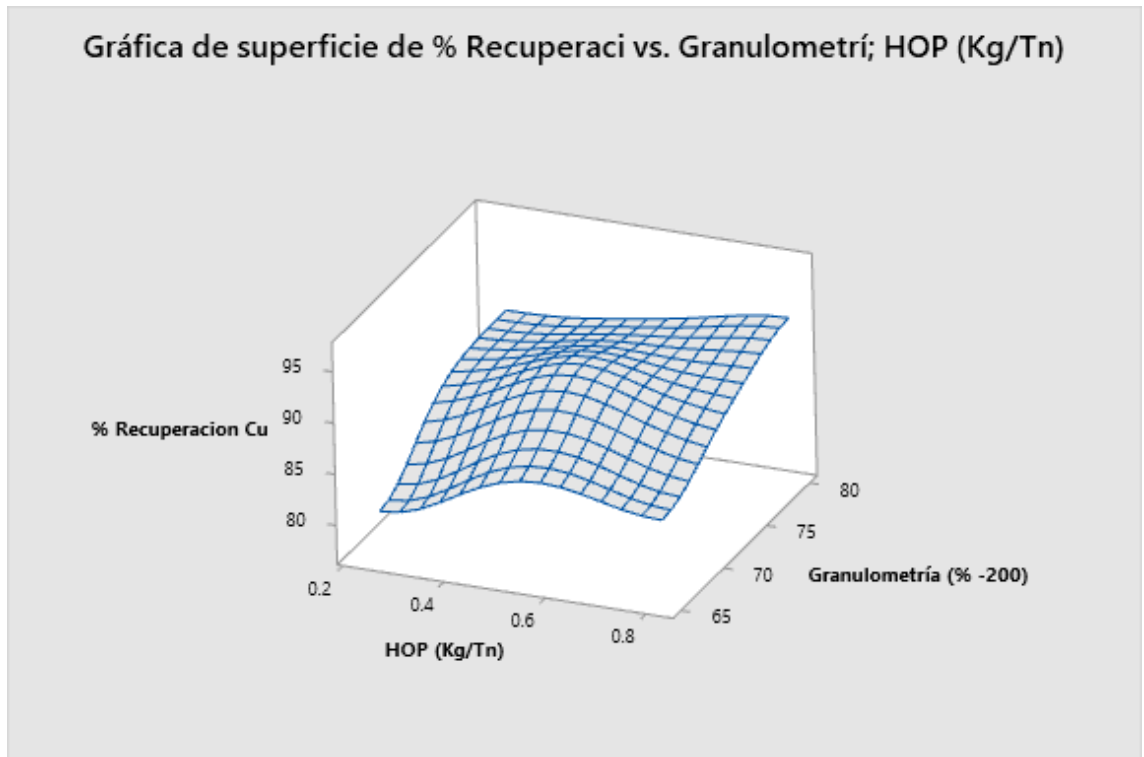


Figura 36. Gráfica de superficie de % Recuperación vs. Granulometría; HOP (Kg/Tn).

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica de superficie de % Recuperaci vs. Tiempo Flot ; HOP (Kg/Tn)

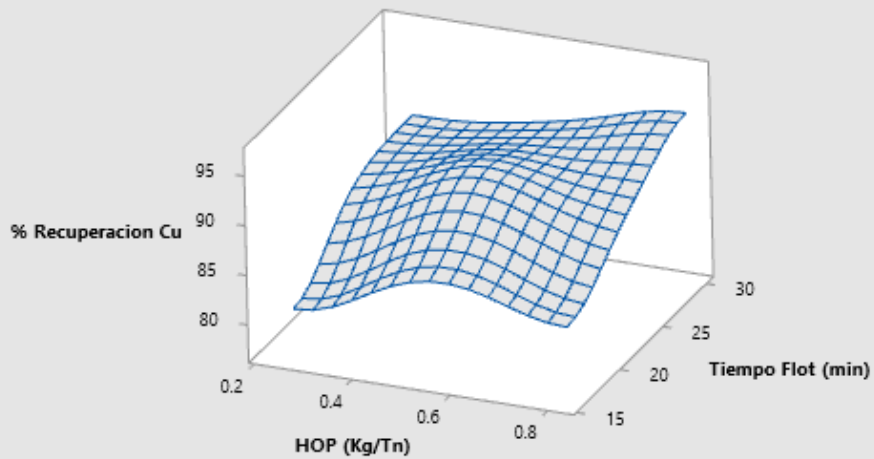


Figura 37. Gráfica de superficie de % Recuperación vs. Tiempo Flotación; HOP (Kg/Tn).

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica de superficie de % Recuperaci vs. Tiempo Flot ; Granulometrí

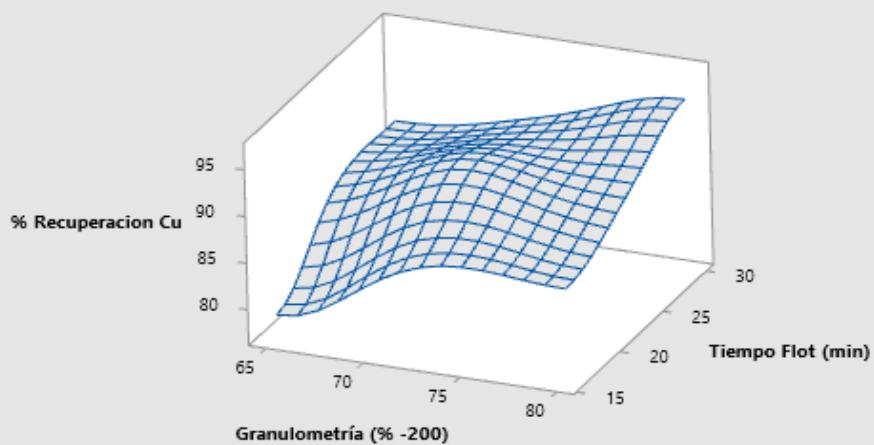


Figura 38. Gráfica de superficie de % Recuperación vs. Tiempo Flotación; Granulometría.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7 Camino de máximo ascenso para porcentaje de recuperación

Tabla 47

Máximo ascenso.

Colector (g/Tn)	Granulometría (%)	tiempo de flotación (min)	Predicción para Recuperación (%)
0.260	80	30	91.890
0.820	65	30	89.530
0.820	80	16	87.330
0.260	65	30	85.090
0.260	80	16	84.830
0.820	65	16	79.910

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 47 que está observando actualmente muestra el camino de máximo ascenso (o descenso), que es un concepto clave en el análisis de experimentos. Este camino representa la ruta, comenzando desde el centro de la región experimental actual, a lo largo de la cual la respuesta estimada experimenta el cambio más rápido con el menor cambio en los factores experimentales.

Este camino es especialmente útil ya que indica las ubicaciones más prometedoras para realizar experimentos adicionales si su objetivo es aumentar o disminuir la Recuperación. En otras palabras, le proporciona una guía sobre dónde podría obtener los resultados más significativos con el menor esfuerzo.

Hasta ahora, se han generado 6 puntos en este camino cambiando el Colector HOP en incrementos de 0.005 g/Tn. Este es solo uno de los muchos factores que podrían afectar la Recuperación y se puede ajustar para explorar diferentes resultados.

Si desea especificar la cantidad de cambio en cualquiera de los factores, puede hacerlo fácilmente presionando el botón secundario del ratón y seleccionando Opciones de Ventana. Una vez que haya hecho esto, MINITAB 19

calculará cuánto tendrán que cambiar los otros factores para mantenerse en el camino de máximo ascenso. Esto le permite explorar una variedad de escenarios sin desviarse del camino óptimo.

Además, el programa también calcula la Recuperación estimada en cada uno de los puntos a lo largo del camino. Esto le permite comparar los resultados teóricos con los resultados reales si decide realizar los experimentos sugeridos. De esta manera, puede validar el modelo y ajustarlo según sea necesario para futuros experimentos.

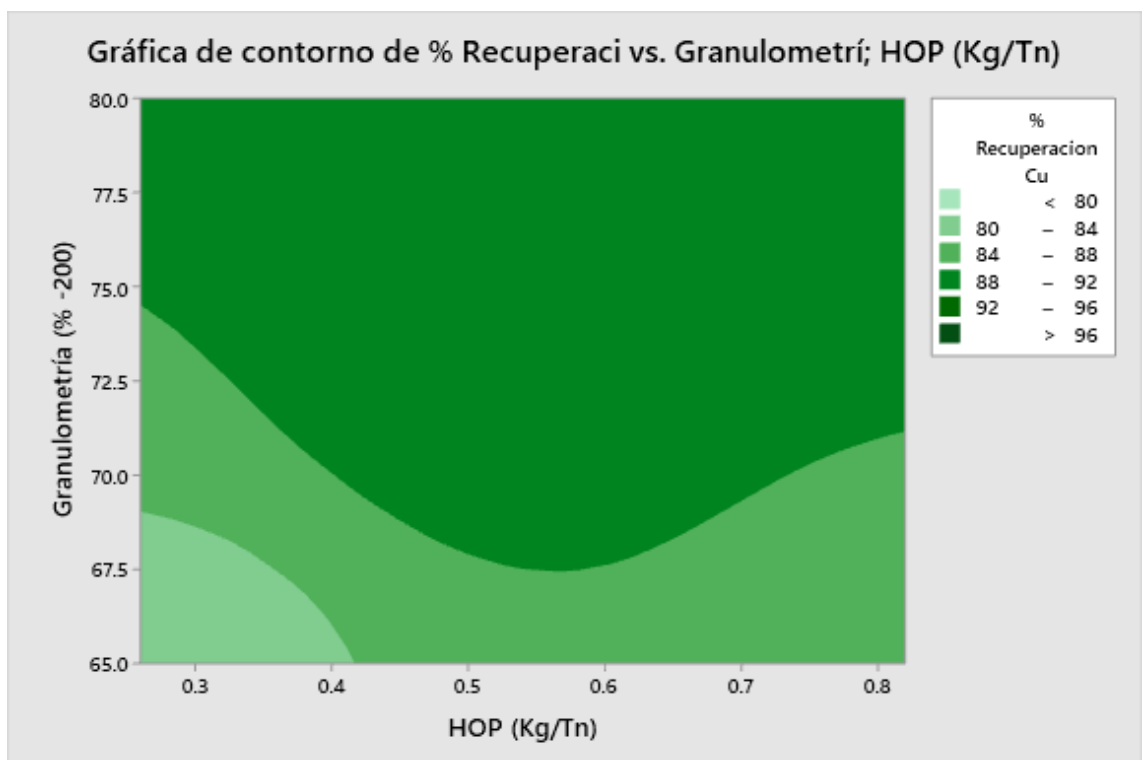


Figura 39. Gráfica de contorno de % Recuperación vs. Granulometría; HOP (Kg/Tn).

Fuente: Elaboración propia.

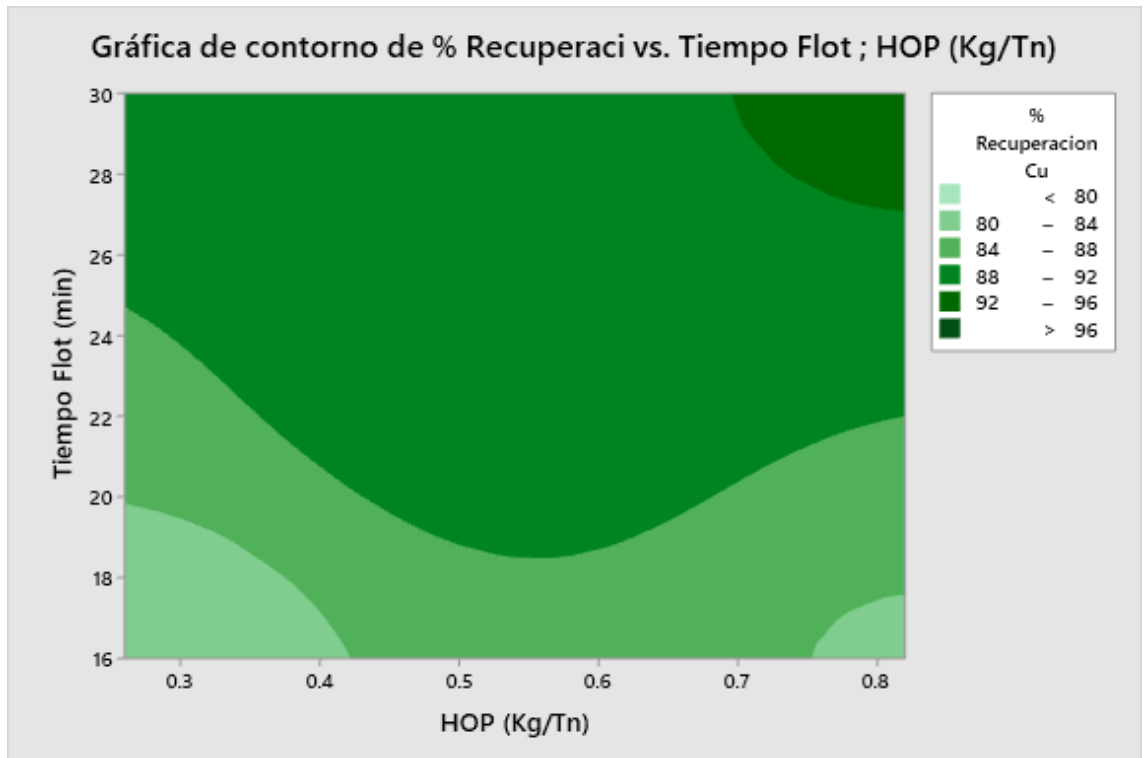


Figura 40. Gráfica de contorno de % Recuperación vs. Tiempo Flotación; HOP (Kg/Tn).

Fuente: Elaboración propia.

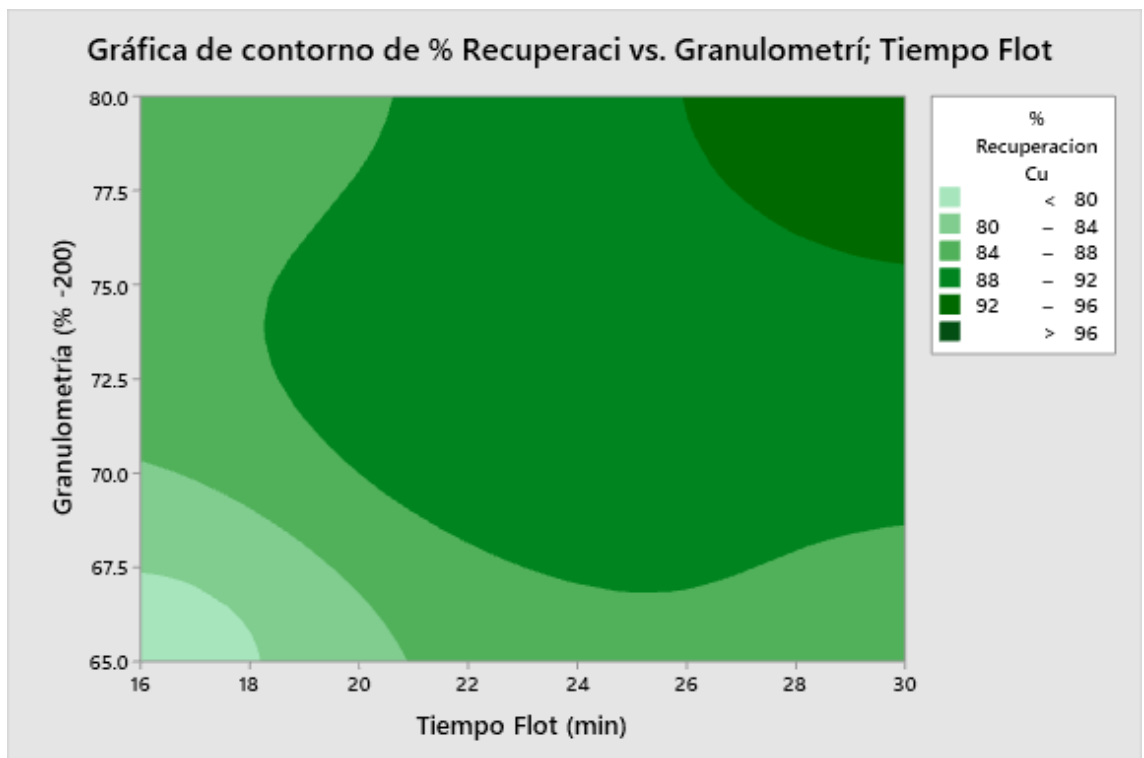


Figura 41. Gráfica de contorno de % Recuperación vs. Granulometría; Tiempo Flotación.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.8 Optimizar respuesta

Meta: maximizar Recuperación

Valor óptimo = 91.89

Tabla 48

Rango de Valores.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Hidroxamato HOP (kg/Tn)	0.26	0.82	0.26
Granulometría (% -200)	65	80	80
Tiempo de Flotación (min)	16	30	30

Fuente: Elaboración propia

La tabla que está observando presenta una combinación óptima de los niveles de los factores que maximizan la Recuperación dentro de una región específica. Esta combinación es el resultado de un análisis cuidadoso y detallado de los datos disponibles y representa la mejor opción para maximizar la Recuperación.

Para especificar la región en la que desea optimizar, puede utilizar el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana. Este cuadro de diálogo le permite definir la región de interés de manera precisa, asegurando que la optimización se realice exactamente donde usted lo necesita.

Además, tiene la opción de establecer el valor de uno o más factores a una constante. Esto se puede hacer estableciendo los límites superior e inferior en ese valor específico. Esta característica le permite tener un control más preciso sobre los factores experimentales y cómo estos influyen en la Recuperación.



V. CONCLUSIONES

- Los experimentos de recuperación de cobre utilizando Hidroxamato Octílico de Potasio (HOP) en la flotación de minerales mixtos de cobre, demostraron que se puede alcanzar una recuperación máxima del 96.66 %. Esto se logra cuando se trabaja con una concentración de HOP de 0.82 kg/ton, una granulometría del 80 % a #-200 y un tiempo de flotación de 30 minutos.
- Las pruebas de flotación permitieron determinar que el tiempo de flotación tiene un impacto del 8.445% en la recuperación del cobre, según las técnicas estadísticas, este efecto se observa cuando el tiempo de flotación cambia desde su nivel más bajo (16 minutos) hasta su nivel más alto (30 minutos), esto establece que el tiempo total de flotación en los circuitos Rougher, Scavenger y Cleaner, que es aproximadamente 30 minutos en sus diferentes etapas, es necesario para lograr una recuperación del 96.66%.
- En conclusión, en el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre, se ha determinado que la granulometría tiene un impacto del 7.215% en la recuperación del cobre, de acuerdo con las técnicas estadísticas. Este impacto se nota cuando la granulometría cambia desde su nivel más bajo (65 % #-200) hasta su nivel más alto (80 % #-200), es crucial que la granulometría se mantenga en un promedio de 80 % #-200 para alcanzar una recuperación del 96.66%.



VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que la empresa minera SILVER MINSPERU S.A.C.-Puno implemente reglamentos internos de seguridad y salud, así como un sistema de gestión ambiental. Estos deben estar en conformidad con el nuevo Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería DS 024-2016-EM y su modificatoria D.S. N° 023-2017-EM. La adhesión a estos reglamentos garantizará un entorno de trabajo seguro y saludable para los empleados, al tiempo que minimizará el impacto ambiental de las operaciones mineras.
- Se recomienda que el Over del clasificador helicoidal, que alimenta a la celda de flotación, se mantenga en un rango de 1270 -1280 g/L de pulpa. Este rango específico ayuda a mantener la eficiencia del proceso de flotación y a optimizar la recuperación del cobre.
- Se recomienda que la cantidad de mineral alimentado al molino primario sea exactamente de 3 kg/pie. Este volumen preciso permitirá obtener el tamaño de partícula óptimo necesario para realizar una flotación eficaz y maximizar la recuperación del cobre.
- Antes de pasar a una etapa industrial en la Planta Concentradora, se recomienda realizar pruebas preliminares. Estas pruebas permitirán comprender mejor el comportamiento del mineral durante todo el proceso de flotación. Con esta información, se pueden hacer ajustes necesarios para maximizar la recuperación del cobre y asegurar resultados óptimos. Estas pruebas también pueden ayudar a identificar y mitigar posibles problemas antes de que ocurran en la producción a gran escala.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, S. (1963). Flotación de minerales. *Universidad de Concepción-Instituto de Investigación Chile*.
- Arias Ccaso, B. S. (2018). *Estudio de investigación para la flotación de óxidos de cobre*.
- Assis, S. M., Montenegro, L. C. M., & Peres, A. E. C. (2000). Utilisation of hydroxamates in minerals froth flotation. *Minerals Engineering*, 9(1), 103–114. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875\(95\)00134-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875(95)00134-4)
- Astucuri, V. (1994). *Introducción a la flotación de minerales*.
- Azañero Ortiz, Á. (2010). Curso de concentración y flotación de minerales. *EAP ING. METALURGICA, UNMSM, LIMA, PERU-2010*.
- Bulatovic, S. M. (2010). *Handbook of flotation reagents flotation: chemistry, theory and practice, flotation of gold and oxide minerals*. Elsevier Science.
- Cajahuanca, S., & Polmarthan, H. (2018). *Evaluación de la recuperación de cobre por flotación de minerales del yacimiento Caolín-2017*.
- Campusano, L. V., Petkovic, Z., & Rajevic, I. (2017). Estudio de reactivo inhibidor - colector para minerales de cobre. *HOLOS*, 8, 70–76. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.5126>
- Chambi Huanca, L. M. (2020). *Optimización del proceso de flotación para mejorar la recuperación de minerales mixtos de cobre en la planta concentradora de la Empresa-Minera CIEMSA-Unidad El Cofre-Paratía-Puno*.
- Cuti Taquima, R. A., & Lupo Olivo, J. B. (2019). *Mejoramiento de la recuperación de cobre en el proceso de flotación de minerales sulfurados con presencia de óxidos, adicionando NaSH en la planta de la Empresa Minera Tintaya*.
- Dudenkov, S. V., Chubor, L. Y., & Glazunov, L. A. (1980). *Fundamentos de la teoría y la práctica de empleo de reactivos de flotación*. Mir.
- Farfan Chicca, N. P., & Huaracallo Choque, C. S. (2019). *Optimización del proceso de concentración por flotación de sulfuros de plomo con presencia de óxidos de plomo, utilizando la sulfurización en la concentradora de la minera bateas*.



- Feng, Q., Yang, W., Wen, S., Wang, H., Zhao, W., & Han, G. (2022). Flotation of copper oxide minerals: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(6), 1351–1364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.09.011>
- Gonzales Guevara, D. (2018). *Implementación de una unidad de flotación rápida en la descarga del molino de bolas secundario en la Empresa Minera Silver Minsperu SAC*.
- Gutierrez Carpio, E. S., & Huaman Calderon, C. A. (2023). *Recuperación de minerales oxidados de cobre por sulfidización, a partir de las colas provenientes de la flotación de sulfuros de cobre en la planta de beneficio La Azulita SAC-Nazca (Investigación Tecnológica)*.
- Juan, C. A., & Luis, C. A. (1998). Operaciones unitarias en procesamiento de minerales. *UNI Lima*.
- Lee, J. S., Nagaraj, D. R., & Coe, J. E. (1998). Practical aspects of oxide copper recovery with alkyl hydroxamates. *Minerals Engineering*, 11(10), 929–939. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00080-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00080-6)
- Lee, K., Archibald, D., McLean, J., & Reuter, M. A. (2009). Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors. *Minerals Engineering*, 22(4), 395–401.
- Lee, K., Sheldon, G., Bygrave, J., & Mann, L. (2007). The application of Ausmelt's AM28 alkyl hydroxamate flotation reagent to Fox Resources' West Whundo copper ore at Radio Hill Western Australia. *Ninth Mill Operators' Conference Proceedings*, 51–54.
- Lupo Canahuire, W., & Utani Poma, W. (2014). *Recuperación del cobre por flotación de los minerales sulfurados del yacimiento Sulfubamba-Apurímac*.
- Mamani Ccapa, J. J. (2019). *Optimización de la flotación ultrafina con celdas columna para mejorar la recuperación de estaño a nivel laboratorio en la unidad minera San Rafael, Antauta-región Puno*.
- Marion, C., Jordens, A., Li, R., Rudolph, M., & Waters, K. E. (2017). An evaluation of hydroxamate collectors for malachite flotation. *Separation and Purification*



- Technology*, 183, 258–269.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.056>
- Méndez Muñoz, E. G. (2009). *Flotación Selectiva de Enargita desde un Concentrado Final de Sulfuros de Cobre de Collahuasi*.
- Moimane, T., Huai, Y., & Peng, Y. (2021). Evaluating the sulphidisation and flotation of oxidised chalcopyrite. *Minerals Engineering*, 164, 106816.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106816>
- Moimane, T., Plackowski, C., & Peng, Y. (2020). The critical degree of mineral surface oxidation in copper sulphide flotation. *Minerals Engineering*, 145, 106075.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106075>
- Morelly Osorio, C. M. (2022). *Optimización del diseño en planta de la recuperación de óxidos de cobre por medio de flotación espumante*.
- Muñiz Delgado, J. (2010). *Flotación de Minerales* (UNSA Arequipa).
- Nagaraj, D. R. (1992). *Process for improved precious metals recovery from ores with the use of alkylhydroxamate collectors*. Google Patents.
- Napier-Munn, T. (2005). *Mineral Processing Technology. Preface to 7th Edition*.
- Núñez, I. Q. (1986). Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales. *Cuzco–Setiembre De*.
- Ortiz, A. A., Jara, P. N., Loli, A. F., Delgado, E. L., Salinas, S. F., Salazar, R. O., Ríos, M. C., Reyes, R. B., & Aragón, S. Y. C. (2002). Flotación de minerales oxidados de plomo. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 5(10), 34–43.
- Ortiz, Á. A., & Valencia, M. M. (1999). Evaluación de reactivos de flotación. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 2(4), 77–94.
- Quispe Navarro, J. A. (2017). *Estudio de la flotación de cobre de la veta Carmen de la Mina San Rafael para mejorar su recuperación*.
- Ramos Huanca, C. M., & Choque Arenaza, P. F. (2020). *Estudio comparativo de espumantes F501, Af68, H508 aplicados al proceso de flotación de minerales*



sulfurados, para la optimización de la recuperación de cobre, en la planta concentradora Antapaccay.

Rodrigo Salas Colque, & Jordan Pocco Oquendo. (2018). Recuperación de cobre por el proceso de flotación de los minerales sulfurados del yacimiento Katanga. *Universidad Nacional de San Antonio Abad Del Cusco*. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/3462>

Suli, L. M., Wan Ibrahim, W. H., Abdul Aziz, B., Deraman, M. R., & Ismail, N. A. (2017). A Review of Rare Earth Mineral Processing Technology. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 19.

Taco Chavez, F. L. (2022). *Estudio de la flotación de minerales oxidados de cobre mediante pruebas experimentales a nivel de laboratorio.*

Turpo Cahuana, Y. R. (2019). *Estudio técnico económico para incrementar la producción de la planta concentradora de minerales San Carlos-provincia de Lampa-región Puno.*

Vilca Casazuela, H. H. (2019). *Evaluación de la flotación de óxidos de cobre mediante pruebas de reactivos en laboratorio.*

Wills, B. A., & Finch, J. (2015). *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann.

Xia, L., Hart, B., Chelgani, S. C., & Douglas, K. (2014). Hydroxamate collectors for rare earth minerals flotation. *Conference of Metallurgists Proceedings*.

Xia, L., Hart, B., Douglas, K., & Zhong, H. (2015). Two new structures of hydroxamate collectors and their application to ilmenite and wolframite flotation. *Proceedings of the 47th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, 185–193.

Xiong, F., Li, Y. J., Zhang, Z. H., & Lan, Y. Z. (2013a). Flotation of low-grade Dongchuan copper oxide ores with xanthate and Hydroxamate collectors. *Advanced Materials Research*, 803, 137–141.

Xiong, F., Li, Y. J., Zhang, Z. H., & Lan, Y. Z. (2013b). Flotation Response of the Refractory Yangla Copper Oxide Ores with Hydroxamate Collectors. *Advanced Materials Research*, 803, 131–136.



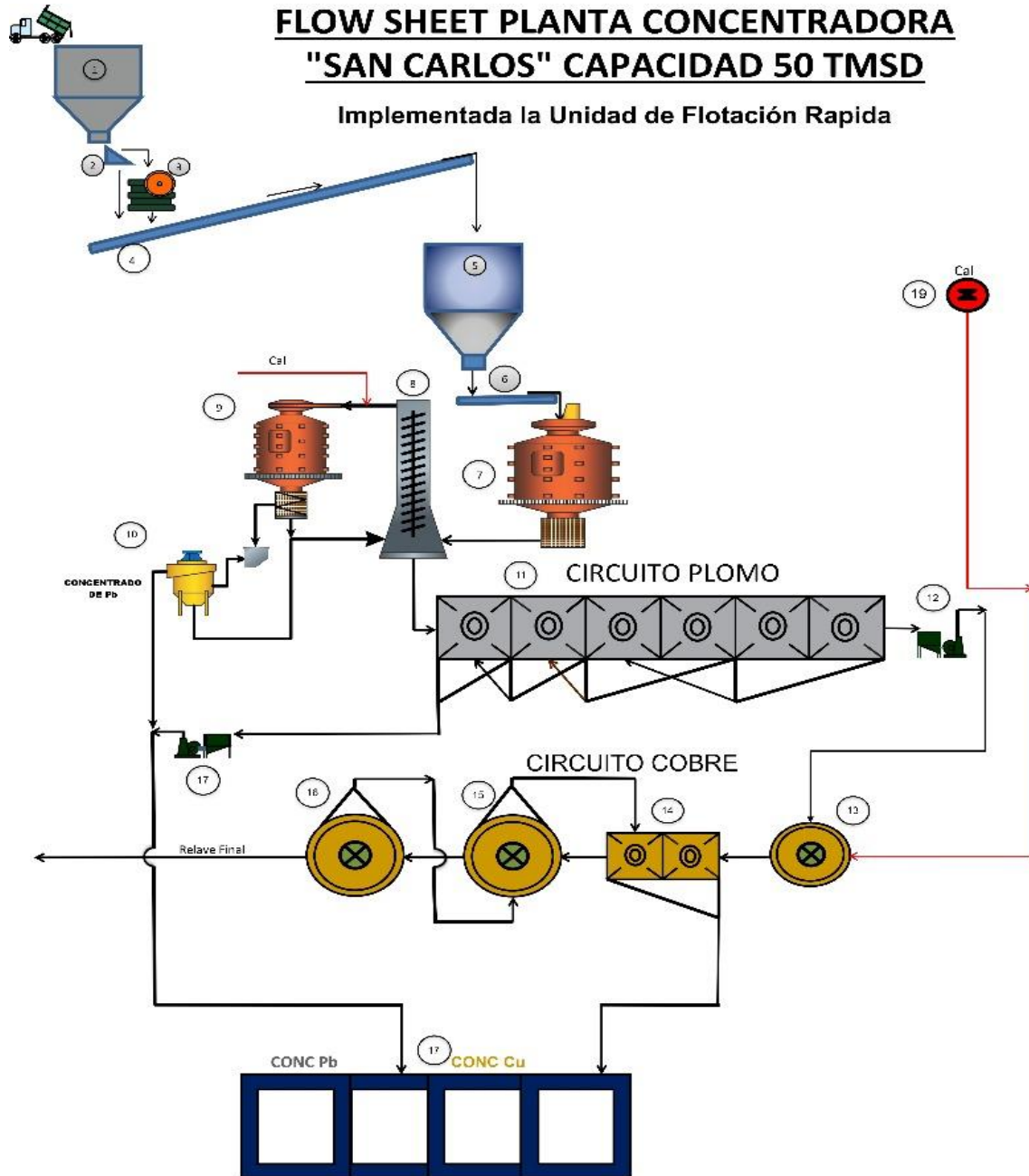
Xu, S., Zanin, M., Skinner, W., & Brito e Abreu, S. (2022). Influence of grinding conditions on the pulp chemistry and flotation of oxidised pyrite. *Minerals Engineering*, 177, 107385.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107385>



ANEXOS

FLOW SHEET PLANTA CONCENTRADORA "SAN CARLOS" CAPACIDAD 50 TMSD

Implementada la Unidad de Flotación Rapida



LEYENDA

N°	DESCRIPCION	HP	Kw	G.E.
1	Tolva de Gruesos: Capacidad 50 TM	-		
2	Parrilla Estatica			
3	Chancadora de Quijadas: 9' x 12"	20		Grupo Elect de 220 Kw
4	Faja Transportadora N° 01	5		
5	Tolva de Finos: Capacidad 50 TM		114	
6	Faja Transportadora N° 02:	5		
7	Molino de Bolas Comesa: 4 Ø' x 4'	60		
8	Clasificador Helicoidal: 1.5' Ø x 16'	5		
9	Molino de Bolas Comesa: 3 Ø' x 4'	60		
10	Celda Unitaria 32"x32"	10		Grupo Elect de 130 Kw
11	Banco 06 Celdas Denver 32" x 32"	45		
12	Bomba Horizontal: 2 3/8" x 2" N° 01	10		
13	Acondicionador: 3' Ø x 4'	3		
14	Banco 02 Celdas Denver 32" x 32"	15		
15	01 Celda Circular: 5' Ø x 5' N° 01	10		
16	01 Celda Circular: 5' Ø x 5' N° 02	10		
17	Bomba Horizontal: 2 3/8" x 2" N° 02	10		
18	Cochas de Concentrados (BOMBA DE AGUA)	15		
19	Acondicionador: 3' Ø x 4' (lechada de cal)	3		



Cancha de gruesos, minerales procedentes de la mina San Carlos.



Tolva de gruesos del circuito de Chancado de la Planta San Carlos.



Chancadora de quijadas (9" x 12") del circuito de Chancado de Planta San Carlos.



Faja transportadora N° 1 del circuito de Chancado de Planta San Carlos.



Se observa la tolva de finos y la faja N° 2 del Circuito de Molienda de la Planta San Carlos.



Molino COMESA 4' * 4' Circuito de Molienda de la Planta San Carlos.



Clasificador Helicoidal 16 * 15 del Circuito de Molienda de la Planta San Carlos.



Cochas de concentrado de la Planta San Carlos.



Relavera de la Planta San Carlos.



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

Por el presente documento, Yo EMERSON DANILO MOLINA TACCA
, identificado con DNI 70146989 en mi condición de egresado de:

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

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"FLOTACION CON HIDROXAMATO EN MINERALES MIXTOS DE COBRE PARA MEJORAR LA RECUPERACION DE CONCENTRADOS DE COBRE EN LA EMPRESA MINERA SILVERMIN PERUSAC-PUNO"

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

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

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

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

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

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

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 14 de Agosto del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Emerson Danilo Molina Tacca
identificado con DNI 70146989 en mi condición de egresado de:

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

Ingeniería Metalúrgica

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

"FLOTACION CON HIDROXAMATO EN MINERALES MIXTOS DE COBRE
PARA MEJORAR LA RECUPERACION DE CONCENTRADOS DE COBRE EN LA EMPRESA
" Es un tema original. MINERA SILVER MINSPERU S.A.C. - PUNO


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

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

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

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

Puno 14 de Agosto del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella