

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



**TESIS**

**"ANÁLISIS DE VARIABLES PARA LA RECUPERACIÓN DEL COBRE POR  
FLOTACIÓN A PARTIR DE MINERALES MIXTOS DEL YACIMIENTO MINERO  
ANCCASILLA, SOL CANDENTE I DISTRITO DE CHIARA – ANDAHUAYLAS – 2023"**  
**INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA**

**PRESENTADO POR:**

Br. LUZ KATHERINE MARCAÑAUPA PACORI  
Br. YENCE WILSON TOLEDO PUCA

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

**ASESOR:**

Mgt. PORFIRIO CARRASCO TAPIA

**CUSCO - PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: "ANÁLISIS DE VARIABLES PARA LA RECUPERACIÓN DEL COBRE POR FLOTACION A PARTIR DE MINERALES MIXTOS DEL YACIMIENTO MINERO ANCEASILLA, SOL CARENTE I DISTRITO DE CHIARA - ANDAHUAYLAS - 2023" INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

presentado por: YENCE WILSON TOLEDO PUCO con DNI Nro.: 70686403 presentado por: LUZ KATHERINE MARCAÑANDA PACORI con DNI Nro.: 75811985 para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9%.

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

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 18 de OCTUBRE de 2024



Firma

Post firma Rosalva Carrasco Tapia

Nro. de DNI 24002881

ORCID del Asesor 0000-0002-4360-9866

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:394122377

NOMBRE DEL TRABAJO

**Análisis de variables para la recuperación de cobre por flotación.pdf**

AUTOR

**Yenso W. Toledo P y Luz K. Mar**

RECUENTO DE PALABRAS

**27435 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**154183 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**172 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**5.2MB**

FECHA DE ENTREGA

**Oct 17, 2024 9:35 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Oct 17, 2024 9:37 PM GMT-5****● 9% de similitud general**

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

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% 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 19 palabras)

## **PRESENTACIÓN**

**SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA,  
MINAS Y METALÚRGICA, SEÑORES CATEDRÁTICOS MIEMBROS DEL  
JURADO:**

De acuerdo al Reglamento de Grados y títulos para Optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra consideración el presente trabajo e investigación intitulada:

**“ANÁLISIS DE VARIABLES PARA LA RECUPERACIÓN DEL COBRE POR  
FLOTACIÓN A PARTIR DE MINERALES MIXTOS DEL YACIMIENTO MINERO  
ANCCASILLA, SOL CANDENTE I DISTRITO DE CHIARA - ANDAHUAYLAS -  
2023”**

**(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

El trabajo de investigación se realizó a nivel de laboratorio mediante el proceso de flotación por espumas, en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC. Se logró obtener una adecuada recuperación y el grado óptimo de concentrado del mineral sulfurado de Cobre del yacimiento minero ANCCASILLA, SOL CANDENTE I de la provincia de Andahuaylas.

**Los graduandos**

## **DEDICATORIA**

Agradezco a Dios, por permitirme la oportunidad de vivir y llegar a esta instancia, por tomar el camino correcto y fortalecer mi espíritu día a día. Mi reconocimiento total con mucho cariño y amor a mis padres Teodosio Toledo Gutiérrez y Bacilia Puca Limachi, a mis queridos hermanos Celso, Fany, Wilmar, Erika, Karen y Ángel a quienes agradezco por darme una carrera para mi futuro, por conjeturar en mi fortaleza, por todo su apoyo y el cimiento que supieron brindarme.

A mis docentes por su conocimiento, dedicación y apoyo incondicional en mi vida laboral.

**Yence Wilson Toledo Puca**

A Dios. A mis amados padres Simeón Marcañaupa Curo y Luz Marina Pacori Paucar y adorados hermanos Lucero, Rubí, Piero y Antonela. Por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye, este. Me instituyeron con reglas y con buenos valores y me propiciaron constantemente para lograr mis prometidos.

**Luz Katherine Marcañaupa Pacori**

## RESUMEN

Se realizó la investigación tecnológica experimental que se ha centrado en obtener mayor recuperación del concentrado de cobre mediante el proceso de flotación por espumas de minerales mixtos de cobre. Se corrió las pruebas metalúrgicas en el laboratorio de procesamiento de minerales de la UNSAAC utilizando el mineral del yacimiento Ancasilla Sol Candente I, con una composición de 9.40% cobre y 1.49% óxidos. El principal objetivo fue evaluar las variables operativas del proceso de flotación como: granulometría, dosificación de reactivo Z-6 y tiempo de flotación. Se utilizó la malla 200 con una granulometría pasante del 60%, una dosificación del colector Z-6 de 50 g/tn y un tiempo de flotación de 6 minutos y resultados de las pruebas metalúrgicas se obtuvo una recuperación de 89.28% que corresponde a la cuarta prueba. Se concluyó que estas condiciones operativas permiten una recuperación eficiente del cobre en minerales mixtos con las variables más principales como granulometría y dosificación de reactivo Z-6, los minerales a menor granulometría son partículas finas donde son liberados a un tamaño óptimo. El déficit del colector Z-6, no habría quien pegue a las burbujas y cuando es exceso flotan cantidad excesiva de materiales indeseables, a corto tiempo se detiene los minerales en la celda y permanece en las burbujas siendo arrastrados al relave, cuando es mayor tiempo se flotan otros materiales no deseados.

**Palabras clave:** Flotación, recuperación de cobre, minera Ancasilla, minerales mixtos, colector Z-6.

## ABSTRACT

Experimental technological research was carried out focused on obtaining higher copper concentrate recovery through the froth flotation process of mixed copper ores. Metallurgical tests were carried out at the mineral processing laboratory of UNSAAC using ore from the Ancasilla Sol Candente I deposit, with a composition of 9.40% copper and 1.49% oxides. The main objective was to evaluate the operating variables of the flotation process such as: granulometry, Z-6 reagent dosage and flotation time. A 200 mesh was used with a passing granulometry of 60%, a Z-6 collector dosage of 50 g/tn and a flotation time of 6 minutes. The results of the metallurgical tests showed a recovery of 89.28%, which corresponds to the fourth test. It was concluded that these operating conditions allow an efficient recovery of copper in mixed minerals with the most important variables such as granulometry and dosage of Z-6 reagent, the minerals at lower granulometry are fine particles where they are released at an optimum size. The deficit of the Z-6 collector, there would be no one who sticks to the bubbles and when it is excess, excessive amount of undesirable materials float, in short time the minerals are stopped in the cell and remain in the bubbles being dragged to the tailing, when it is longer time other undesirable materials float.

**Keywords:** Flotation, copper recovery, Ancasilla mine, mixed minerals, Z-6 collector

## INDICE

PRESENTACIÓN.....	I
DEDICATORIA.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
INDICE DE TABLAS.....	XV
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XVIII

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.	Situación problemática.....	1
1.2	Formulación de problemas:.....	3
1.2.1.	Problema general.....	3
1.2.2	Problemas específicos: .....	3
1.3.	Justificación.....	3
1.3.1	Justificación de la investigación.....	3
1.3.2	Justificación económica.....	3
1.3.3	Justificación tecnológica: .....	4
1.4	Objetivos de investigación .....	4
1.4.1	Objetivo general .....	4
1.4.2	Objetivos específicos.....	4

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1	Antecedentes de la investigación (estado del arte).....	5
2.1.1	Antecedentes internacionales: .....	5
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	7
2.2	Bases teóricas .....	9
2.2.1	Cobre.....	9
2.2.2	Propiedades físicas y químicas:.....	9
2.2.3	Mineral mixto de cobre .....	9
2.2.4	Granulometría.....	12
2.2.5	Factor granulométrico .....	13
2.2.6	Análisis Granulométrico:.....	14
2.2.7	P80.....	15
2.2.8	Teoría de flotación de minerales mixtos.....	16
	2.2.8.1 Definición de flotación .....	16
	2.2.8.2 Formación y tipo de espuma.....	19
2.2.9	Procesos de flotación de minerales mixtos .....	20
2.2.10	Etapas en el proceso de flotación .....	22
2.2.11	Elementos de flotación .....	23
2.2.12	Elementos tecnológicos del proceso.....	24
2.2.13	Principios de la flotación.....	26
2.2.14	Componentes del Proceso de Flotación.....	27
	2.2.14.1 Componentes químicos .....	27
	2.2.14.2 Componentes de equipo .....	27

2.2.14.3	Componentes operacionales .....	28
2.2.15	Mecanismos de flotación por espumas .....	29
2.2.15.1	Partículas hidrofóbicas e hidrofílicas .....	30
2.2.16	Fuerzas de desprendimiento o separación de las burbujas .....	31
2.2.17	Flotación de óxidos de cobre .....	32
2.2.18	Flotación de sulfuros de cobre.....	33
2.2.19	Raspado de espuma en flotación de mineral mixto .....	34
2.2.20	Reactivos y química en la flotación de minerales mixtos .....	34
2.2.21	Dosificación de reactivos .....	35
2.2.22	Clasificación de reactivos.....	35
2.2.22.1	Espumantes.....	35
2.2.22.2	Colectores .....	37
2.2.22.3	Modificadores:.....	40
2.2.22.4	Depresores .....	40
2.2.22.5	Activadores.....	41
2.2.22.6	Reguladores de pH .....	41
2.2.22.7	Reactivos dispersantes.....	41
2.2.22.8	Sulfidizante (sulfuros) .....	42
2.2.23	Tiempo de flotación.....	42
2.2.24	Cinética de flotación.....	42
2.2.25	Modelos cinéticos de la flotación de minerales.....	43
2.2.25.1	Modelo cinético de García - Zúñiga.....	44
2.2.25.2	Modelo cinético de Klimpel .....	45
2.2.25.3	Modelo cinético de Agar y Barret .....	46
2.2.26	Termodinámica de flotación .....	46

2.2.27	Ángulo de contacto y la ecuación de Young.....	48
2.2.28	Fases en la flotación .....	51
2.2.28.1	Fase líquida.....	52
2.2.28.2	Fase sólida .....	53
2.2.28.3	Fase gaseosa .....	53
2.2.29	Interfases en la flotación.....	53
2.2.29.1	Tensión superficial .....	53
2.2.29.2	Adsorción .....	55
2.2.29.3	Fenómenos eléctricos en la interfase.....	55
2.4	Bases conceptuales (definición de términos básicos) .....	56
2.4.1	Ley.....	56
2.4.2	Pulpa.....	56
2.4.3	Relave.....	56
2.4.4	Calidad.....	56
2.4.5	Concentrado.....	57
2.4.6	Mineral .....	57
2.4.7	Óxido .....	57
2.4.8	Sulfuros.....	57
2.4.9	Mixto .....	57
2.4.10	Dosificación.....	57
2.4.11	Razón De Concentración.....	57

### **CAPÍTULO III**

#### **HIPÓTESIS Y VARIABLES**

3.1	Hipótesis.....	58
3.1.1	Hipótesis general .....	58

3.1.2	Hipótesis específicas .....	58
3.2	Variables de investigación .....	58
3.2.1	Identificación de variables.....	58
3.2.2	Operacionalización de variables.....	60

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

4.1	Ámbito de investigación.....	61
4.2.1	Localización política, geográfica.....	61
4.2	Método de investigación .....	62
4.3	Tipo de investigación .....	62
4.4	Alcance de investigación.....	63
4.5	Diseño de investigación .....	63
4.6	Población de estudio.....	65
4.7	Validez y confiabilidad de instrumentos .....	65
4.8	Plan de análisis de datos.....	65
4.9	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	66
4.10	Metodología seleccionada y aplicada al proceso de flotación .....	66

## **CAPÍTULO V**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

5.1	Muestreo en yacimiento .....	69
5.2	Preparación de la muestra .....	70
5.3	Análisis químico.....	71
5.4	Pruebas de moliendabilidad .....	75
5.4.1	Determinación del tiempo de molienda.....	76

5.5	Análisis granulométrico .....	81
5.5.1	Función matemática de GATES-GAUDIN SCHUHMANN: G-G-S.....	84
5.6	Pruebas de flotación de minerales mixtos de cobre a nivel de laboratorio ....	89
5.6.1	Muestra del mineral.....	90
5.6.2	Rango de variables .....	92
5.6.3	Plantilla de diseño experimental.....	94
5.6.4	Dosificación de reactivos .....	98
5.6.5	Cálculo del consumo del reactivo para pruebas de flotación .....	98
5.6.6	Condiciones operativas para las pruebas de flotación de minerales mixtos .....	100
5.7	Ensayos de flotación de minerales mixtos .....	102
5.8	Evaluación de los coeficientes codificados.....	114

## **CAPÍTULO VI**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

6.1	Diseño factorial para el análisis de resultados mediante el software de Minitab 20.....	121
6.2	Coeficientes codificados para el modelo matemático .....	128
6.2.1	Modelo matemático de correlación para la optimización de recuperación de Cu % del proceso .....	130
6.2.2	Optimización de respuesta de la recuperación de Cu%.....	131
6.3	Análisis de los efectos principales de cada variable en la recuperación .....	133
6.4	Análisis de los efectos de las interacciones en la recuperación .....	134
6.5	Gráfico de superficie y contornos de respuesta.....	136

CONCLUSIONES.....	142
RECOMENDACIONES.....	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
ANEXOS.....	150

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Mineral mixto de cobre .....	10
<b>Figura 2</b> Recuperación vs tamaño de partículas .....	12
<b>Figura 3</b> Tamaño de las partículas en micrones, recuperación de minerales en función de su tamaño granular .....	13
<b>Figura 4</b> Serie de tamices.....	15
<b>Figura 5</b> Fases del proceso de flotación.....	17
<b>Figura 6</b> Principio de la separación por flotación .....	19
<b>Figura 7</b> Tipos de estructuras en una espuma de flotación .....	20
<b>Figura 8</b> Principio fundamental de la flotación .....	22
<b>Figura 9</b> Partículas en la flotación .....	24
<b>Figura 10</b> Corte transversal de una celda de flotación.....	25
<b>Figura 11</b> Flotación de partículas hidrófobas .....	27
<b>Figura 12</b> Componentes del proceso de flotación.....	28
<b>Figura 13</b> Esquema que muestra a las partículas hidrofóbicas e hidrofílicas .....	29
<b>Figura 14</b> Partículas hidrofóbicos e hidrofílicos.....	31
<b>Figura 15</b> Fuerzas de separación partícula-burbuja y comportamientos de las partículas en la espuma.....	32
<b>Figura 16</b> Raspado de espumas de la celda de flotación.....	34
<b>Figura 17</b> Molécula de espumante y adhesión de espumante.....	37
<b>Figura 18</b> Grupo funcional en la superficie de la partícula.....	39
<b>Figura 19</b> Adhesión del colector a la superficie del mineral .....	39
<b>Figura 20</b> Determinación del valor K .....	45
<b>Figura 21</b> Tensión sólido gas, $\gamma_{GS}$ – Tensión liquido gas, $\gamma_{GL}$ , - Tensión Sólido liquido $\gamma_{SL}$ .....	48

<b>Figura 22</b> Sistema sólido-liquido-gas .....	49
<b>Figura 23</b> Zona hidrofóbica e hidrofílica en celda de flotación.....	52
<b>Figura 24</b> Tensión superficial .....	54
<b>Figura 25</b> Representación esquemática de la doble capa eléctrica .....	56
<b>Figura 26</b> Mapa de Andahuaylas - Apurímac .....	62
<b>Figura 27</b> Determinación de la gravedad específica.....	73
<b>Figura 28</b> Prueba de molienda .....	76
<b>Figura 29</b> Curva de moliendabilidad .....	77
<b>Figura 30</b> Grafica de valores individuales de Recuperación vs Granulometría .....	80
<b>Figura 31</b> Gráfica de cajas de recuperación.....	80
<b>Figura 32</b> Análisis granulométrico .....	82
<b>Figura 33</b> Distribución granulométrica.....	83
<b>Figura 34</b> Distribución granulométrica de GATES GAUDIN SCHUHMANN.....	86
<b>Figura 35</b> Gráfica de cálculo P80 de GATES GAUDIN SCHUHMANN .....	88
<b>Figura 36</b> Máquina de flotación para las pruebas metalúrgicas.....	90
<b>Figura 37</b> Diagrama de flujo de flotación.....	91
<b>Figura 38</b> Máquina de flotación Denver .....	92
<b>Figura 39</b> Rango de variables .....	94
<b>Figura 40</b> Preparación de pulpa y acondicionamiento.....	97
<b>Figura 41</b> Dosificación de reactivos .....	98
<b>Figura 42</b> Pruebas y resultados de flotación .....	102
<b>Figura 43</b> Valores individuales de recuperación vs dosificación .....	116
<b>Figura 44</b> Gráfica de cajas de recuperación con dosificación .....	117
<b>Figura 45</b> Gráfica de valores individuales de recuperación con tiempo.....	119
<b>Figura 46</b> Gráfica de cajas de recuperación con tiempo.....	120

<b>Figura 47</b> Matriz de diseño para las pruebas experimentales y el análisis de las respuestas de acuerdo al diseño factorial $2^3$ .....	121
<b>Figura 48</b> Resultados del análisis de diseño factorial en efectos estandarizados .....	122
<b>Figura 49</b> Diagrama de Pareto de los efectos .....	124
<b>Figura 50</b> Gráfica de residuos para porcentaje de recuperación.....	126
<b>Figura 51</b> Gráfica de optimización de recuperación de cobre, según el modelo matemático .....	132
<b>Figura 52</b> Gráfica de efectos principales para recuperación de Cu % .....	133
<b>Figura 53</b> Gráfica de interacción para recuperación de Cu % .....	135
<b>Figura 54</b> Gráfica de superficie de recuperación vs variables independientes .....	136
<b>Figura 55</b> Gráfica de superficies para la recuperación de Cu % .....	137
<b>Figura 56</b> Gráfica de contorno de recuperación vs variable independientes .....	138
<b>Figura 57</b> Gráfica de contorno granulometría vs dosificación de reactivos para la recuperación de Cu .....	139
<b>Figura 58</b> Gráfica de cubos (medias ajustadas) de recuperación de Cu % .....	140

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Clasificación de los minerales de cobre.....	11
<b>Tabla 2:</b> Operacionalización de variables.....	60
<b>Tabla 3</b> Análisis químico .....	72
<b>Tabla 4</b> Cálculo de peso específico.....	74
<b>Tabla 5</b> Resultados de la gravedad específica.....	74
<b>Tabla 6</b> Resumen de tiempo de molienda .....	77
<b>Tabla 7</b> Resultados de tiempo de molienda .....	78
<b>Tabla 8</b> Análisis de varianza de granulometría.....	79
<b>Tabla 9</b> Resumen del modelo y media de granulometría.....	79
<b>Tabla 10</b> Distribución granulométrica .....	83
<b>Tabla 11</b> Cálculos con la función de GATES GAUDIN SCHUHMANN .....	85
<b>Tabla 12</b> Rango de variables.....	93
<b>Tabla 13</b> Plantilla de diseño experimental codificada y real .....	95
<b>Tabla 14</b> Preparación de pulpas .....	97
<b>Tabla 15</b> Datos para el cálculo de consumo de reactivos en g/tn .....	98
<b>Tabla 16</b> Tiempos de molienda.....	100
<b>Tabla 17</b> Condiciones de flotación.....	100
<b>Tabla 18</b> Condiciones operativas para flotación N° 1 .....	103
<b>Tabla 19</b> Condiciones operativas para flotación N° 2 .....	104
<b>Tabla 20</b> Condiciones operativas para flotación N° 3 .....	105
<b>Tabla 21</b> Condiciones operativas para flotación N° 4 .....	106
<b>Tabla 22</b> Condiciones operativas para flotación N° 5 .....	107
<b>Tabla 23</b> Condiciones operativas para flotación N° 6 .....	108
<b>Tabla 24</b> Condiciones operativas para flotación N° 7 .....	109

<b>Tabla 25</b> Condiciones operativas para flotación N° 8 .....	110
<b>Tabla 26</b> Condiciones operativas para flotación N° 9 .....	111
<b>Tabla 27</b> Condiciones operativas para flotación N° 10 .....	112
<b>Tabla 28</b> Condiciones operativas para flotación N° 11 .....	113
<b>Tabla 29</b> Resultados de las pruebas experimentales y su análisis.....	114
<b>Tabla 30</b> Análisis de varianza de dosificación.....	115
<b>Tabla 31</b> Resumen del modelo de dosificación .....	115
<b>Tabla 32</b> Pruebas simultáneas para diferencias de las medias .....	115
<b>Tabla 33</b> Análisis de varianza del tiempo .....	117
<b>Tabla 34</b> Resumen del modelo de tiempo.....	118
<b>Tabla 35</b> Pruebas simultáneas para diferencias de las medias .....	118
<b>Tabla 36</b> Tabla de valores residuos.....	125
<b>Tabla 37</b> Coeficientes codificados .....	128
<b>Tabla 38</b> Análisis de varianza predeterminado (ANOVA).....	129
<b>Tabla 39</b> Resumen del modelo de análisis de varianza.....	130
<b>Tabla 40</b> Parámetros de la respuesta .....	131
<b>Tabla 41</b> Solución de la optimización.....	131
<b>Tabla 42</b> Predicción de la respuesta múltiple.....	132

## SIGLAS Y ABREVIATURAS

AP-3418	Aerophine 3418
AR-404	Aeropromoter 404
ASTM	American Society for Testing and materials
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
CN	Cianuro
Cu	Cobre
Cos $\theta$	Coseno del ángulo $\theta$
D-12	Denver 12
DF-400	Dowfroat 400
PbS	Galena
g	Gramos
Fe	Hierro
K°	Kelvin
m	Metro
$\mu$ m	Micrómetros
mm	Milímetro
Min	Minutos
Ni	Níquel
N°	Número
DO	Oxígeno disuelto
FeS	Pirita
Ag	Plata
%	Porcentaje
Rt	Recuperación estimada
R $\infty$	Recuperación limite a tiempo infinito
rpm	Revoluciones por minuto
NaSH	Sulfuro ácido de sodio
ZnS	Sulfuro de zinc
$\gamma$ GL	Tensión gas liquido
$\gamma$ GS	Tensión gas solido
$\gamma$ SL	Tensión solido liquido
t	Tiempo
tn	Toneladas
w	Watts
Z-6	Zantato amílico de potasio
Zn	Zinc
GE	Gravedad específica
GL	Grado de libertad

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación tecnológica intitulada: **“Análisis de variables para la recuperación del cobre por flotación a partir de minerales mixtos del yacimiento minero Ancasilla, Sol Candente I distrito de Chiara – Andahuaylas - 2023”**, ampliamos el conocimiento y mejoramos el proceso de flotación de minerales en la industria metalúrgica del cobre en el distrito de Chiara. Asimismo, generamos información relevante que pueda ser utilizada por las empresas mineras y los profesionales del sector para tener mejora en la producción de metales preciosos en esta región minera.

Los minerales mixtos de cobre de la zona se transportan y se procesan en una planta concentradora pequeña que presta servicios, sin conocer las variables operativas y características de este tipo de mineral mixto desde años atrás, por esa razón se obtiene baja recuperación durante el proceso de flotación por espumas, razón por la cual se realiza esta investigación tecnológica analizar las variables operacionales del mineral mixto de dicho yacimiento, este estudio se basó para ver la mejora de recuperación obteniendo variables adecuadas a través de flotación por espuma. En este estudio exhaustivo de las variables y características del mineral en el proceso de flotación, hemos logrado aumentar significativamente la recuperación de cobre a partir de los minerales mixtos del yacimiento minero Ancasilla Sol Candente I, distrito de Chiara – Andahuaylas cuyos principales minerales son como: Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Calcosita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) Covelita ( $\text{CuS}$ ), Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), Malaquita ( $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ), Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), entre otros y como la ganga carbonatos, silicatos, cuarzo, etc.

Se ha diseñado adecuadamente todas las secuencias de las pruebas experimentales factoriales teniendo en cuenta: la granulometría, la dosificación del reactivo Z-6 y el tiempo de flotación. Los resultados de las pruebas metalúrgicas permiten encontrar e identificar las variables operativas adecuadas y se logró aumentar la recuperación de cobre por proceso de

flotación a nivel de laboratorio, esto ha permitido una mejor recuperación de cobre de minerales mixtos, optimizando el proceso de flotación, mejoras en el control de las variables operativas, por lo tanto, los mineros artesanos se beneficiarán de mayores recuperaciones y una mayor eficiencia en sus operaciones.

En el primer capítulo se especifica la situación problemática del yacimiento, así como, los objetivos y justificación.

En el capítulo II, se da a conocer la línea base de principios, teorías, leyes concernientes al marco teórico y los antecedentes que nos guían el nivel de nuestra investigación.

Así mismo en el capítulo III, se trata de las hipótesis que nos permitirán conducir la idea del proceso de flotación de acuerdo al proceso.

En el capítulo IV, damos a conocer las técnicas y metodologías para guiar el desarrollo del presente trabajo de investigación, de este modo llegar a buenos resultados.

En el capítulo V, presentamos los resultados obtenidos de la parte experimental efectuado con diferentes pruebas metalúrgicas de la flotación, manipulando variables independientes. Seguidamente estos resultados los presentamos en cuadros diagramas con sus respectivas interpretaciones para su discusión de resultados.

En el capítulo VI, está referido al análisis de las interpretaciones y discusiones de resultados, efectos y normalidad, análisis de varianza, conclusiones y recomendaciones utilizando el software Minitab 20. Por consiguiente, se tiene los anexos que representan las muestras de las evidencias de los ensayos realizadas de este presente trabajo de investigación.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El Perú es un país polimetálico de minerales, rico en extracción de muchos minerales que contiene apreciables cantidades de elementos valiosos como el cobre, oro, plata, entre otros y estos son altamente rentables. Muchas empresas mineras como Las Bambas, Hudbay, Antapaccay Cerro verde, Quellaveco entre otras explotan minerales sulfurados y extraen como producto principal el cobre, mediante el proceso de flotación.

La flotación es un proceso eficiente y uno de los procesos más completos en cuanto se refiere a la concentración de minerales metálicos y no metálicos, el concentrado final obtenido por flotación depende de que el tamaño de las especies posea un grado de liberación adecuado. Si el tamaño de partícula es muy fino, estas no tendrán la suficiente energía para producir el encuentro entre burbuja y partícula, por el contrario, si existe un exceso de tamaño de partícula ocurrirá una deficiencia en la adherencia de la burbuja.

En la zona sur del país, Andahuaylas, se encuentra en su mayoría minerales mixtos de cobre. En la actualidad los mineros del yacimiento Ancasilla Sol Candente I del distrito de Chiara, de la provincia de Andahuaylas, extraen el mineral mixto de cobre, el cual es transportado a la planta de beneficios de minerales "Los Chankas" que se encuentra ubicado en el distrito de José María Arguedas aproximadamente a unos 190 km del yacimiento, donde hacen procesar dicho mineral por el método de flotación, desconociendo las variables operativas que influyen en el proceso de flotación y pagando una determinada cantidad de dinero por tonelada.

De tal manera que, cuando la empresa beneficiadora obtiene el concentrado de cobre, los propietarios se encargan de comercializar sus productos vendiéndolos a bajo precio,

obteniendo pérdidas económicas y despreciando la ganga del mineral que podría ser aprovechado con la aplicación de nuevas tecnologías de recuperación para minerales mixtos de cobre.

Debido a la carencia de capacitación a los mineros artesanos en cuanto a las características mineralógicas, variables operacionales específicas para el proceso de dicho yacimiento y la presencia de minerales oxidados como: malaquita, azurita, cuprita, covelina, entre otros, presentes en sulfuros de cobre, tienen un bajo porcentaje de recuperación en concentrado de cobre por el proceso de flotación de minerales mixtos; esto a causa de su alto contenido de óxidos que ocasiona una baja hidrofobicidad y por ende baja flotabilidad. Es por ello la importancia de evaluar las variables de flotación de estos minerales mixtos en diferentes condiciones, tomando como base los ensayos en flotación de manera que se pueda ver el comportamiento del mineral respecto a variaciones en su granulometría, el tiempo de flotación y dosificación de reactivos.

El presente trabajo de investigación tecnológica busca encontrar las variables y condiciones operacionales de flotación, las cuales permitirán obtener una mayor recuperación de cobre de buen grado. También proponer a los propietarios una investigación tecnológica de acuerdo a su mineral, para que ellos puedan hacer sus ensayos y comercializar sus concentrados de la mejor manera con mayor beneficio económico.

## **1.2 FORMULACIÓN DE PROBLEMAS:**

### **1.2.1. Problema general**

¿Qué variables serán las que influyen en la eficiencia de la recuperación del cobre en el proceso de flotación del yacimiento minero Anccasilla, Sol Candente I distrito de Chiara provincia de Andahuaylas?

### **1.2.2 Problemas específicos:**

**PE1.** ¿Cuál será el tamaño de partícula óptima que responda al proceso de flotación?

**PE2.** ¿Cuál será la dosificación óptima del colector Z-6 (Xantato amílico de potasio) para lograr el máximo porcentaje de recuperación del concentrado de cobre?

**PE3.** ¿Cuál será el tiempo óptimo para obtener concentrados de cobre por flotación?

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

### **1.3.1 Justificación de la investigación**

El presente trabajo de investigación tecnológica se realiza con el fin de solucionar la incertidumbre de años atrás hasta la actualidad en la minera Anccasilla Sol Candente I, porque los mineros no conocen los procesos y mucho menos las variables operativas respecto de la recuperación y el grado de concentrado. Por lo tanto, se planteó realizar un estudio para tener las mejoras en la recuperación del proceso de flotación.

### **1.3.2 Justificación económica**

Observando las mejoras en el proceso de flotación de la minera Anccasilla se hace económicamente rentable porque se elevará el valor agregado del mineral en las operaciones y procesos que estos involucran, indirectamente toda la colectividad y comunidad, salen beneficiadas económicamente la población en general que se involucran en la minería a los propietarios.

### **1.3.3 Justificación tecnológica:**

En el proceso metalúrgico de minerales hoy en día es muy fundamental la tecnología, se aplica un proceso más satisfactorio que es el proceso de flotación por espuma y por ende se llega a una recuperación óptima y adecuada que impulsa la productividad de los minerales valiosos en el sector minero, por lo tanto, se llega a un crecimiento económico y satisfacer la creciente demanda, optimizar el proceso de flotación con el estudio de las variables.

## **1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 Objetivo general**

Determinar las variables operacionales en el proceso de flotación para recuperar eficientemente el contenido de cobre de los minerales mixtos del yacimiento minero Ancasilla, Sol Candente I, distrito de Chiara provincia de Andahuaylas.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

**OE1.** Determinar el tamaño óptimo de las partículas del mineral para el proceso de flotación.

**OE2.** Establecer la dosificación adecuada del colector para lograr un buen porcentaje de recuperación del concentrado de cobre.

**OE3.** Realizar las pruebas cinéticas para conocer el tiempo óptimo de flotación de los minerales mixtos.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

#### 2.1 Antecedentes de la investigación (estado del arte)

##### 2.1.1 Antecedentes internacionales:

(Molina, 2017) en la tesis de grado: *“Estudio del efecto de la aplicación de espumantes en el proceso de flotación de mineral mixto de cobre”*, Pontificia Universidad Católica De Chile indica que los minerales mixtos de cobre (sulfuro/óxido) constituyen alrededor del 20% de las reservas de cobre fino de Chile. Una parte importante de éstas se concentra y recupera mediante el proceso de flotación. La importante complejidad mineralógica del mineral complica el logro de una recuperación óptima de sulfuros y óxidos en un procedimiento singular, siendo necesario aceptar penalidades para una de las dos especies. Este estudio experimental pretende determinar las condiciones de operación óptimas para optimizar tanto la recuperación como la calidad del cobre del producto regulando la combinación de espumantes comerciales, con especial énfasis en el DF400 debido a su superior eficacia y selectividad como espumante. Las evaluaciones de la espumabilidad se llevaron a cabo con una columna AMIRA modificada, mientras que la distribución del diámetro de las burbujas se midió con el equipo Bubbleviewer, complementado con estudios metalúrgicos en celdas de flotación en condiciones operativas estándar de la industria. Los resultados indican que la columna AMIRA modificada presenta una correlación de aproximadamente el 80% con la celda de flotación en lo que respecta a la espumabilidad. La variable que ejerce la influencia más significativa sobre la espumabilidad es la salinidad del medio, que la eleva en un promedio del 93% en comparación con el escenario en agua dulce. El enfoque de estudio utilizado fue cuantitativo, y el diseño de investigación utilizado fue experimental.

(Velásquez, 2018) en su investigación titulada: ***“Optimización de la recuperación de cobre en el circuito de flotación de CODELCO-El Salvador en base a la evaluación de nuevas formulaciones de reactivos de flotación”***, Tesis realizada en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Afirma que la limitación en la extracción de minerales desde la Mina a Cielo Abierto «Campamento Antigu» de Codelco, División Salvador, que poseía una alta ley de cobre y un importante potencial de recuperación en la Planta Concentradora, obligó a utilizar la Mina a Cielo Abierto Quebrada M., que exhibe un rendimiento metalúrgico inferior. Esto amplifica la aprehensión sobre la rentabilidad esperada de Codelco División Salvador, impulsando un examen de la factibilidad de extraer cobre de la escoria en la fundición Potrerillos. (página 148)

(Bravo, 2008) en su investigación intitulada: ***“Flotación de Minerales de Cobre, Plomo y Zinc”***, llegado a las conclusiones basadas en los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio. En el contexto de esta técnica, los reactivos de flotación son un componente esencial. En cuanto se introducen en el sistema, realizan determinadas tareas que permiten separar los minerales preciosos de la ganga. Por otra parte, la correcta aplicación de estos productos químicos no siempre es una tarea sencilla, ya que a lo largo del procedimiento surgen una serie de desafíos técnicos. La composición desempeña un papel importante a la hora de determinar el rendimiento de los reactivos utilizados en la flotación, independientemente de que sean colectores o espumantes. Hay requisitos específicos que debe cumplir la pasta. Por ejemplo, el mineral debe molerse adecuadamente hasta un tamaño no superior a 48 micras ni inferior a 270 micras. Siempre podremos obtener una espuma decente con una dosis bien regulada de espumante si hemos controlado el aire y la altura de los compuestos de la forma adecuada.

### 2.1.2 Antecedentes nacionales

(Delgado, 2016) en su trabajo sobre. *“Operaciones en planta concentradora de mineral polimetálico y óxidos de plomo-plata -cobre de sociedad minera Corona S.A.”* la conclusión es que, para lograr el éxito en la flotación, es necesario controlarlo todo, desde la calidad del mineral en la mina hasta el producto triturado, pasando por el proceso de molienda, la liberación del valioso y la posible aplicación de la flotación flash, las densidades de la pulpa en las etapas de flotación, la calidad y la dosificación automática de los reactivos, el control de las cargas circulantes y la remolienda de los medios de flotación, la automatización de los equipos en el control del nivel de la pulpa, el cálculo automático del pH y el uso de analizadores químicos en línea. Existe la posibilidad de que no sea necesaria la descapitalización mediante flotación flash a partir de la molienda fina si la ley de plomo en el mineral de cabeza era inicialmente demasiado baja. (2016, pp. 77-79).

Las secuencias del proceso que tienen lugar antes de la flotación, como la trituración, la molienda y el acondicionamiento, deben controlarse para generar una pulpa adecuada que permita la calidad y la recuperación de los minerales de interés. Esto es algo que podría definirse como esencial en cualquier proceso.

(Oscanoa, 2020) en la tesis de postgrado: *“Influencia del tamaño de partículas y la formación de espumas en la recuperación de minerales sulfurados de cobre por flotación”*, Universidad Nacional del centro del Perú, Huancayo. Perú. El objetivo de esta investigación fue estudiar los factores que influyen en la mayor cantidad de minerales sulfurados de cobre que pueden recuperarse por flotación, a saber, el tamaño de las partículas y la producción de espuma. Como técnica de investigación se empleó la investigación cuantitativa y se utilizó un diseño de investigación experimental. Se llevaron a cabo un total de cinco a diez experimentos de flotación, en los que las características del tamaño de las partículas y la formación de espuma fueron los factores principales. Durante las pruebas N° 2, 3, 4 y 5, se lograron recuperaciones

del orden de: 64,30% para la plata, 75,28% para el cobre y 54,78% para el hierro. Se observa una disminución notable de la recuperación de plata, un aumento de la recuperación de cobre y una disminución de la recuperación de hierro. Los esquemas comparables se mantienen en las pruebas N°6,7,8,9,10, y se obtienen las recuperaciones más altas de Ag: 76,68%, Cu: 80,89% y Fe: 65,12%. Optimizando los factores primarios, como el grado de molienda, elevándolo a 94% - 200 malla Tyler, y el valor de agitación, disminuyéndolo a 915 rpm, fue factible elevar la recuperación de cobre de 78,11%, que se logró en planta, a 81,59% a nivel de laboratorio. Este logro se consiguió aumentando el grado de molienda al 94%. La granulometría osciló entre 90 y 94%, mientras que la agitación osciló entre 900 y 950 revoluciones por minuto. La conclusión a la que se llegó fue que la recuperación óptima es del 92,57%, lo que está dentro de los parámetros de las variables.

(Alvarado, 2016) en su trabajo de Investigación titulado: ***“Influencia de la dosificación de los colectores AP-3418 y AR-404 sobre la recuperación de plomo y zinc por flotación selectiva de un mineral polimetálico de la empresa minera Occidental 2 de Cajamarca S.R.L”***, tesis válida para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas, realizado en la Carrera de Ingeniería de minas, facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Norte. Donde se dice que «El estudio experimental se llevó a cabo en una celda de flotación de laboratorio, modelo Denver D-12, utilizando mineral con una granulometría de 60% -200 mallas con una ley de 4,48% de plomo y 14,82% de zinc». Sobre la base de los resultados de la investigación de flotación, se determinó que la recuperación de plomo es del 32,29% cuando no se utilizan colectores, mientras que la recuperación es del 50,29% cuando los dos colectores reciben sus dosis respectivas. Mientras que la recuperación de zinc es del 49,38 por ciento cuando no se utilizan colectores, la recuperación es del 56,5 por ciento cuando se utilizan los dos colectores junto con la dosificación. (p.145)

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 Cobre**

El cobre es un metal que se encuentra presente en forma de minerales oxidados y sulfurados (mixtos) en la corteza terrestre. Es uno de los primeros metales conocidos, usados por el ser humano para la fabricación de utensilios, herramientas y armas. Es un conductor de electricidad más rentable, por lo que es usado a nivel mundial en conexiones eléctricas y debido a su conductividad térmica también es usado en tuberías de intercambio térmico y motores eléctricos.

### **2.2.2 Propiedades físicas y químicas:**

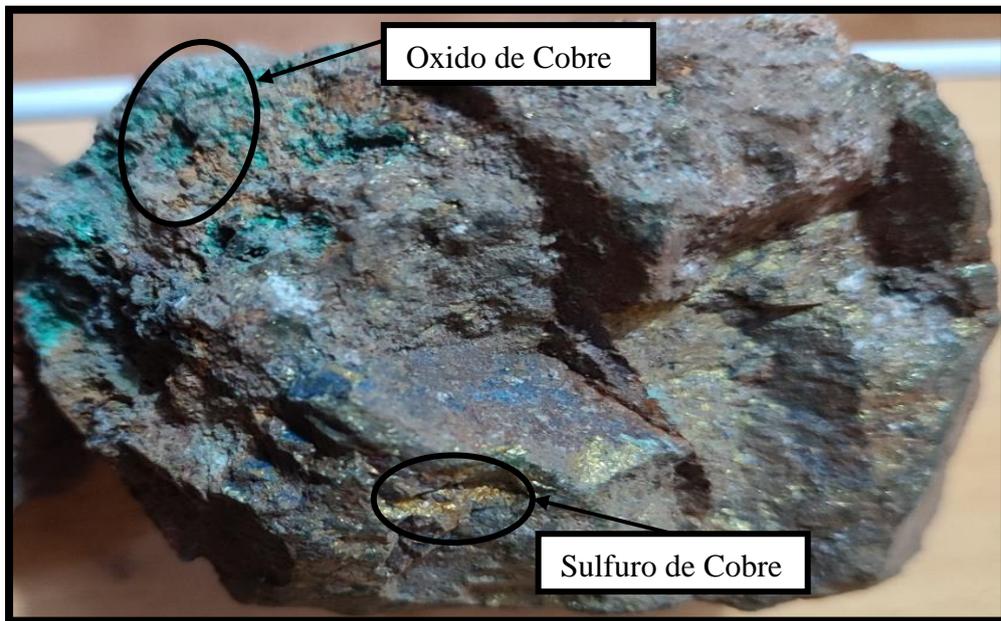
El cobre, de número atómico 29, es un elemento químico con una densidad de 8.92 g/cm<sup>3</sup> en condiciones normales. Es conocido por su dureza de 2 a 3 en la escala de Mohs y su estructura cristalina cúbica. Es un metal de color rojizo que, al reaccionar con el aire, forma una fina capa verdosa de carbonato cúprico. Con un punto de fusión de 1357 grados kelvin (o 1085 grados Celsius) y un punto de ebullición de 3200 grados kelvin (o 2927 grados Celsius), el cobre exhibe una alta conductividad eléctrica de  $58.108 \times 10^6$  S/m y una conductividad térmica de 400 W/(K·m). Además, se emplea en varias aleaciones como el latón (Cu-Zn), el bronce (Cu-Sn) y la alpaca (Cu-Ni-Zn).

### **2.2.3 Mineral mixto de cobre**

En la extracción de minerales de cobre, se pueden clasificar en dos categorías principales: minerales sulfurados y oxidados, que son de diferentes orígenes y, por lo tanto, distintas propiedades físico-químicas. Durante la extracción del mineral, se pueden encontrar mezclas de diferentes especies en una sola roca, siendo los depósitos de pórfido los más comunes. Estos depósitos suelen tener un contenido de cobre de entre 0,5% y 1%, y son el resultado de la interacción entre cuerpos mineralizados estratos volcánicos y fluidos hidrotermales en la zona.

## Figura 1

*Mineral mixto de cobre*



*Nota:* Muestra tomada del Yacimiento, Elaboración Propia

En la naturaleza el mineral de cobre se encuentra en diferentes combinaciones del mineral, se conocen aproximadamente de 165 minerales de cobre y solo aproximadamente 12 son de relevancia.

Según su composición mineralógica y el procedimiento de su tratamiento por el beneficio de flotación por espuma, se detalla la categorización de los minerales sulfurados de cobre en función de su especie en la tabla 1.

**Tabla 1***Clasificación de los minerales de cobre*

<b>MINERAL</b>	<b>FÓRMULA</b>	<b>% DE COBRE</b>
<b>ÓXIDOS</b>		
CUPRITA	$\text{Cu}_2\text{O}$	82.3
TENORITA	$\text{CuO}$	69.4
ATACAMITA	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	46.7
MALAQUITA	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$	58.6
BROCANTITA	$\text{CuSO}_4 \cdot (\text{OH})_3$	43.5
AZUCARITA	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	53.7
DIOPTAZA	$\text{CuSiO} \cdot \text{H}_2\text{O}$	51.0
ANTLERITA	$\text{CuSO}_4(\text{OH})_4$	52.0
CRISOCOLA	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	27.0
CALCANTINA	$\text{CuSO} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	22.4
<b>SULFUROS</b>		
CALCOSITA	$\text{Cu}_2\text{S}$	79.5
COVELLITA	$\text{CuS}$	67.2
BORNITA	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	74.6
TETANTITA	$\text{Cu}_8\text{As}_2\text{S}_7$	49.5
ENARGITA	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	43.3
CALCOPIRITA	$\text{CuFeS}_2$	49.5

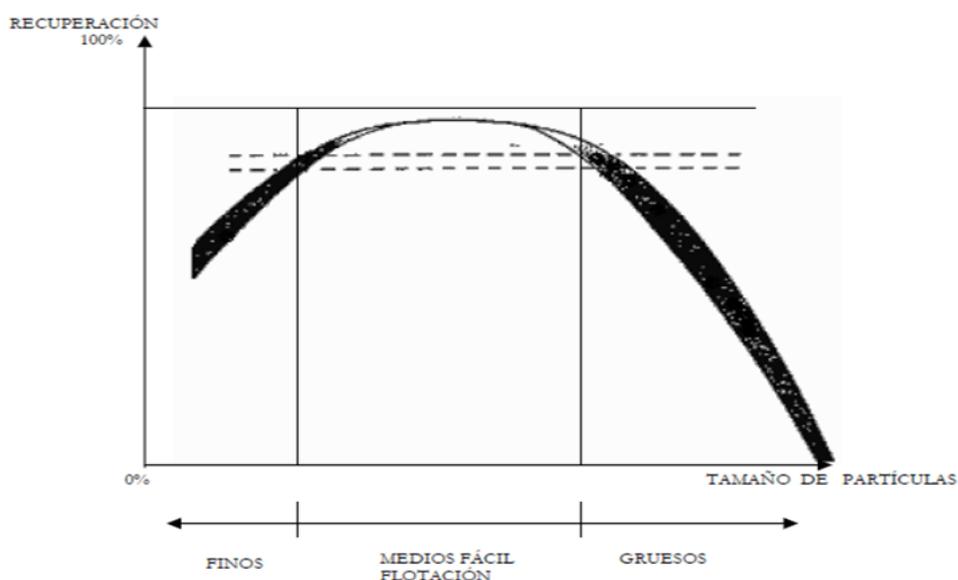
*Nota:* Realizado en la escuela profesional de Ingeniería Geológica, ING. Mauro Zegarra Carreón

## 2.2.4 Granulometría

Es la medición de los granos de las partículas del mineral que se pueden obtener a través de distribución de mallas o por diferentes métodos granulométricos, clasifica las partículas según su tamaño y proporciona información sobre la distribución de tamaños en una muestra.

### Figura 2

*Recuperación vs tamaño de partículas*



*Nota:* Esta figura presenta la distribución de los tamaños de la partícula (Conejeros, 2003)

En la mayoría de los casos, en un proceso de flotación primaria de minerales de cobre, es necesario obtener un producto de molienda con una granulometría de 40 a 55% - 200 #Ty. El objetivo principal de la flotación primaria es el porcentaje de la recuperación de cobre más que la ley, por lo que se requiere una remolienda para lograr la liberación adecuada en la etapa de limpieza. En la figura 3 se ilustra cómo la granulometría afecta la recuperación por flotación de un mineral específico.

“El tamaño de la partícula se establece a través de un estudio granulométrico. En un estudio granulométrico, el peso de una muestra representativa de mineral es transferido a través de una serie de tamices, que se encuentran ordenados de arriba abajo”. (Antapaccay, 2019).

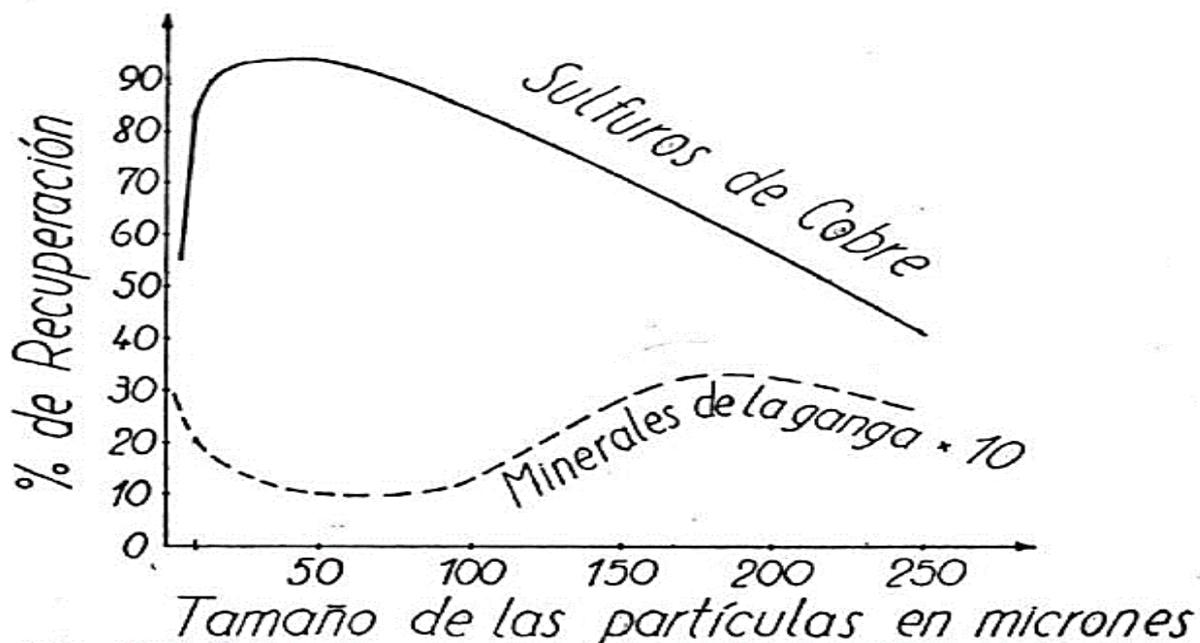
### 2.2.5 Factor granulométrico

Para que cada mineral pueda flotar, su tamaño debe reducirse de forma que cada partícula represente una única especie mineralógica (liberación). Además, el tamaño del mineral debe ser suficiente para que las burbujas de aire puedan transportarlo a la superficie de las celdas de flotación. Aparte de eso, es una medida que se utiliza en ingeniería, y las partículas tienen un tamaño máximo que es capaz de flotar al aire. Es natural que este tamaño máximo dependa de las características del mineral y de su gravedad específica.

Es esencial tener en cuenta no sólo el tamaño máximo de las partículas en suspensión, que puede determinarse por su peso relativo o su diámetro, sino también el tamaño que se especifica como su punto de liberación. La gran mayoría de los minerales preciosos están dispersos, lo que significa que se encuentran por toda la roca madre en forma de partículas cuyo tamaño oscila entre unas pocas micras y cien micras. Esto sugiere que, si el material que va a ser flotado no se tritura hasta el punto en que se liberen sus propiedades mineralógicas, entonces el proceso de flotación no tendrá éxito.

**Figura 3**

*Tamaño de las partículas en micrones, recuperación de minerales en función de su tamaño granular*



### **2.2.6 Análisis Granulométrico:**

El proceso de identificar la granulometría del mineral y adquirir el tamaño de grano adecuado para el grado de liberación es lo que se consigue en el proceso de análisis granulométrico. Esta categoría describe la organización de las partículas de un agregado; este análisis se determina haciendo pasar una muestra seca representativa de un agregado por una serie de tamices, cuyas aberturas se organizan de mayor a menor. A continuación, se analiza el árido para determinar la disposición granulométrica. Para entender un tamiz, piense en él como una malla de abertura cuadrada que ha sido convenientemente normalizada. Es esencial tener en cuenta que la gradación hace que las partículas se acomoden, lo que a su vez aumenta el grado de resistencia a la flexión y la compresión. (Paredes, 2016)

En toda la operación fundamental del beneficio la granulometría que tiene un rol crucial en la disminución del tamaño de las partículas de mineral, los problemas de diseminación y liberación que se analizan únicamente a través del análisis granulométrico.

El propósito del análisis granulométrico es investigar la composición de las partículas minerales, con el objetivo de determinar el tamaño medio de las partículas, su volumen y su superficie. Los objetivos específicos más relevantes del estudio granulométrico de los minerales son: establecer el tamaño de las partículas y separarlas en función de su tamaño.

La figura 4, se muestra los tamices de acuerdo a la norma ASTM.

El mineral agregado es agitado en un rotap para hacer pasar la muestra por cada uno de ellos. Después de ciertos minutos, se retiran los tamices y se pesa la cantidad de material retenido en cada uno, sumando estas cantidades para que coincidan con el peso total inicial de la muestra. “La representación gráfica de la distribución granulométrica permite identificar la uniformidad o variedad en los tamaños de partículas” (Araya, 2021).

“La curva granulométrica de distribución facilita la observación de la tendencia uniforme o variada que exhiben los diámetros de la partícula” (Araya, 2021).

Es importante señalar que el número de mallas es una representación del número de orificios que tiene un tamiz por pulgada lineal. Cuanto menor es la abertura, más numerosas son los orificios.

Al considerar el vínculo entre el tamaño de una partícula y los orificios de malla de los tamices en los que queda atrapada, es de suma importancia tener en cuenta esta relación. La relación entre los tamices según las normas ASTM y TYLER se muestra en la tabla que figura en el anexo 1.

#### **Figura 4**

##### *Serie de tamices*



*Nota:* Laboratorio de procesamiento de minerales Ingeniería metalúrgica UNSAAC

#### **2.2.7 P80**

“Se suele definir en micras y se cree que es el tamaño del orificio de la malla por el que pasa el ochenta por ciento de las partículas que componen el producto que se fabrica. Nos

permite obtener una buena granulometría al proporcionarnos la fragmentación del material roto que buscamos” (Antapaccay, 2019).

“La teoría de la conminución es especialmente significativa porque nos permite comprender mejor la conexión que existe entre la cantidad de energía que se utiliza y el grado en que se reduce el tamaño de las partículas” (Zumaran Ferrofin, 2017).

El  $P_{80}$  y el  $F_{80}$  representa el coeficiente de reducción  $R_{80}$ , obtenido del resultado de la conminución, lo que resulta en la siguiente Ecuación 1:

$$R_{80} = \frac{\text{Tamaño del alimento}}{\text{Tamaño del producto}} = \frac{F_{80}}{P_{80}} \quad (1)$$

## **2.2.8 Teoría de flotación de minerales mixtos**

### **2.2.8.1 Definición de flotación**

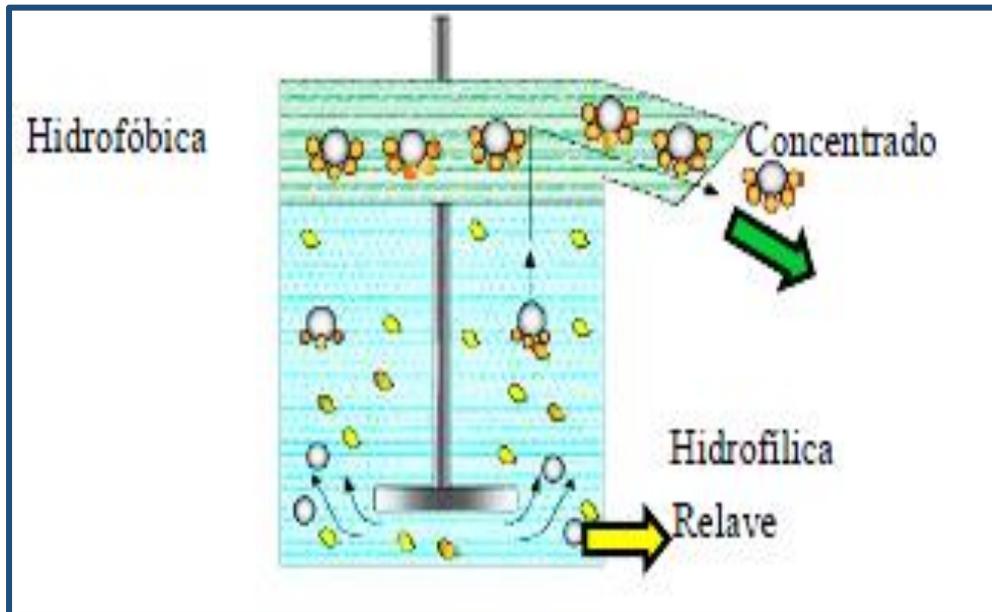
Existen variaciones en las características superficiales de los minerales preciosos y los minerales de ganga, y la flotación es un método de separación fisicoquímica que aprovecha estas discrepancias. La hipótesis de la flotación es complicada e implica tres fases (sólidos, agua y espuma), así como un gran número de subprocesos e interacciones. (Arrau, 2006)

“La finalidad del área de flotación colectiva o selectiva es optimizar la recuperación de minerales preciosos de la pulpa que se forma durante el proceso de molienda. Esto se consigue creando un relave que tenga la menor cantidad de metales valiosos factible y un concentrado clasificado según los requisitos.” (HUDBAY, 2023).

La flotación es un proceso multifacético que consta de más de una etapa. Se toman en cuenta las siguientes tres etapas: sólida (mineral), líquida (agua) y gaseosa (burbujas de aire)., ver figura 5. Para comprender de la mejor manera este proceso, es fundamental examinar y estudiar las propiedades fisicoquímicas de la superficie de los minerales presentes en cada una de estas fases y sus interacciones que se encuentran en cada una de ellas.

**Figura 5**

*Zona hidrofóbica e hidrofílica en celda de flotación*



*Fuente.* (Yucra, 2022)

A pesar de que teóricamente la flotación es un proceso más sencillo, la cantidad y complejidad de varias variables que participan en este proceso dependen de la otra, por lo que se percibe una aplicación de forma complicada. Por esta razón se requieren de conocimiento de todos los variables mineralógicas de bases científicas e ingeniería, pero sobre todo la experiencia en el proceso y manejo del arte.

Una técnica de concentración se denomina flotación y aprovecha las diferencias existentes entre las características superficiales o interfaciales de la especie o mineral valioso y la ganga. La base de este proceso es la adhesión de determinadas partículas a burbujas de gas que se crean en la pulpa mediante un medio externo presente en la celda de flotación.

Las partículas son transportadas a la superficie de la célula por las burbujas de aire, donde se concentran, se recogen y se recuperan como concentrado. La fracción de los sólidos que no se adhiere a las burbujas permanece en la pulpa y se denomina relave.

En la fase de limpieza del concentrado, es esencial separar o liberar las especies valiosas que componen el mineral para obtener una concentración aceptable. Esta liberación de partículas útiles durante la etapa principal de flotación, a menudo conocida como etapa rougher, no es necesaria. Dado que la liberación de partículas se realiza mediante procesos de trituración o remolienda, el tamaño de las partículas es de suma importancia.

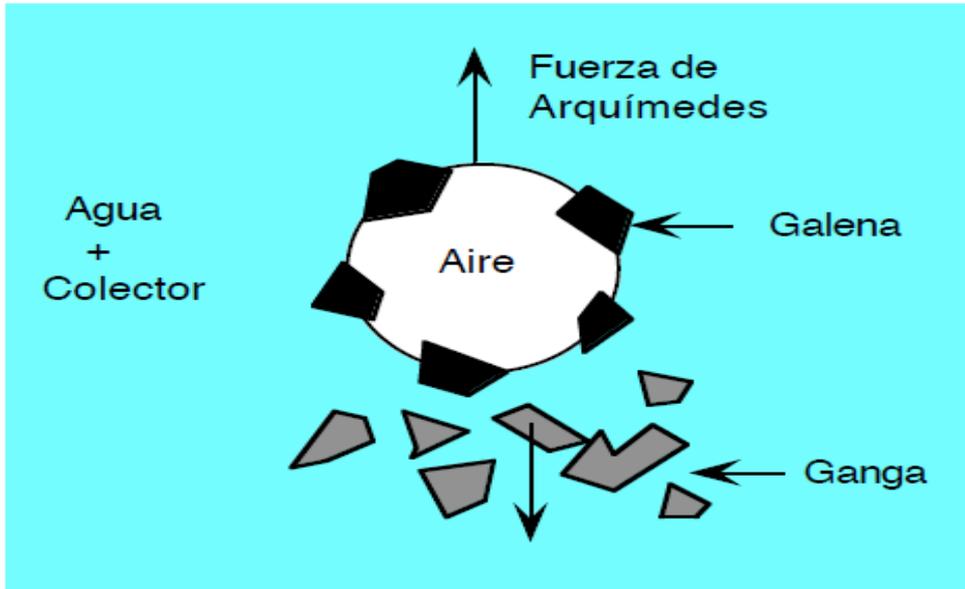
Además, la característica hidrofóbica de las especies mineralógicas que componen el mineral, cuyas cualidades hacen que las superficies muestren una preferencia hacia el aire o el agua, es una de las variables que ayuda a la separación durante un proceso de flotación. El proceso de flotación se ve afectado por una serie de aspectos diferentes.

Durante el proceso de flotación, la diferencia entre las cualidades valiosas y la ganga puede alterarse modificando el entorno químico y electroquímico del sistema. Esto puede lograrse seleccionando los reactivos químicos apropiados que deben añadirse, que pueden incluir colectores, activadores, depresores o reguladores del pH.

El concepto de Arquímedes es la base fundamental sobre la que se construye la flotación de minerales. En la figura 6 se muestra la adherencia de las partículas de cobre en el aire. Esto demuestra que el cuerpo está totalmente sumergido en el líquido que está en reposo. A continuación, se produce un impulso de abajo hacia arriba para que el peso del volumen del líquido se equilibre.

## Figura 6

*Principio de la separación por flotación*



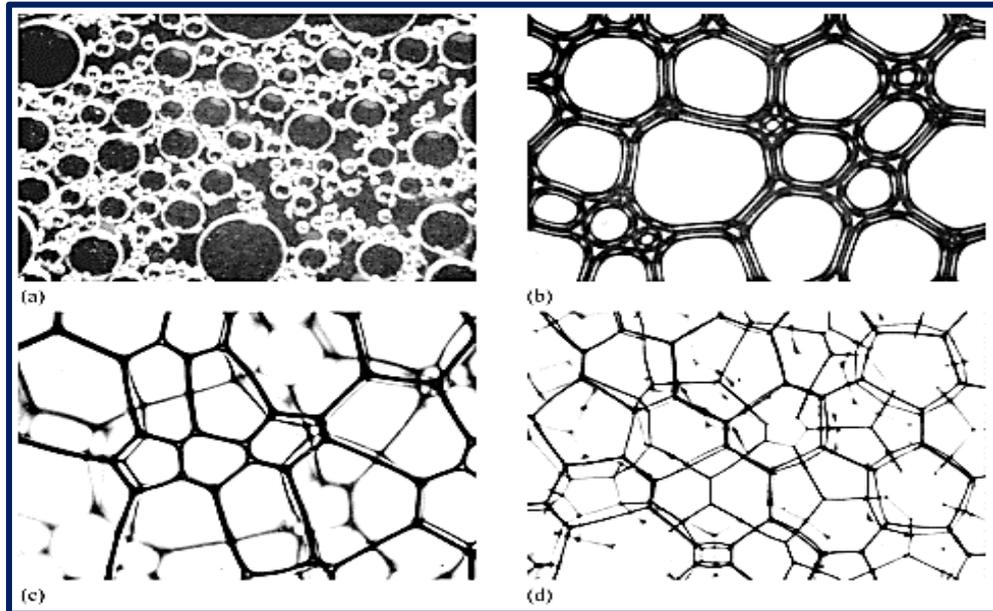
*Nota:* Esta figura nos muestra la adherencia de las partículas del cobre en el aire (FORGIARINI, 2007)

### 2.2.8.2 Formación y tipo de espuma

La coalescencia ocurre cuando dos burbujas se tocan, la película líquida que las une se adelgaza y se fractura. La zona de espuma se forma conforme las burbujas creadas se elevan hacia la superficie, reduciendo esta última. Por lo tanto, principalmente, podemos hallar dos clases de espumas: los primeros son más inestables y tienen burbujas circulares y una capa de líquido gruesa, en cambio, los segundos poseen burbujas poliédricas separadas por una interfase extremadamente fina. La Figura 7 ilustra el paso estructural de una clase de espuma a otra. Las primeras son frecuentes en sistemas bifásicos (líquido-gas), en cambio, las segundas suelen corresponder a sistemas trifásicos (sólido-líquido-gas) que se encuentran en el proceso de flotación de minerales. (Hamid, 2011)

## Figura 7

*Tipos de estructuras en una espuma de flotación*



*Nota:* Fotomicrografías que muestran la transición de espuma a espuma ( (Hamid, 2011)

- a) Una espuma de burbujas esféricas no drenada
- b) Una espuma parcialmente drenada, que muestra la distorsión de las burbujas
- c) Después de un mayor drenaje, las laminillas y los bordes de la meseta continúan adelgazando
- d) Una espuma bien drenada, que muestra células poliédricas y bordes de meseta muy delgados

### 2.2.9 Procesos de flotación de minerales mixtos

La presencia de ganga es una de las características principales del proceso de formación de espuma en los minerales de cobre. Los minerales hidrófilos tienen afinidad con el agua mientras que los hidrófobos repelen el agua. Si se agrega aire a la mezcla mientras se mezclan partículas hidrófilas e hidrófobas en agua, las partículas hidrófobas se adherirán a las burbujas de aire y flotarán en la superficie como mineral. Luego, la capa de espuma que se forma en la

superficie de la celada contiene el mineral valioso hidrófobo y por lo tanto es posible separarlo como resultado. Por otro lado, las partículas hidrófilas permanecerán en suspensión y se eliminarán en la cola. (Kawatra, 1992)

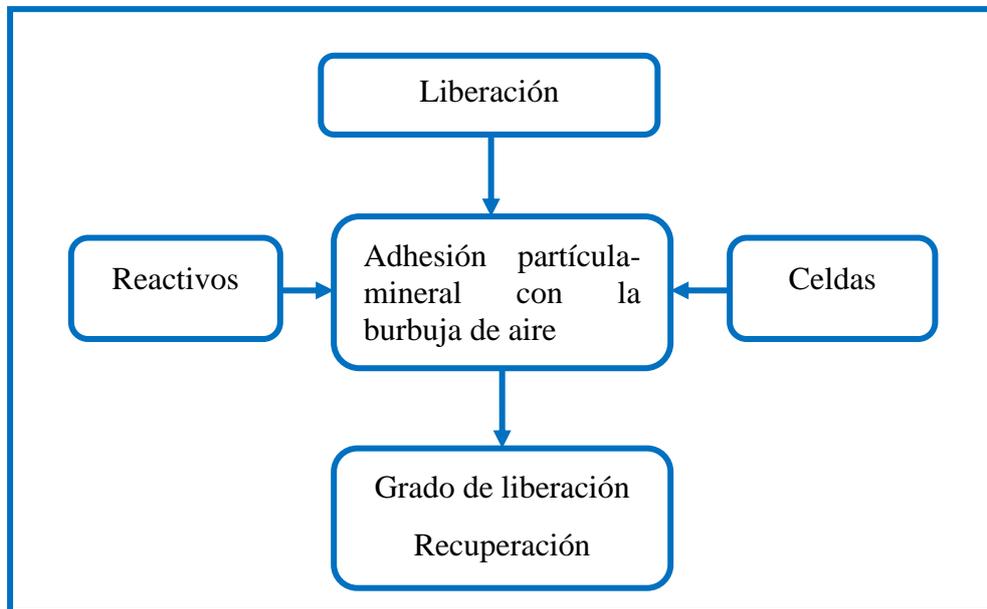
Mientras tanto, minerales como el azufre natural, el grafito, la molibdenita y el carbón bituminoso, que son hidrofóbicos y aerófilos, tienen la capacidad de flotar.

El fenómeno de flotación de minerales es una actividad físico-química empleada como método de concentración de minerales de grano fino, este proceso implica el tratamiento físico y químico de la pulpa mineral, generando condiciones propicias para la unión de partículas minerales introducidas en las burbujas de aire. Las especies valiosas o útiles representan únicamente una fracción mínima del mineral, en cambio, las especies insustituibles o estériles son la mayoría, el carácter hidrófilo o la afinidad provoca que estas partículas se humedezcan, se mantengan suspendidas en la masa y finalmente se sumergen. La característica hidrofóbica o repulsiva impide que las partículas se mojen minerales que tienen la capacidad de adherirse a las burbujas y elevarse. Estas propiedades de algunos minerales ocurren naturalmente, pero pueden ser transferidas o determinadas por reactivos espumantes. (Sutulov, Alexander, 1968).

El principio fundamental de concentración, que busca maximizar la recuperación o el grado de liberación del mineral deseado, requiere que la partícula del mineral se adhiera a la burbuja de aire. Hay tres factores principales responsables de la adhesión sólido-gas: los reactivos proporcionan las condiciones que permiten la fácil flotabilidad del mineral, la liberación, que es el tamaño de partícula en el que el mineral deseado se halla en una burbuja de aire con alto contenido de concentrado y la adhesión entre sólidos y gases.

## Figura 8

### *Principio fundamental de la flotación*



*Fuente:* (Guedez, 2007)

### **2.2.10 Etapas en el proceso de flotación**

Para llevar a cabo de manera efectiva el proceso de flotación, es fundamental seguir una secuencia detallada y precisa. Esta secuencia comienza con la liberación de las partículas, la cual implica una serie de etapas que van desde el chancado y la molienda, ya sea utilizando minerales más aguas o mediante molienda en seco. Posteriormente, el material resultante se acondiciona en una pulpa, en la cual se incorporan los reactivos necesarios para la óptima recuperación del mineral valioso. Es importante respetar cada paso de este proceso para garantizar su eficacia y obtener los resultados deseados.

Es imprescindible la formación de una película hidrofóbica selectiva sobre las partículas a ser flotadas y una película hidrofílica o humectable sobre todas las demás, con el fin de propiciar la adhesión de las partículas minerales a las burbujas de aire y así generar una espuma enriquecida con minerales. en la superficie de la pulpa.

### **2.2.11 Elementos de flotación**

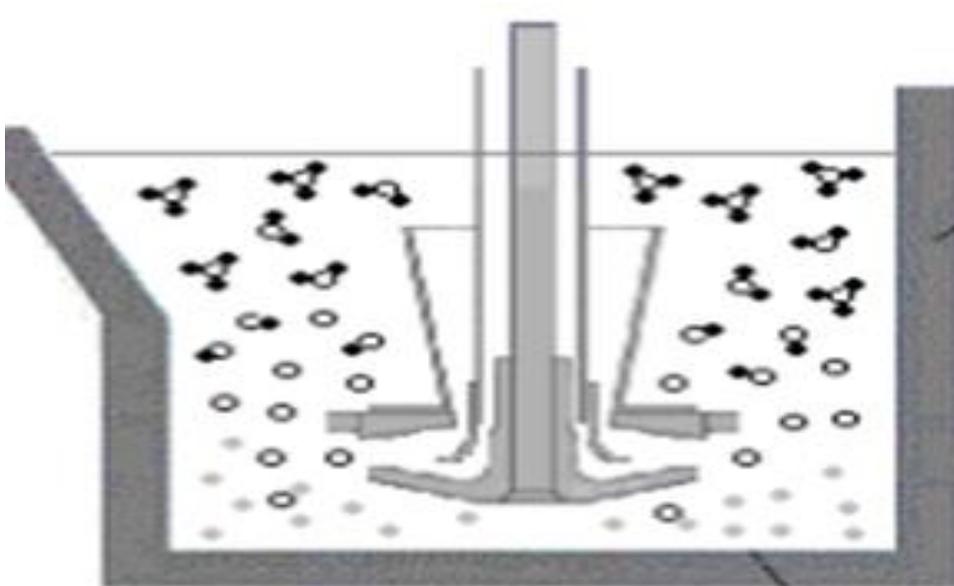
En el fascinante proceso de flotación, se distinguen claramente tres etapas fundamentales: la fase sólida, la fase líquida y la fase gaseosa. Cada una de estas fases juega un papel crucial en el éxito de la operación de flotación. El agua, en su estado líquido, se destaca por su capacidad para discernir entre sustancias sólidas y líquidas gracias a sus singulares características y propiedades únicas. Antes de proceder con la ejecución del proceso, es necesario llevar a cabo la preparación adecuada de la pulpa, la cual debe tener un contenido de sólidos que oscila entre el 35% y el 40%. En los procesos de separación, combinados se emplea aire como gas que se introduce en la mezcla de manera neumática o mecánica con el fin de generar las burbujas que constituyen los elementos clave; las partículas sólidas tienden a adherirse a dichas burbujas. El proceso de flotación se fundamenta en las diferencias de afinidad que presentan los sólidos disociables hacia el agua, ya sea por su naturaleza hidrófila o hidrófoba. Este método de separación es ampliamente utilizado en la industria minera para la concentración de minerales. En relación con la cuestión fundamental del comportamiento de los sólidos en contacto con el agua, es decir, la capacidad de los materiales para mojarse.

También es evidente que los minerales hidrofóbicos presentan una marcada aerofilia, lo cual sugiere que muestran una clara afinidad hacia las burbujas de aire presentes en el medio. Las partículas que muestran afinidad por el agua se desplazarán gradualmente y finalmente se depositarán en el fondo de la máquina de flotación. Por otro lado, aquellas partículas que no presentan afinidad por el agua se unirán a las burbujas de aire y darán lugar a la formación de una capa de espuma, tal y como se detalla en la figura número 9. Por el contrario, los minerales hidrofílicos son inherentemente aerofóbicos, lo cual implica que por lo general no tienden a adherirse.

Por otro lado, es importante mencionar que los minerales hidrofóbicos, es decir, aquellos que no se mojan con el agua, abarcan una amplia variedad de compuestos, como óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros tipos de minerales considerados estériles o ganga en el proceso de extracción. Además, es claramente evidente que los minerales hidrofóbicos presentan una marcada aerofobia, lo cual indica que muestran una fuerte afinidad por repeler el agua. Por otro lado, los minerales hidrofílicos no parecen aerofobia, lo que conlleva a que no se adhieran de manera habitual a las burbujas de aire.

### Figura 9

#### *Partículas en la flotación*



*Nota.* ● Partículas hidrofóbicas ● Partículas hidrofílicas ○ Burbujas. (Sutulov, 1968).

#### **2.2.12 Elementos tecnológicos del proceso**

El procedimiento de flotación se compone de varias etapas. En primer lugar, el mineral crudo o con cabeza se lleva a la planta de trituración seca, donde se reduce a tamaños de aproximadamente 10 mm en dos o tres etapas. Posteriormente, estos trozos se trasladan a una planta de molienda, donde el mineral se reduce a cadenas finas en húmedo de 50 a 100 micras,

dependiendo de su distribución. El mineral es molido hasta el punto en que esté liberado para una buena recuperación.

### Figura 10

*Corte transversal de una celda de flotación*



*Nota.* 1) Zona de mezclado, 2) Zona de mineralización, 3) Zona de espuma.

El mineral preparado de esta manera se somete a diversos reactivos: algunos están diseñados para preparar superficies minerales para la adsorción de reactivos (modificadores), otros potencian las características hidrofóbicas de los minerales (colectores) y otros que facilitan la adsorción de reactivos (modificadores) generación uniforme y estable de espuma (espumantes). La pulpa tratada o acondicionada con reactivos en seguida de máquinas de flotación, donde el producto valioso generalmente se separa en un concentrado y la parte estéril se elimina como relave. (Sutulov, 1968).

Cuando el mineral contiene múltiples elementos beneficiosos, como en el caso de las menas complejas de cobre, hierro, plomo, molibdeno y zinc, entre otros. La descomposición de estos minerales resulta más difícil por el hecho de contener diferentes características.

### **2.2.13 Principios de la flotación**

El proceso de flotación es un eficaz método de concentración de minerales, ampliamente utilizado en la industria minera, donde se busca diferenciar selectivamente las partículas de mineral finamente molidas de las menas estériles o gangas, con el objetivo de obtener un concentrado de alto valor comercial.

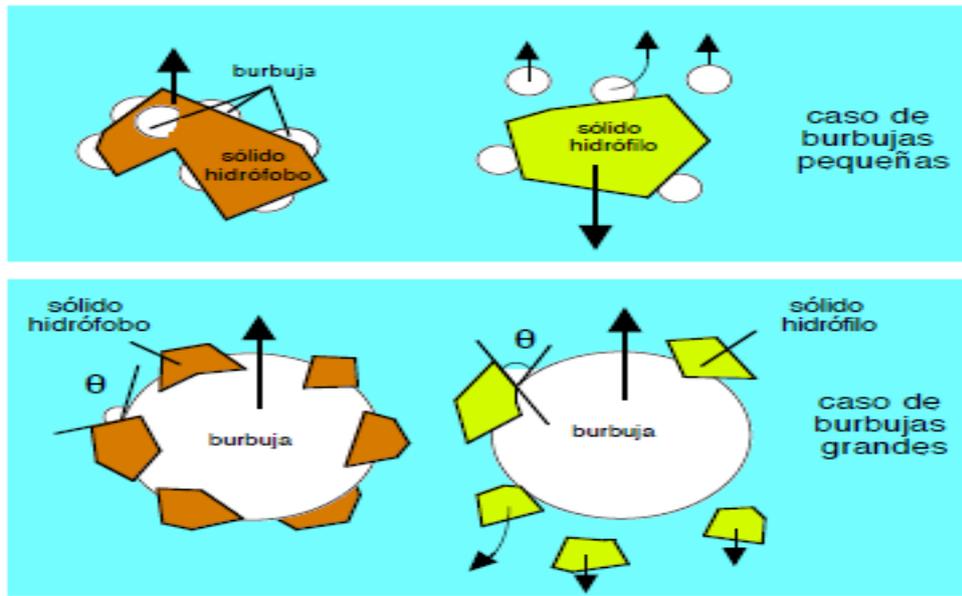
El procedimiento implica la realización de un procesamiento químico detallado de una pulpa mineral con el objetivo de crear las condiciones óptimas para facilitar la adhesión selectiva de partículas de minerales específicos a las burbujas de aire presentes en la mezcla. La separación eficiente de especies minerales es el objetivo principal en el procesamiento de minerales, donde se buscan separar partículas finamente dispersas en una suspensión acuosa utilizando sus propiedades de afinidad (hidrofílica) o repulsión (hidrofóbica) hacia el agua. Este proceso es fundamental en la industria minera para obtener concentrados de minerales de alto valor económico. La concentración de minerales durante el complejo proceso de flotación mediante espumas puede presentar una amplia variedad de formas y métodos, dependiendo de las características específicas de los minerales y las condiciones de operación. La flotación colectiva, también conocida como flotación en masa, es un proceso en el cual varios componentes se separan en dos fases distintas: flotación selectiva y flotación diferencial. Este método se utiliza para separar compuestos químicos complejos, permitiendo la individualización de cada especie presente en la muestra. (Ballester A. V., 2014)

La finalidad de la flotación en grandes volúmenes suele ser la separación de uno o varios minerales de otros, donde la adsorción selectiva del colector a los minerales flotantes es fundamental para lograr una separación efectiva. Los agentes de control pueden influir en la selectividad de adsorción del colector, pudiendo potenciar o dificultar la interacción del colector con determinados minerales.

En la figura 11 se observa la reacción de minerales hidrofóbicos e hidrofílicos en relación con el agua.

**Figura 11**

*Flotación de partículas hidrofobas*



*Nota.* Esta figura nos muestra el comportamiento de minerales hidrofóbicos e hidrofílicos respecto al agua. (FORGIARINI, 2007)

#### **2.2.14 Componentes del Proceso de Flotación**

El procedimiento de flotación se fundamenta mayormente en los siguientes elementos:

##### **2.2.14.1 Componentes químicos**

Son los compuestos químicos reactivos empleados en la flotación como: colectores, espumantes, activadores, depresores y modificadores de pH.

##### **2.2.14.2 Componentes de equipo**

Se fundamentan en condiciones mecánicas tales como el tamaño, circuito de flotación, flujo de aire, la revolución por minuto del agitador, tipo de celdas, el tamaño del colchón de espuma, entre otros.

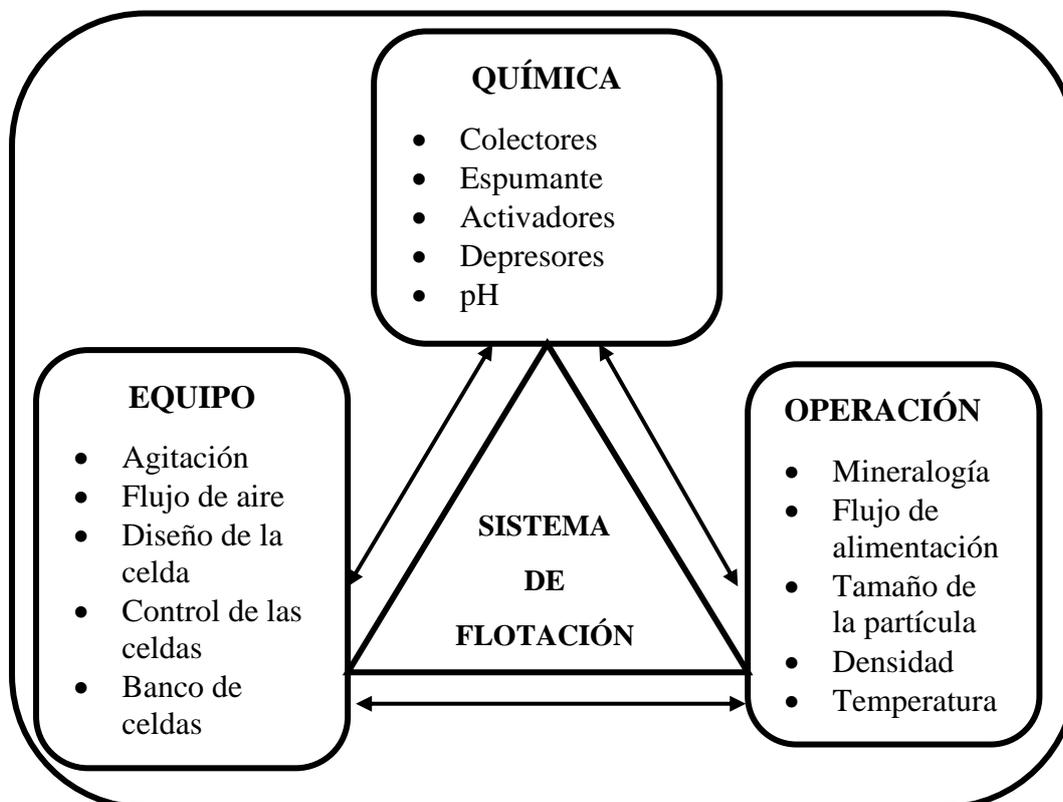
### 2.2.14.3 Componentes operacionales

Las propiedades y características del mineral son fundamentales para determinar el tipo de mineralogía presente en la muestra, así como el tamaño de la partícula necesaria para lograr su liberación óptima durante el proceso de flotación. Otros factores a considerar son la temperatura de operación de la flotación, la composición de la pulpa en la celda de flotación, la granulometría de los sólidos presentes, la densidad de la pulpa, el flujo de la alimentación al circuito, el pH de la solución, así como la alcalinidad y acidez de la pulpa, los cuales influyen directamente en la eficiencia del proceso de separación de minerales.

Cada componente individual es sumamente relevante y fundamental, ya que se sustenta en tres tipos diferentes de elementos esenciales. Sin la presencia de alguno de ellos, el proceso de flotación no podría llevarse a cabo de manera eficiente y efectiva.

**Figura 12**

*Componentes del proceso de flotación*



*Nota.* La figura representa los tres componentes del sistema de flotación,

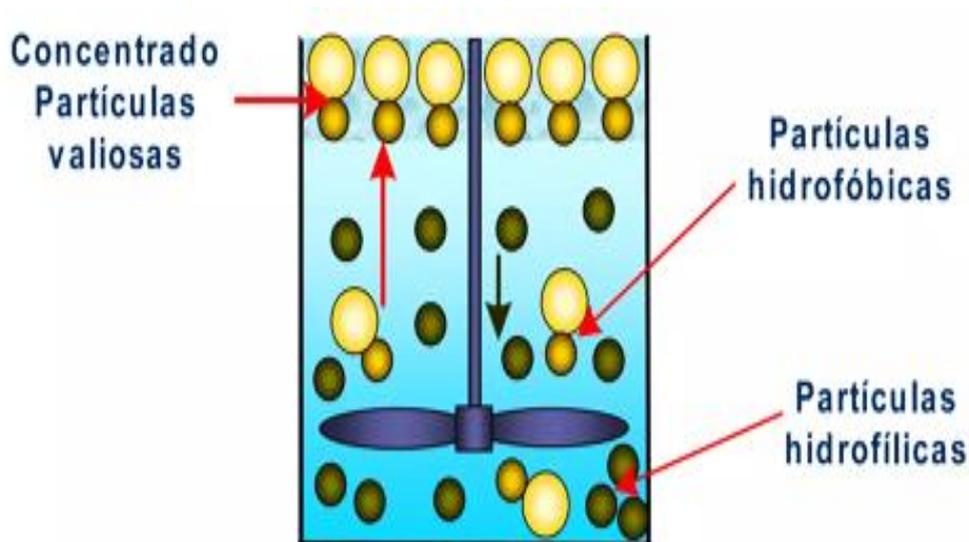
### 2.2.15 Mecanismos de flotación por espumas

Es fundamental comprender la interacción que ocurre entre la burbuja de aire y la partícula mineral para poder estudiar el proceso de flotación y cómo se forma una conexión estable entre ellos.

El proceso de flotación se basa sobre las propiedades que existen como hidrofílicas e hidrofóbicas de los sólidos que se separan, es muy fundamental de este fenómeno del comportamiento que esta entre los sólidos y agua, esto quiere decir que es la mojabilidad de los sólidos.

**Figura 13**

*Esquema que muestra a las partículas hidrofóbicas e hidrofílicas*



*Fuente.* (Conejeros, 2003)

Por otro lado, es importante mencionar que los minerales presentes en la naturaleza, tales como los óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros compuestos, tienden a ser hidrofílicos, es decir, tienen una afinidad parcial por el agua y tienden a mojarse en presencia de este líquido. Los materiales hidrófobos, por su parte, presentan una marcada tendencia a ser aerofílicos, lo que significa que muestran una gran atracción por las burbujas de aire. En

contraste, los componentes minerales hidrófilos tienden a ser aerofóbicos, es decir, no tienen afinidad con las burbujas de aire. (Conejeros, 2003)

Por lo tanto, para mejorar la flotabilidad, es fundamental incrementar la resistencia a la humedad de las partículas minerales potenciar la hidrofobicidad de los minerales. Los colectores son reactivos químicos utilizados para lograr esto.

El colector cubre la partícula mineral valiosa al adherirse a su superficie a través de su parte polar, lo que le da propiedades hidrofóbicas.

La efervescente cumple su función de generar las burbujas con el tamaño y la calidad de espumas óptimos. Para lograr la interacción de las partículas y las burbujas, es indispensable que la pulpa sea agitada de manera constante en el acondicionador:

- ✓ Encuentro
- ✓ Condiciones propicias para formar la unión partícula-burbuja.

Cuando una partícula y una burbuja se encuentran, se llega a un tope en el que la película de agua que las separa es muy fina. A medida que la partícula se acerca a la burbuja, debe superar la tensión superficial actual.

#### **2.2.15.1 Partículas hidrofóbicas e hidrofílicas**

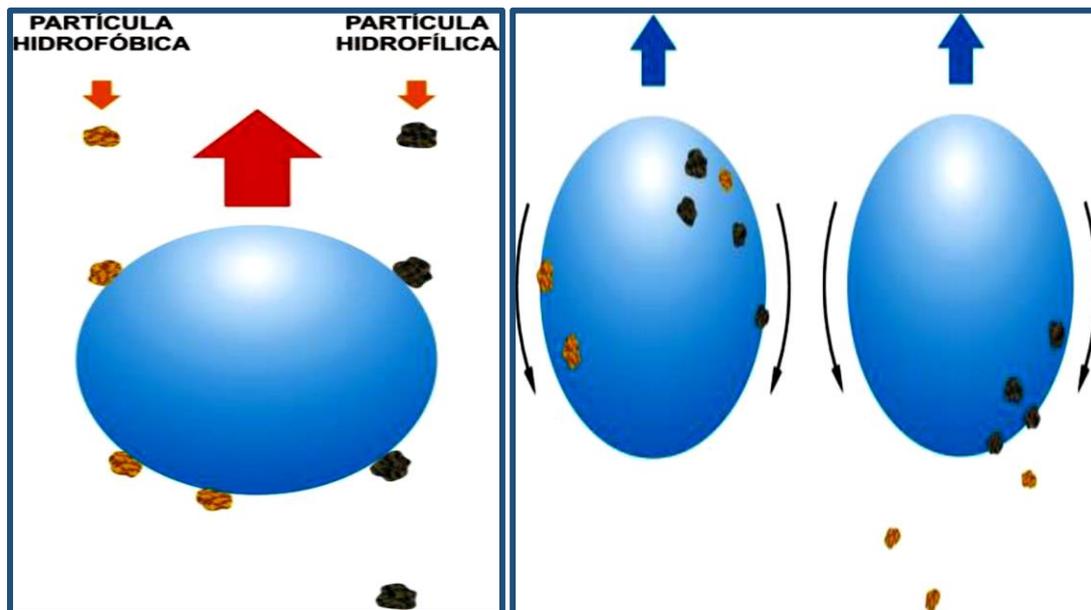
En el escenario planteado, dos partículas, una hidrofóbica y otra hidrofílica, se encuentran en el trayecto de colisión de una burbuja en ascenso. La partícula hidrofóbica posee la capacidad de traspasar la capa de agua que recubre la burbuja y se adhiere a la misma. La partícula que muestra preferencia por el agua se desplaza alrededor de la burbuja hasta alcanzar su extremo inferior, desde donde eventualmente comenzará a descender.

Al introducir burbujas de aire en una pulpa agitada, estas interactúan con las partículas de la pulpa. En este contexto, las partículas que rechazan el agua se manifiestan en un tono café

oscuro, mientras que las que aprecian el agua se manifiestan en un tono naranja. Cuando las partículas impactan en la parte superior de las burbujas, empiezan a descender por las paredes de las mismas al descender hacia la parte inferior. Al alcanzar la parte inferior, una partícula hidrofóbica se desprende y se descende. Este fenómeno puede ocurrir con algunas partículas hidrofóbicas que no están adecuadamente adheridas a las burbujas, conforme las burbujas se elevan. (HUDBAY, 2023)

**Figura 14**

*Partículas hidrofóbicas e hidrofílicas*



*Fuente:* (HUDBAY, 2023)

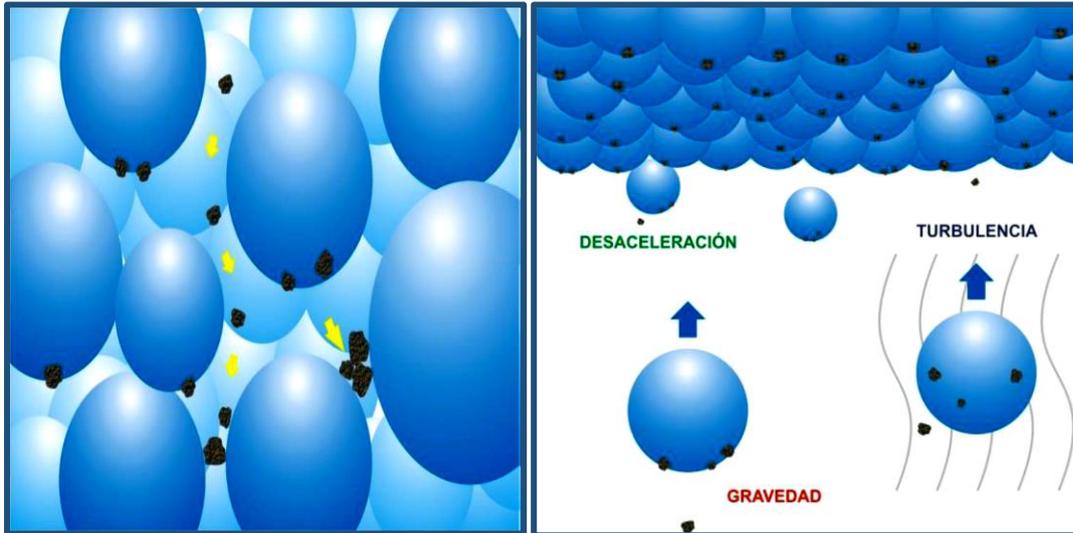
### **2.2.16 Fuerzas de desprendimiento o separación de las burbujas**

Las partículas vinculadas a las burbujas son susceptibles a una variedad de fuerzas que pueden inducir su desintegración o integración. Las partículas pueden liberarse también bajo la influencia de la fuerza gravitatoria o incluso por la desaceleración abrupta que experimentan las burbujas al alcanzar la base de la zona de espuma. En el presente escenario, la turbulencia

inherente a la pulpa resulta en la pérdida de partículas de gran tamaño que habían sido previamente unidas. (HUDBAY, 2023).

**Figura 15**

*Fuerzas de separación partícula-burbuja y comportamientos de las partículas en la espuma*



*Fuente:* (HUDBAY, 2023)

### 2.2.17 Flotación de óxidos de cobre

La flotación por espumas de minerales oxidados es crucial; según varios autores sostienen que los óxidos de cobre flotan directamente si, se encuentran directamente asociados con la partícula mediante colectores de cadena larga de carbón. Las plantas de concentración usan reactivos modificados para sulfurizar los óxidos. Aunque existe una modificación de reactivos colectores para la flotación de óxidos, no son rentables dosificar debido a su alto consumo y altos costos.

La Malaquita ( $\text{CuO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), la Crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) y la cupríta son los principales minerales de tipo oxidado de cobre que se encuentran en la flotación mixto de cobre. Los reactivos que se emplean para sulfurizar este tipo de minerales son:

- ✓ Sulfuro de Sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )

- ✓ Sulfuro ácido de sodio (NaHS)
- ✓ Sulfuro de bario (BaS)

Estos reactivos forman una capa sobre la superficie del mineral de cobre oxidado, donde la porción de sulfuro se disgrega y se conecta al colector para adherirse a la burbuja de aire.

### **2.2.18 Flotación de sulfuros de cobre**

Son minerales valiosos que tiene valor económico que se recuperan a través del proceso de flotación, siendo el cobre más frecuentemente recuperado de sulfuros como la calcopirita, calcosina, bornita, Covelina, tenantina, tetraedrita, enargita, entre otros. La proporción restante se obtiene de minerales oxidados tales como la cuprita, la malaquita, la azurita, la crisocola, la chalcantita y la brochantita. Generalmente, los minerales con azufre exhiben una flotabilidad óptima y equilibrada. Únicamente cuando se observan fenómenos oxidativos o fenómenos secundarios como la depresión por lamas y los productos de reparación, pueden influir en la oxidación, lo que resulta en una reducción de su flotabilidad natural. La pirita, un mineral esencial de hierro presente en el cobre, puede presentar variaciones significativas de un depósito a otro y puede manifestarse en volúmenes significativos que oscilan entre el 3% y el 20%. Las investigaciones relativas a la flotabilidad relativa de diversas especies mineralógicas no han alcanzado una conclusión unificada.

En su mayoría, los minerales sulfurados de cobre se presentan en conjunto con compuestos minerales o de hierro. Además, exhibe una elevada flotabilidad en un entorno ácido. Se postula que un porcentaje elevado representa un deseo en gran proporción y se vincula con la mayoría de los sulfuros de cobre. Es plausible afirmar que los minerales sulfurados de cobre han sido objeto de un número considerable de investigaciones de flotación y reactivos. En consecuencia, poseemos una tecnología simplificada y eficaz en esta disciplina.

### 2.2.19 Raspado de espuma en flotación de mineral mixto

La sustracción de las espumas se ejecuta manualmente con la ayuda con un raspador o paleta para poder ayudar a flotar o botar las espumas cargadas de mineral valioso (ver figura 16). La tasa habitual de raspado representativa es una raspada (ambos lados de la celda) cada cierto tiempo que se forme las burbujas cargadas y concentradas de mineral de cobre.

#### Figura 16

*Raspado de espumas de la celda de flotación*



*Nota.* Raspado de espumas de la celda, Elaboración propia

### 2.2.20 Reactivos y química en la flotación de minerales mixtos

Son compuestos químicos que se utilizan para recuperar los sulfuros de valor, liberando o deprimiendo la ganga e insolubles usando los reactivos podemos elegir los elementos de importancia en sus respectivos niveles de concentración.

En flotación los rendimientos de los reactivos sean colectores o espumantes depende mucho de la composición y constitución mineralógica de la mena.

Los agentes de flotación son los reactivos empleados para un acondicionamiento positivo del proceso, conocidos como agentes reactivos.

### **2.2.21 Dosificación de reactivos**

La dosificación o adición de reactivos, es una de las principales variables de control más empleadas en la flotación, pues son esenciales para la recuperación y la selectividad en el nivel del concentrado. La dosificación de reactivos, depende mucho del tipo y constituyente del mineral, a nivel de laboratorio se dosifica mediante cálculos. (Chuta, 2021)

Estos reactivos requieren de una etapa previa al proceso de flotación, que es crucial para tener en cuenta que los reactivos para la flotación se necesitan un tiempo de preparación para llegar a mezclarse con la pulpa. En algunos casos, se agregan los reactivos en el proceso de molienda para luego llegar en contacto con la mena, mientras que, en otros se agregan al acondicionador o al cajón de descarga del molino de bolas, las dosificaciones de los reactivos a nivel de laboratorio se realiza diferentes dosis en cada prueba de flotación que se realiza y a nivel planta piloto se realiza de acuerdo a la ley de cabeza de cobre.

Los reactivos de flotación desempeñan un rol crucial en este procedimiento. Al ser dosificados o incorporados al sistema, estos desempeñan ciertas funciones que facilitan la recuperación de minerales de valor de la ganga o minerales de escaso valor.

### **2.2.22 Clasificación de reactivos**

#### **2.2.22.1 Espumantes**

Son sustancias químicas que ayudan a estabilizar y formar la espuma en el proceso de flotación. Su función principal es mejorar la captura de minerales valiosos al permitir que se adhieran a las burbujas de aire que se generan durante el proceso. Esto facilita la separación de los minerales deseados de la ganga (material no valioso). Al crear una capa de espuma que se puede recoger, los espumantes facilitan la separación del mineral flotante del material que se queda en el fondo, ayudan a mantener la estructura de la espuma, evitando que colapse y permitiendo que se retenga el mineral.

La utilización de agentes espumantes es fundamental en el proceso de flotación ya que facilitan la formación de burbujas que permiten concentrar el mineral valioso. Es importante controlar la cantidad de espumante para evitar que se produzca un desbordamiento de las celdas, lo cual resultaría en la presencia de impurezas en los concentrados. Por otro lado, si no se utiliza la cantidad adecuada de espumante, las burbujas no flotarán correctamente y el mineral valioso se perderá en el relave. Dado que el espumante aprecia el aire, este compuesto crea una capa alrededor de las burbujas del aire, evitando que las burbujas pequeñas se unen con otras generando burbujas grandes, y contribuyendo a que se eleve rápidamente a la superficie y reviente. Por el contrario, con esta capa alrededor de ellas, las pequeñas burbujas de aire se resguardan entre sí y, al ascender a la superficie, esta capa del espumante evita que se reviente rápidamente.

El Dowfroth 250 se emplea principalmente en la flotación de especies oxidadas y sulfuradas como Cu, Pb, Zn y Co-Ni, así como en metales valiosos como Au y Ag. Además, se aplica en la flotación de óxidos de metal y especies no metálicas.

El tipo de espumante Dowfroth 250 pertenece a la clase de los éteres y se utilizó en el proceso de flotación especialmente para la separación del mineral valioso y para mejor recuperación del cobre, este reactivo ayuda a aumentar la selectividad y la eficiencia.

- ✓ Viscosidad baja
- ✓ Forma líquido cristalino
- ✓ Color incoloro como el alcohol

Es muy eficaz a pH básico, también se aconseja su aplicación en intervalos de pH de 3.5 a 12.3. Normalmente, puede ser utilizado sin diluir. Usualmente se dosifica durante la fase de molienda, o directamente en el circuito de flotación, con intervalos de dosificación de 5 a 100 g/tn, en función del espumante que se emplee en el procedimiento.

### Las características más importantes de un espumante son:

- ✓ En concentraciones reducidas, debe producir espumas con volumen y estabilidad adecuados.
- ✓ Debe contar con condiciones de recolección bajas.
- ✓ A pesar de que no sea necesariamente soluble, debe dispersarse con facilidad en el agua.
- ✓ Cuando se extrae la espuma que sostiene al mineral de la celda de flotación, debe romperse de manera sencilla.

**Figura 17**

*Molécula de espumante y adhesión de espumante*



#### 2.2.22.2 Colectores

Los colectores de flotación de minerales son compuestos químicos que se añaden a los procesos de flotación para separar los minerales valiosos de la ganga (material de desecho). En la flotación de minerales, los colectores hacen algo similar. Se adhieren selectivamente a las partículas de mineral que queremos recuperar, haciéndolas hidrofóbicas (que repelen el agua). Cuando se inyecta aire en la pulpa mineral (una mezcla de agua y mineral molido), las burbujas

de aire se adhieren a las partículas tratadas con el colector y las llevan a la superficie, formando una espuma. Esta espuma se recoge y luego se seca para obtener el concentrado mineral. Son sustancias orgánicas químicas cuyas moléculas poseen un grupo polar y otro no polar. El anión o catión del grupo polar facilitan la absorción del ión del colector en la superficie, mientras que el grupo no polar o hidrocarburo se dirige hacia la fase acuosa, hidrofubando del mineral, dado que dicha orientación conduce a la creación de una película de hidrocarburo hidrofóbico en la superficie del mineral.

El mineral hidrofóbico de una capa del colector se pega a las burbujas del aire que sube arrastrando el mineral valioso hacia la superficie de la pulpa, este reactivo este asociado en la mayor parte a los minerales sulfurados y al aire, pero muy minuciosamente a la ganga o casi nada.

Si no habría colector, no hay quien pegue los sulfuros a las burbujas. En este caso, las burbujas suben sin carga o sin colectar el mineral valioso a la superficie de la pulpa y todos los minerales valiosos se pasan al relave junto a la pulpa.

### **Xantato amílico de potasio (Z – 6)**

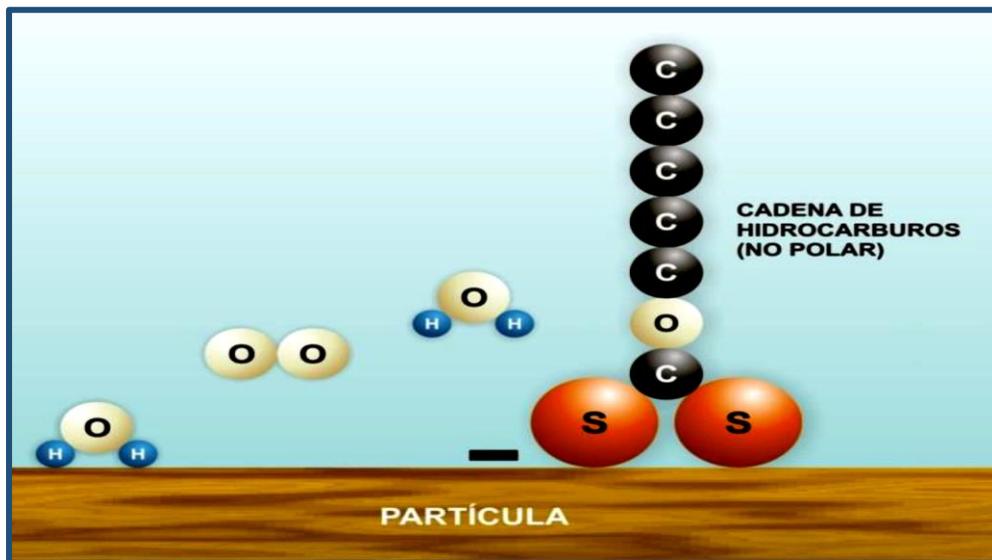
Las características técnicas que poseen incluyen: La formulación química de este compuesto es  $C_6H_{11}OS_2 K$ , también denominada Amil Ditiocarbonato de Potasio. Su peso molecular es de 202.37, su concentración mínima es del 90%, presenta una densidad aparente de 0.47, su pH (solución al 5%) es de 10.8, su solubilidad en agua es total. Su estado físico es sólido, con un color blanquecino a amarillo y un aroma característico de azufre.

Este tipo de reactivo se utiliza combinado en la fase de rugoso o en circuitos de flotación scavenger donde se buscan recuperaciones elevadas. Este producto puede ser utilizado de manera aislada o en combinación con otros dispositivos de recolección. La concentración de este reactivo se sitúa entre 20 y 60 g/tn.

Este representa el xantato Cianamid más eficiente, resultando beneficioso en las actividades que requieren un potente catalizador para los minerales sulfurosos. Frecuentemente se utiliza como promotor en la flotación agotadora previa a una celda a granel, en la que se utiliza un impulsor de mayor selectividad.

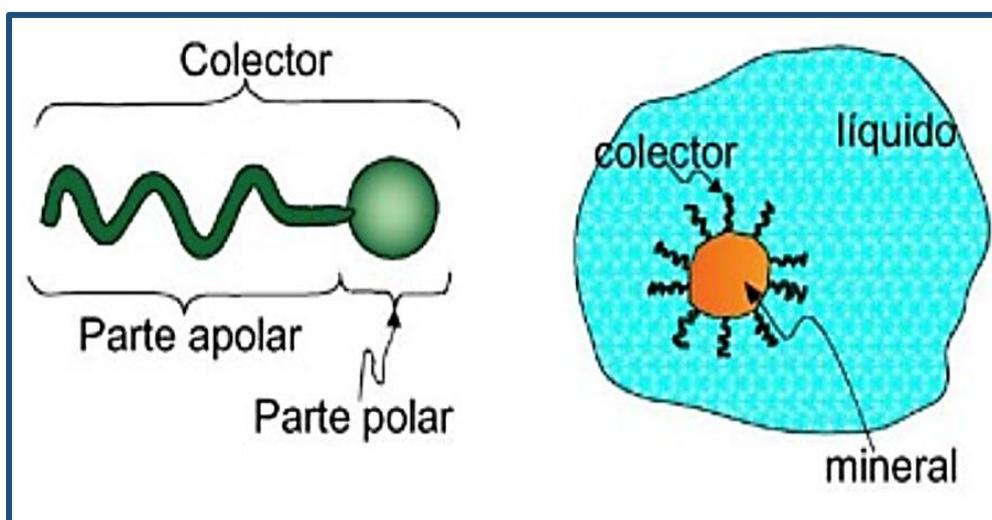
**Figura 18**

*Grupo funcional en la superficie de la partícula*



**Figura 19**

*Adhesión del colector a la superficie del mineral*



Fuente. (Yianatos, 2005)

El colector Z-6 se usó en la flotación por las razones de que este ayuda a mejorar la adherencia de los minerales a las burbujas, este colector Z-6 es colectivo, quiere decir que es un reactivo muchos más fuerte y mejor para los minerales de cobre que colecta a los sulfuros y mínimamente a los óxidos. Actúa con diferentes condiciones de pH y temperatura de la pulpa.

### **2.2.22.3 Modificadores:**

Los modificadores son herramientas fundamentales en la flotación de minerales, ya que permiten ajustar las condiciones del proceso y controlar la interacción entre los reactivos y los minerales, logrando así una separación eficiente y selectiva.

Se comportan como depresores, activadores de regulación del pH y dispersores, permitiendo que el colector flote el mineral de valor, impidiendo que afecte a todos los demás minerales, como la ganga.

“El papel específico de los reactivos modificadores consiste en preparar las superficies de los minerales para la adsorción o desorción de un reactivo específico y así llevar una flotación muy exitosa” (Ortiz, 2015). Se clasifican en tres clases:

- ✓ **Reguladores (modificadores de pH) y dispersores:** se encargan de controlar la concentración de iones y su reacción de acidez o alcalinidad.
- ✓ **Activadores:** cumple la función de propiedades hidrofóbicas del mineral y aumenta la flotabilidad.
- ✓ **Depresores:** hidrolizar la superficie del mineral y su depresión.

### **2.2.22.4 Depresores**

Son sustancias reactivas orgánicas e inorgánicas, empleadas para incrementar la selectividad de la flotación al convertir hidrófilos en ciertos minerales, o sea, obstaculizando su flotación, evitando su flotación. Por ejemplo, depresión de la galena (PbS), depresión de la pirita (FeS) y depresión de sulfuros con cianuro (CN). La función del depresor es deprimir los

minerales no valiosos que no tiene valor, hacer la superficie hidrofílica para que no flote en las celdas y así los concentrados este en buen parámetro lo que es la calidad.

#### **2.2.22.5 Activadores**

“Son reactivos que al ser añadidos o dosificados actúan con la función de activar y hacer flotar a los minerales que son difíciles de flotar a un tiempo determinado, mejora la flotabilidad del mineral” (Ortiz, 2015).

- ✓ **Sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ):** usado para activar la esfalerita y también activa los que han sido deprimidos por el uso de cianuro.
- ✓ **Nitrato de plomo o acetato de plomo ( $\text{PbNO}_3$ ):** activar la estibinita y también activador de cloruro de sodio en la flotación.

#### **2.2.22.6 Reguladores de pH**

Este tipo de reactivo cumple la función de ajustar y mantener la acidez y alcalinidad de la pulpa así trabajar en su estado de óptimo a los reactivos y mejor la flotación de mineral.

Como regulador de pH se usa cal que es muy crucial optimizar la actividad de los reactivos colectores para la mejora del rendimiento del proceso de flotación y contribuir la estabilidad de la espuma.

#### **2.2.22.7 Reactivos dispersantes**

Son reactivos que no permiten estar entrelazados la pulpa más que nada los minerales arcillosos, tratan de disolver o diluir los grumos, se utilizan para evitar la aglomeración y formación de flóculos, mantiene las partículas finas en suspensión en la pulpa como silicato de sodio.

#### **2.2.22.8 Sulfidizante (sulfuros)**

Son reactivos que al ser añadidos realiza el cambio de comportamiento del mineral o sea trata de actuar de mineral hidrofílico a hidrofóbico, es decir transforman los minerales no sulfurosos en sulfuros.

#### **2.2.23 Tiempo de flotación**

El tiempo necesario para que las partículas floten depende de las propiedades del mineral. Es el tiempo que las partículas pasan en la celda, permitiendo que las partículas hidrofóbicas se unan a las burbujas de aire y floten hacia arriba.

Por lo general, el tiempo de flotación puede variar desde segundos hasta varios minutos. El tiempo de la flotación depende mucho de tipo de mineral, hay otros minerales sulfuros que flotan lentamente y por lo tanto se extiende más tiempo de flotación. El tiempo se basa al periodo durante el cual las partículas minerales permanezcan en contacto con las burbujas de aire en una celda de flotación, este factor es muy crucial para que los reactivos actúen sobre las partículas y forme una espuma que contiene mineral valioso.

#### **2.2.24 Cinética de flotación**

Se refiere al estudio de la velocidad a la que las partículas minerales se adhieren a las burbujas de aire y ascienden a la superficie de la pulpa durante el proceso de flotación. Es decir, se enfoca en la rapidez y eficiencia con la que se produce la separación de los minerales valiosos de la ganga, la cinética de flotación es una disciplina que estudia la velocidad y eficiencia de la separación de minerales por flotación esto se establece por modelos matemáticos que acceden especificar la cinética de flotación un campo que analiza la rapidez y eficacia de la separación flotante de minerales.

“Para la cinética de flotación es útil tomar en cuenta los importantes modelos matemáticos que nos permiten explicar dicho comportamiento, así mismo calcular los principales parámetros cinéticos” (Antapaccay, 2019).

Arbiter y Harris señalan la importancia de analizar la producción de espumas en la pulpa de overflow durante la flotación, así como la necesidad de determinar de forma cuantitativa todas las variables relevantes para estudiar este proceso.

Hay diversos procedimientos que facilitan la determinación de la ecuación cinética de la flotación, de los cuales destacamos los más relevantes:

- ✓ El método empírico.
- ✓ El método semi - empírico de García Zúñiga.
- ✓ El método Analógico.
- ✓ El método analítico.

De los métodos mencionados, para el presente trabajo se tomará en cuenta el método Semi- empírico.

El enfoque semiempírico desarrollado por García Zúñiga se basa en el uso de las ecuaciones comparativas que producen ecuaciones que se ajustan dentro de ciertos límites y se reflejan los resultados experimentales. Según sus conclusiones, la recuperación del sistema circulatorio sigue una función exponencial del tiempo, lo que permite alcanzar un gran éxito en el trabajo de investigación.

### **2.2.25 Modelos cinéticos de la flotación de minerales**

Los modelos más utilizados de la cinética de la flotación de minerales son:

### 2.2.25.1 Modelo cinético de García - Zúñiga.

La velocidad de flotación se puede expresar analógicamente a la cinética química, mediante la siguiente expresión matemática.

$$-\frac{dc}{dt} = k \cdot c^n \quad (3)$$

Donde:

$\frac{dc}{dt}$ : variación de la concentración con respecto al tiempo

c: concentración de especies flotables

n: orden de la reacción

k: constante específica de la velocidad de flotación

t: tiempo de flotación

La recuperación ideal en función al tiempo para las operaciones de flotación es:

$$R_t = R_\infty(1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

$$\ln\left(\frac{R_\infty - R_t}{R_\infty}\right) = -kt \quad (5)$$

Donde:

R<sub>t</sub>: recuperación acumulada en el tiempo

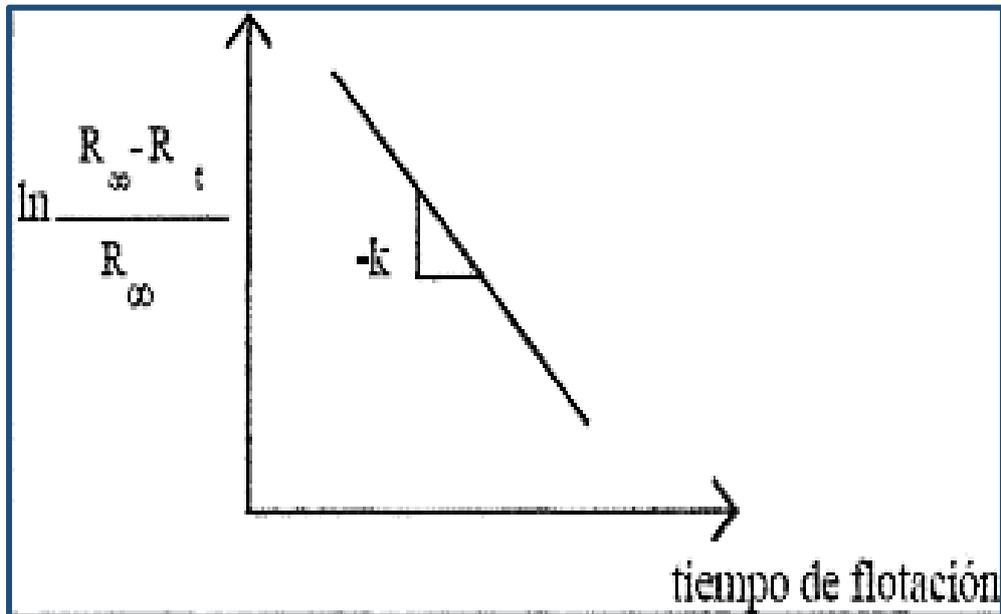
R<sub>∞</sub>: máxima recuperación posible asintótica

k: constante cinética de flotación

t: tiempo de flotación (Guerreros, 2012)

**Figura 20**

*Determinación del valor K*



*Nota.* Cálculo de la constante específica de velocidad de flotación (Guerreros, 2012)

### 2.2.25.2 Modelo cinético de Klimpel

El modelo matemático de Klimpel, nos da mejor interés al cálculo de la constante de flotación “k” para la apreciación y clasificación de reactivos de flotación. Por lo tanto, este modelo lo usamos para el ajuste de datos experimentales y para calcular los parámetros de la cinética de flotación, para describir y predecir el comportamiento de la flotación de minerales a lo largo del tiempo.

Este modelo también tiene en cuenta el tamaño y la flotabilidad del mineral.

$$R(t) = R_{\infty} \left[ 1 - \frac{1}{kt} (1 - e^{-kt}) \right] \quad (6)$$

Donde:

t: tiempo de flotación

Rt: recuperación estimada (%)

R<sub>∞</sub>: recuperación límite a tiempo infinito

k: constante de cinética de la fracción que flota más rápido (Guerreros, 2012)

Este tipo de modelo de Klimpel es ampliamente utilizado debido a su capacidad para ajustar de manera más precisa los datos cinéticos obtenidos en la fase terminal de la curva.

### 2.2.25.3 Modelo cinético de Agar y Barret

En este estudio se aborda la modificación de la fórmula matemática de García Zúñiga, con el propósito de identificar los parámetros del modelo y el tiempo de flotación requerido para observar la recuperación obtenida en ese periodo específico.

$$R(t) = R_{\infty} [1 - e^{-k(t+\theta)}] \quad (7)$$

Donde:

θ: parámetro que permite que la curva ajustada pasa por origen

t: tiempo de flotación

Rt: Recuperación estimada (%)

R<sub>∞</sub>: Recuperación límite a tiempo infinito

k: Constante de cinética de flotación

### 2.2.26 Termodinámica de flotación

“La condición termodinámica de flotación implica la formación de una superficie hidrofóbica en un mineral específico” (Conejeros, 2003).

Es necesario que se cumplan condiciones termodinámicas para que se produzca la adhesión entre una burbuja y una partícula mineral en la práctica. Primero debe tener lugar un

choque físico entre la partícula y la burbuja (colisión) para que esta colisión sea exitosa, es necesario que durante el breve periodo de la colisión ocurra el adelgazamiento y ruptura del film de líquido que los separa creando una nueva interfase mineral/aire tanto la espontaneidad de este proceso como la estabilidad en el tiempo de adhesión dependen de la hidrofobicidad del mineral durante el proceso de adhesión. (HUDBAY, 2023)

En el proceso de flotación, la combinación de burbujas y partículas minerales debe cumplir ciertas condiciones termodinámicas e hidrodinámicas. Primero, debe ocurrir una colisión física entre las partículas y las burbujas, donde la capa de agua que se separa se rompe y crea una nueva interfaz mineral/aire. Este fenómeno es causado por la hidrofobicidad de las partículas, que se adhieren fácilmente a las burbujas pretratadas con reactivos, provocando que se expandan en consecuencia.

La flotación de minerales se basa en la interacción de los tres componentes: líquido, sólido y gaseoso.

En la flotación existen las siguientes interfases:

- ✓ Interfase líquida – gas
- ✓ Interfase sólido - gas
- ✓ Interfase sólida – líquido

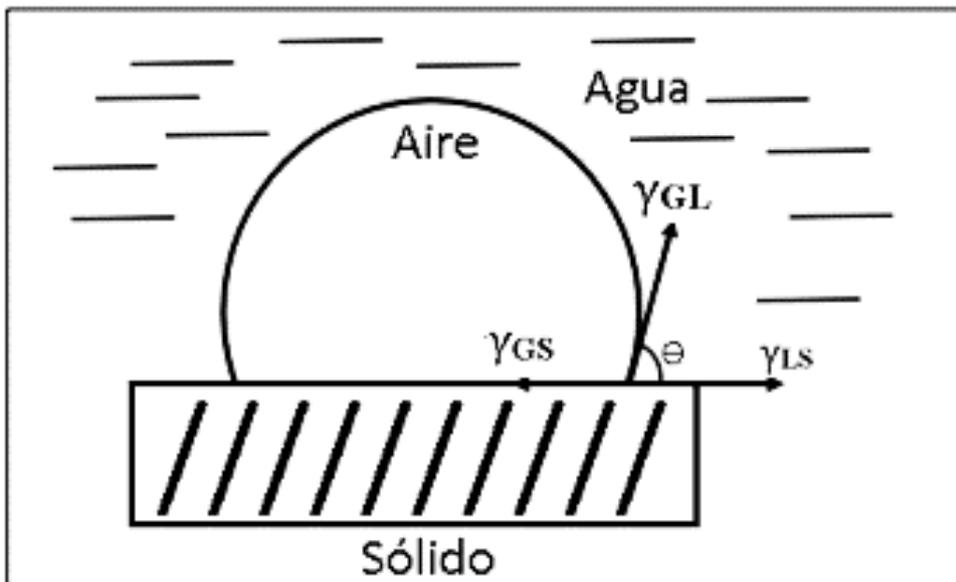
“Dado que la flotabilidad es causada por la superficie de los minerales cuando entran en contacto con el agua, la evaluación de la tensión superficial es crucial, así como la presión en la superficie del agua, que mide la interfaz entre dos fluidos” (Conejeros, 2003).

Las burbujas individuales y las partículas del mineral interactúan de manera inestable en el fenómeno de flotación. Se observa que el grupo conformado por las partículas del mineral y las burbujas tiene un comportamiento más estable a pesar de la inestabilidad del sistema en

general. La segunda ley de la termodinámica permite estimar la probabilidad de que esto ocurra o no.

### Figura 21

Tensión sólido gas,  $\gamma_{GS}$  – Tensión líquido gas,  $\gamma_{GL}$ , - Tensión Sólido líquido  $\gamma_{SL}$



Fuente. (Ballester A. V., 2014)

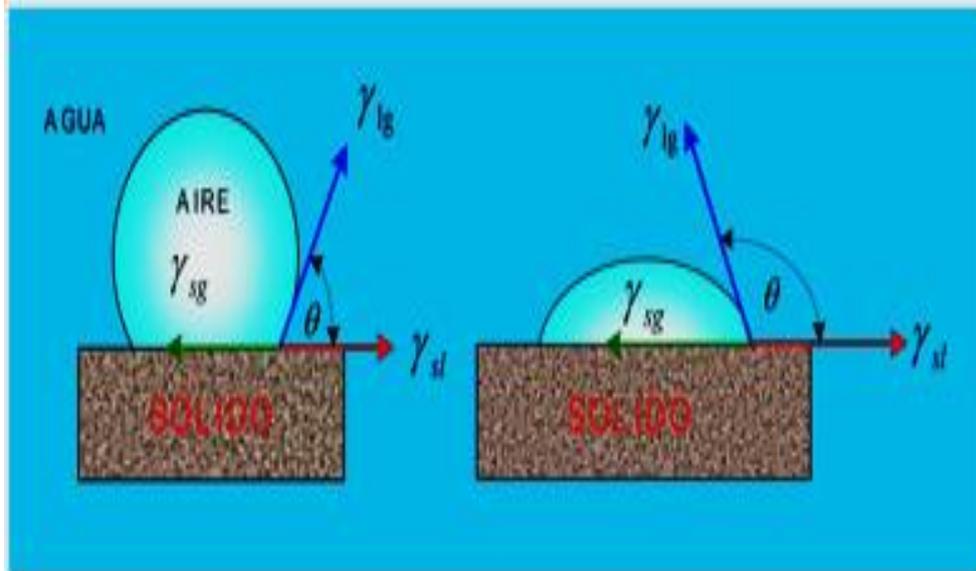
#### 2.2.27 Ángulo de contacto y la ecuación de Young

Se emplea la ecuación de Young para estudiar la espontaneidad de la adhesión. Esta ecuación define un parámetro cuantificable vinculado a la hidrofobicidad, el ángulo de contacto (basado en las tensiones superficiales de las fases actuales).

“Young ha sugerido utilizar el ángulo de contacto de una gota de líquido sobre una superficie sólida plana para equilibrar las tensiones superficiales siguientes: sólido/líquido, sólido/gas y líquido/gas” (Linares, 2014).

**Figura 22**

*Sistema sólido-líquido-gas*



*Fuente:* (Linares, 2014)

El balance de tensiones interfásicas, para el punto O, será igual a cero según la ecuación.

$$\gamma_{gs} - \gamma_{ls} - \gamma_{lg} \cos\theta = 0 \quad (8)$$

Entonces:

Ecuación de Young: 
$$\cos\theta = \frac{\gamma_{gs} - \gamma_{ls}}{\gamma_{lg}} \quad (9)$$

Entonces, sí:  $\gamma_{gs} > \gamma_{ls}$  el ángulo de contacto será  $< 90^\circ$

$\gamma_{gs} < \gamma_{ls}$  el ángulo de contacto será  $> 90^\circ$

Ángulo de contacto bajo ( $\theta < 90^\circ$ ): Indica que el líquido moja bien la superficie sólida, es decir, hay una fuerte adhesión entre el líquido y el sólido.

Ángulo de contacto alto ( $\theta > 90^\circ$ ): Indica que el líquido no moja bien la superficie, es decir, hay una mayor cohesión entre las moléculas del líquido que adhesión con el sólido.

$\theta = 0^\circ$ : El líquido se extiende completamente sobre la superficie.

$\theta = 180^\circ$ : El líquido forma una esfera perfecta sobre la superficie

Si el líquido moja totalmente la superficie del sólido:

$$\gamma_{gs} - \gamma_{ls} = \gamma_{gl} \quad (10)$$

Esta ecuación es fundamental para entender como las interacciones entre los líquidos y los sólidos afectan la flotación y otros fenómenos de separación.

Son aplicados las mismas ecuaciones a las burbujas de aire en contacto con la superficie plana del sólido puesto en medio acuoso. Pese a la ecuación por su forma más simple y de relativa facilidad para medir el ángulo de contacto, donde el problema de este ángulo tiene complejidad. (Espinoza, 2013)

El trabajo  $A$  la fuerza necesaria para mover el agua de la superficie es la misma que la fuerza necesaria para romper el vínculo del agua con la superficie, o sea:

$$A = \gamma_{gs} + \gamma_{gl} - \gamma_{ls} \quad (11)$$

Reemplazando obtenemos:

$$A = \gamma_{gs} (1 + \cos\theta) \quad (12)$$

Por otro lado, la variación de la energía libre por unidad de área se alinea con la unión en la que se produce el movimiento de agua por la burbuja, según ecuación de Dupre.

$$\Delta G = G_f - G_i = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (13)$$

Sustituyendo ecuación 8 tenemos:

$$\Delta G = \gamma_{gl}(\cos\theta - 1) \quad (14)$$

Es muy importante el cambio de energía libre porque se forma debido a la formación de tensión superficial, a medida que aumenta el ángulo de contacto aumenta la probabilidad de flotación.

Evaluando la (ecuación 12) observamos que el ángulo de interacción está estrechamente relacionado con la relación entre la fuerza de unión entre las moléculas de agua y la fuerza de adhesión entre el agua y la superficie mineral.

Si  $\theta = 0$  y, por lo tanto,  $\text{Cos } \theta = 1$ , los minerales que tienen un ángulo de contacto con el agua cero o mayor que la cohesión del agua se denominan hidrofílicos y no flotan termodinámicamente. Sin embargo, si  $\theta$  es un ángulo finito mayor que cero, el trabajo necesario para extraer el agua será menor que  $2\gamma_{gl}$  y, por lo tanto, las fuerzas que unen la superficie del mineral con el agua son menos que las fuerzas de cohesión que rigen entre las moléculas de agua. (Sutulov, 1968).

El ángulo de contacto es un indicador que mide la capacidad de un líquido para mojar una superficie sólida no es más que una medida del carácter hidrofílico de una especie o más directamente del mineral de gran valor. La termodinámica es muy valiosa para los estudios de la flotación porque esto permite las condiciones de las superficies estables del comportamiento de la flotación.

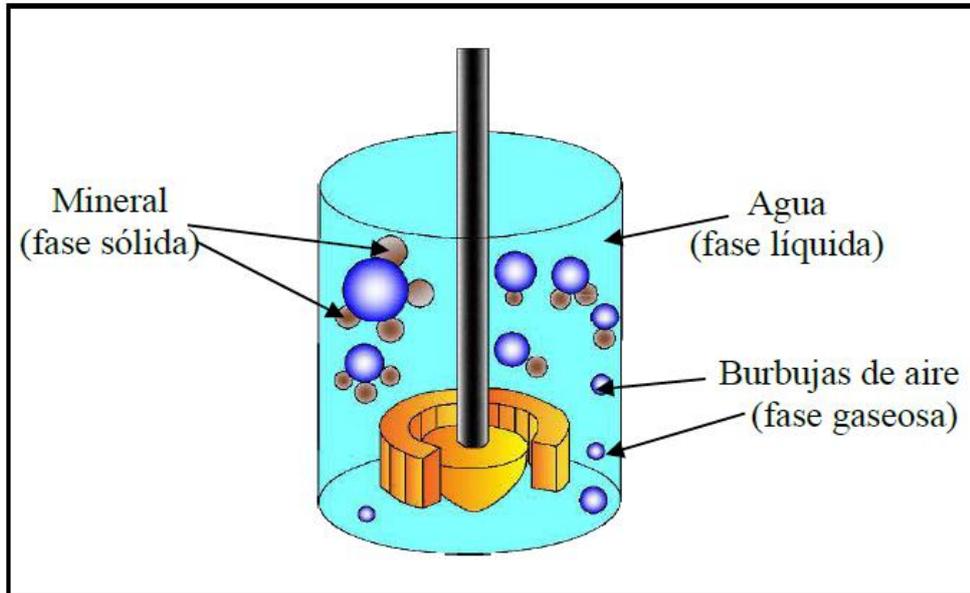
### **2.2.28 Fases en la flotación**

Los minerales hidrofóbicos se adhieren a la fase gaseosa del aire (burbujas), evitando la exposición al agua, mientras que las otras partículas se mantienen en la fase líquida (agua).

Los fragmentos de mineral que se adhieren a las burbujas con una densidad inferior a la del líquido se elevará hacia la región de las espumas y luego se recolectarán mediante canales de recolección. Ver figura 23.

**Figura 23**

*Fases del proceso de flotación*



### **2.2.28.1 Fase líquida**

El agua y los reactivos componen esta fase. El proceso de hidratación superficial de algunos minerales en soluciones acuosas se debe a su carácter polar del agua. En general, contiene iones como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{SO}_4$ . La separación de minerales en la flotación ocurre en la fase de agua.

La fase líquida de flotación es el medio en el que se lleva la separación de minerales, juega un papel crucial en la flotación que facilita el transporte e interacción de las partículas con las burbujas del aire.

Las propiedades del agua están fuertemente influenciadas por los principales procesos de las propiedades de adhesión de las partículas de mineral a las burbujas, las propiedades físico-químicas de la superficie de las partículas y los reactivos que se emplean.

### **2.2.28.2 Fase sólida**

Consta de partículas del mineral fino, y en esta fase, los siguientes factores son muy importantes:

- ✓ El carácter de la superficie del sólido cuando se rompe.
- ✓ Proviene la contaminación de las fases sólidas, líquidas y gases (oxidación superficial)
- ✓ La existencia de trazos en la superficie de los granos, que tienen un impacto mayor que su concentración en el mineral.
- ✓ Algunos minerales tienen características hidrofóbicas (que no tienen apego al agua) e hidrofílicas (que tienen apego al agua), lo que define su capacidad de flotación natural.

La polaridad de cada mineral está directamente relacionada con esto.

### **2.2.28.3 Fase gaseosa**

Contiene principalmente aire, a veces otro gas se infiltra en las celdas de flotación y se propaga en forma de pequeñas burbujas a lo largo de toda la celda de flotación.

## **2.2.29 Interfases en la flotación**

Principalmente, debe ocurrir una colisión entre la partícula de mineral y la burbuja. Se requiere que la capa de líquido que los separa se adelgace y se rompa durante la colisión, lo que permite la formación de una nueva interfase mineral-aire. Es imprescindible que el mineral posea una propiedad hidrofóbica para que este fenómeno suceda de manera natural y la adhesión sea estable.

### **2.2.29.1 Tensión superficial**

En el proceso de flotación, hay fuerzas intermoleculares que de alguna manera mantienen unidas las moléculas que la forman. Por ejemplo, si se toma en cuenta una molécula situada en el seno de un líquido esta estará envuelta por moléculas de su misma naturaleza lo

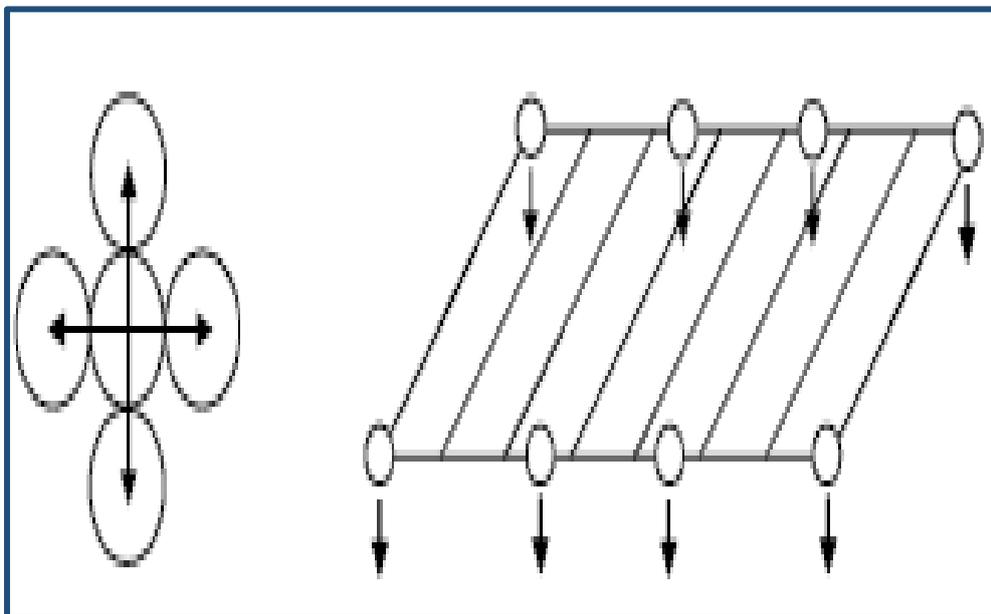
que provoca una compensación de las fuerzas de atracción intermoleculares generando un balance energético.

La característica que regula la adhesión entre partícula y burbuja se denomina energía libre superficial.

La tensión superficial es una fuerza dirigida al interior de la fase y perpendicular al plano. Se produce como resultado del desequilibrio de fuerzas cuando una molécula interactúa con todos sus vecinos.

### Figura 24

#### *Tensión superficial*



*Fuente.* (Castro S. , 1998)

La fuerza descompensada producida por  $\gamma$  es igual a las fuerzas intermoleculares presentes en una fase.

La magnitud de la tensión superficial tiene una correlación directa con la intensidad de las fuerzas entre moléculas. Como resultado, es posible calcular el orden de magnitud de la tensión superficial del líquido si se conoce su naturaleza química.

### **2.2.29.2 Adsorción**

La flotación es un procedimiento que implica el análisis de las características de las interfaces, uno de los métodos para describir una interfase es mediante la evaluación de su adsorción. La adsorción se puede definir como el aumento de una sustancia química (iones y moléculas) en una interfase, usualmente con una unidad de mol.

### **2.2.29.3 Fenómenos eléctricos en la interfase**

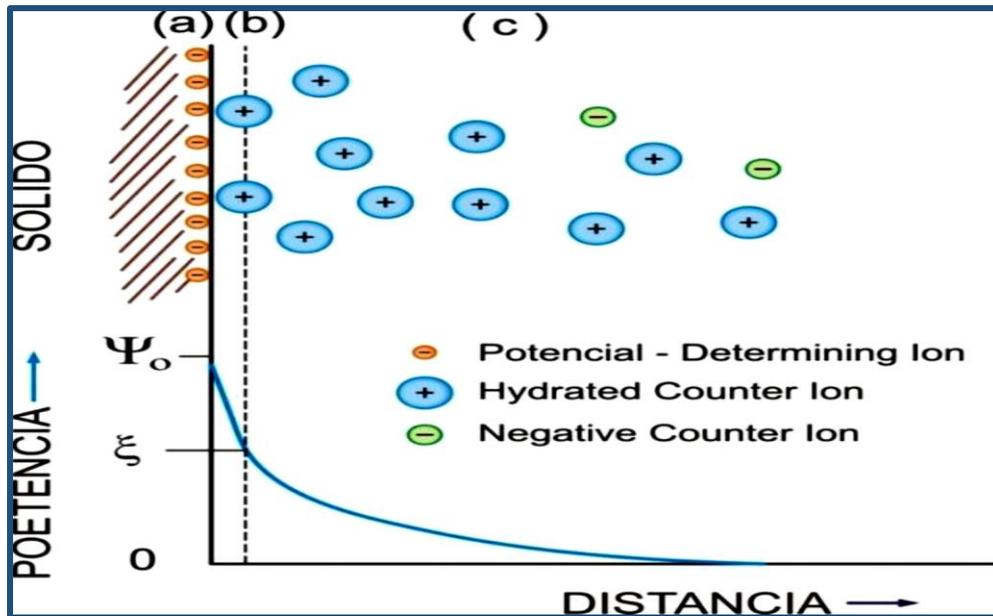
La carga eléctrica de los sólidos en una pulpa de agua atrae una atmosfera compuesta por iones de carga contraria una porción de la atmosfera es difusa y la carga superficial junto con la capa difusa, conforma la doble capa eléctrica. Este movimiento diferencial de los componentes de la doble capa eléctrica conduce a la desaparición de un potencial eléctrico (potencial electrocinética), conocido como potencial zeta.

La formación de la doble capa eléctrica se debe a la interacción entre las cargas en la superficie del sólido y los iones en la solución.

La estructura de doble capa eléctrica abarca la zona de conexión entre dos fases. Incluye una disposición complicada de la carga eléctrica que surge de la transferencia de carga entre las fases, la adsorción de los iones positivos y negativos, la dipolarización del momento en las moléculas y la polarización de la carga eléctrica en ellas.

**Figura 25**

*Representación esquemática de la doble capa eléctrica*



*Nota.* La figura representa caída de potencial eléctrico (HUDBAY, 2023)

## 2.4 Bases conceptuales (definición de términos básicos)

### 2.4.1 Ley

“Contenido de metal puro en comparación con el mineral trabajado, usualmente expresado en porcentaje u onzas/tonelada” (Burga, 2011).

### 2.4.2 Pulpa

Es una mezcla de dos componentes mineral molido y agua en forma de suspensiones de tal forma que su comportamiento y las características se pueden estudiar.

### 2.4.3 Relave

Son minerales inorgánicos desechados del procesamiento de mineral separados de los productos valiosos, donde ya no tienen valor ni rendimiento económico.

### 2.4.4 Calidad

Es la capacidad que pone un objeto para satisfacer las necesidades implícitas y explícitas cumpliendo los requisitos de la calidad de acuerdo a un parámetro.

#### **2.4.5 Concentrado**

Se trata del producto final de la separación beneficioso de los minerales con valor económico de la ganga mediante un proceso que contiene en una mena.

#### **2.4.6 Mineral**

“Sustancia sólida y compuesto inorgánico de origen natural que tiene la composición química y estructura cristalina definida” (Burga, 2011).

#### **2.4.7 Óxido**

“Son minerales que poseen en su estructura molecular el elemento oxígeno. Por ejemplo, magnetita, cuarzo y corindón o secundarios como la cuprita, zincita, hematita, entre otros” (Burga, 2011).

#### **2.4.8 Sulfuros**

Están compuestos de azufre y otros elementos que pertenecen a las minerales sulfurados como piritita, calcopiritita, blenda, galena, etc.

#### **2.4.9 Mixto**

Se refiere a un mineral que contiene una combinación de diferentes minerales en una sola fase o cristal.

#### **2.4.10 Dosificación**

Es la acción que se gradúa la dosis de una cantidad o porción precisa de una solución de los reactivos.

#### **2.4.11 Razón De Concentración**

Es un indicador que evalúa la eficacia del proceso de metalurgia, donde nos permite para obtener la cantidad de toneladas de mineral necesaria para obtener una tonelada del concentrado.

## **CAPÍTULO III:**

### **HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1 Hipótesis**

##### **3.1.1 Hipótesis general**

Determinando las variables operacionales adecuadas se incrementará la recuperación de cobre por flotación de los minerales mixtos del yacimiento minero Anccasilla Sol Candente I de Chiara.

##### **3.1.2 Hipótesis específicas**

**HE1:** El tamaño de las partículas del mineral más adecuado le corresponderá a 60% malla - 200.

**HE2:** La dosificación adecuada del colector Z-6 permitirá una buena recuperación y calidad de concentrados de cobre.

**HE3:** El tiempo de flotación necesaria para separar el mineral valioso de la ganga será de 10 minutos.

#### **3.2 Variables de investigación**

##### **3.2.1 Identificación de variables**

###### **Variable Dependiente**

- ✓ Recuperación eficiente del cobre (Y)

###### **Variable Independiente**

- ✓ Granulometría (A)
- ✓ Dosificación del reactivo colector Z-6 (B)
- ✓ Tiempo de flotación (C)

### **Variables intervinientes**

- ✓ Diseño de la celda
- ✓ Oxidación del mineral
- ✓ Dureza del mineral

### **Indicadores**

- ✓ Porcentaje (%)
- ✓ Tamaño de grano ( $\mu\text{m}$ )
- ✓ Gramos por tonelada (g/tn)
- ✓ Minutos (min)

### 3.2.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

**Tabla 2:**

*Operacionalización de variables*

VARIABLE	Definición teórica	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidades	Instrumento
<b>Dependiente: Recuperación eficiente de cobre</b>	Es la cantidad de cobre recuperado en porcentaje eficientemente por el proceso de flotación de los minerales mixtos.	Realizar los ensayos controlando las variables de flotación a través de pruebas experimentales a nivel de laboratorio para recuperar concentrados de cobre.	Cantidad de cobre recuperado como concentrado	Porcentaje	%	Balanza de materia y balanza de precisión.
<b>Independientes:</b>						
<b>Granulometría</b>	Es la medición de los granos de las partículas del mineral que se pueden obtener a través de distribución de mallas o por diferentes métodos.	Mediante el juego de mallas se realiza el análisis granulométrico para determinar el P80	Grado de liberación	Tamaño de grano	µm	Tamaño de malla.
<b>Dosificación de reactivos de flotación</b>	Es la cantidad de reactivos que se adicionan en el proceso de flotación en función a la cantidad del mineral a procesar.	Realizando pruebas de flotación metalúrgica a diferentes dosis, se establece la cantidad adecuada de reactivos en gramos por tonelada.	Dosis de reactivos adecuados	Gramos por tonelada	g/tn	Cálculos
<b>Tiempo de flotación</b>	Tiempo promedio de retención de las partículas valiosas en la celda de flotación.	Con ayuda de un cronómetro se mide el tiempo de flotabilidad del mineral de cobre en la celda.	Tiempo de flotabilidad	Minutos	min.	cronómetro

## CAPÍTULO IV:

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.1 Ámbito de investigación

El presente trabajo de investigación, tomó como estudio el mineral procedente de la zona del distrito de Chiara provincia de Andahuaylas, específicamente del yacimiento minero Ancasilla Sol Candente I. Las pruebas metalúrgicas son realizadas en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

##### 4.2.1 Localización política, geográfica.

El yacimiento minero se encuentra políticamente ubicado en:

- Distrito : Chiara
- Provincia : Andahuaylas
- Departamento: : Apurímac

La provincia de Andahuaylas de encuentran en las siguientes coordenadas geográficas.

Latitud: 13°52'19" S

Longitud: 73°40'12"O

Cuyos niveles altitudinales oscilan entre 3250 m.s.n.m., abarcando un área de 148.92 km<sup>2</sup>.

Mapa de Andahuaylas – Apurímac

## Figura 26

### Mapa de Andahuaylas - Apurímac



*Nota.* Ubicación de Andahuaylas – Apurímac. Recuperado de Google maps.

### 4.2 Método de investigación

Este presente trabajo de tesis es de carácter tecnológico aplicada, partiendo de los conocimientos teóricos y transformándolos en conocimientos prácticos. Es decir, una aplicación teórica al procesamiento por flotación de los minerales mixtos de cobre seleccionando las variables operacionales que influya en la recuperación de cobre.

### 4.3 Tipo de investigación

Es de tipo cuantitativo de carácter experimental, cuantitativo porque se realiza la manipulación de los variables más relevantes de la variable independiente escogidos anteriormente y observar su reacción en la variable dependiente, a través de la observación y el estudio.

La investigación es experimental, porque se realizaron los distintos ensayos metalúrgicos de flotación con variables manipulados a nivel de laboratorio, para obtener concentrados de cobre.

#### 4.4 Alcance de investigación

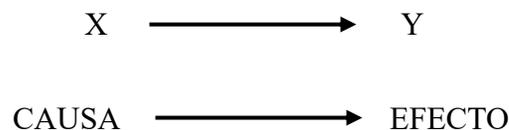
La investigación es de alcance explicativo porque permite determinar las causas de las variables independientes cuyo efecto lleva a la variable dependiente (recuperación de concentrados de cobre).

#### 4.5 Diseño de investigación

Este trabajo de investigación es experimental puro, porque se efectúa la manipulación más de una variable independiente para llevar a mejorar y elevar el porcentaje de recuperación del cobre a partir de los variables independientes. En esta investigación hubo cambio de los valores de las variables independientes y se determinó la efectividad con la variable dependiente.

Para señalar las influencias de las variables operacionales del proceso de flotación de los minerales mixtos de cobre, en este diseño se considera un solo grupo experimental.

En esta presente investigación las causas son: granulometría, dosificación de reactivos, tiempo de flotación y el efecto es el porcentaje de recuperación eficiente de cobre como consecuencia de estas variables.



Donde:

X: variable independiente, que se manipula (causa)

Y: variable dependiente, es el efecto

## **Diseño factorial $2^k = N$**

Con la metodología del diseño factorial  $2^k$ , se estudió los efectos de los factores en dos categorías de cada uno, con respecto a las respuestas. Se indaga estudiar la conexión entre los factores y las respuestas. Este estudio consta de  $2^3$ , en otras palabras  $2*2*2 = 8$ , son ensayos o pruebas de diseño.

$$2^k = N$$

Donde:

2: niveles de pruebas

K: factores o número (3 variables)

N: número de experimentos (8 pruebas)

Para una mejor comprensión de este diseño es apropiado establecer lo siguiente:

**Niveles de un factor.** Se refiere a los diferentes valores atribuidos a un factor en un experimento, o sea, el nivel de intensidad de un factor.

**Combinación de tratamiento.** Es la totalidad de los elementos utilizados en una experiencia específica, es decir, cualquier mezcla particular de niveles de factores.

**Respuesta.** Es la cifra resultante de una experiencia que se convierte en la variable dependiente.

**Efecto de un factor.** Se refiere a la alteración en la respuesta generada por una variación en el nivel del factor únicamente en dos niveles; el efecto, es únicamente que existe una diferencia entre los promedios de los resultados de todo el conjunto de la experiencia en el nivel alto menos los promedios del nivel bajo.

**Interacción.** Es la reacción diferencial a un factor en combinación con niveles variables de un segundo factor aplicado al mismo tiempo, la interacción se refiere al efecto adicional o conjunto, originado por la influencia conjunta de dos o más factores.

#### **4.6 Población de estudio**

La población se considera a todo el mineral mixto con contenido de cobre proveniente del Yacimiento Minero Ancasilla Sol Candente I, destinados para las pruebas experimentales. (Echenique, 2017)

#### **4.7 Validez y confiabilidad de instrumentos**

Los instrumentos de investigación que se utilizó son equipos, materiales y reactivos netamente operativos que funcionan para el proceso de flotación, el cual en la experimentación tuvimos la recolección de datos para luego analizarlo e interpretar, variando algunos parámetros como la granulometría, dosificación de reactivos y tiempo de flotación, luego de obtener los resultados daremos a conocer en el presente informe. El trabajo de investigación realizado es validado y es altamente confiable porque trabajamos con la muestra extraído del sector de Ancasilla sol Candente I en el laboratorio metalúrgico para conocer los parámetros.

#### **4.8 Plan de análisis de datos**

**Procesamiento de Resultados:** Con los datos que hemos obtenido en las pruebas de laboratorio, se realizó una evaluación estadística, para tal fin lo usamos el software Minitab y Microsoft Excel, así mismo, los resultados se presentan en cuadros y gráficos con su respectiva interpretación.

**Análisis de resultados:** Los resultados son analizadas correlacionando las variables para poder observar el tipo de distribución de nuestros datos experimentales para luego hacer un análisis ANOVA; para determinar las variables que tienen mayor influencia en el trabajo de investigación

que se desarrolló, a su vez las hipótesis planteadas son analizadas para poder validarlas o desmentirlas.

#### **4.9 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

##### **Técnicas**

- Revisión bibliográfica
- Reporte de análisis químico
- Pruebas metalúrgicas experimentales de reactivos
- Pruebas de la molienda

##### **Instrumentos:**

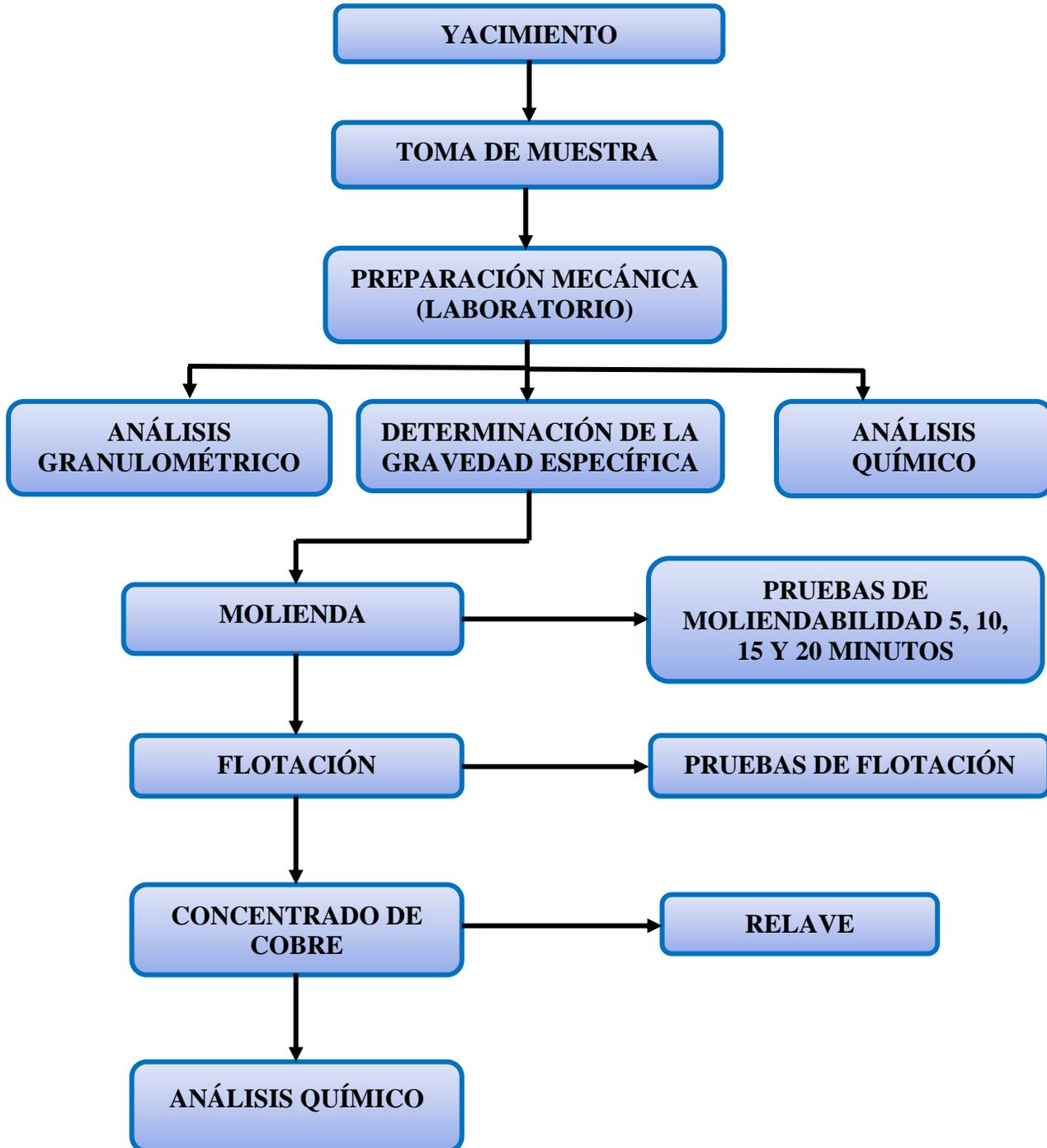
- Equipos de laboratorio
- Balanza electrónica
- Juego de tamices
- Probetas
- pH metro
- Vaso precipitado
- Software Minitab 20

#### **4.10 Metodología seleccionada y aplicada al proceso de flotación**

- Chancadora de Mandíbula: Nos permitió triturar la muestra de mineral hasta un tamaño de 1/4" malla Tyler.
- Chancadora Cónica: Triturara la muestra proveniente de la chancadora de mandíbula hasta un tamaño de 100% - 10 malla Tyler.

- Molino de Bolas de Laboratorio: Permite moler el mineral hasta un tamaño de 80% -200 malla Tyler.
- Medidor portátil de pH marca METTLER TOLEDO, permite medir el pH de la pulpa de mineral.
- Balanza Marcy: Nos permitió medir la densidad de la pulpa y el porcentaje de sólidos de la pulpa.
- Balanza Electrónica nos ayudó a realizar el pesaje del reactivo que se dosificará para la flotación y la cantidad de mineral al momento de iniciar el proceso.
- pHmetro
- Cronometro
- La capacidad y eficiencia de estos equipos e instrumentos contribuyó en la cuantificación de forma adecuada y significativa de las mediciones que se desarrolló, ya que son las fuentes de validez y confiabilidad del trabajo de investigación.

## Diagrama del procedimiento experimental



*Nota.* Este diagrama muestra el procedimiento del desarrollo de la metodología utilizado en la investigación. Elaboración Propia

## **CAPÍTULO V**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

La evaluación de los parámetros de las variables operacionales del proceso de flotación por espumas, se requirió un trabajo experimental para ver en cuanto y cuáles de los parámetros que influyen en la mejor recuperación de cobre. Por consiguiente, se trajo la muestra de mineral mixto de cobre del yacimiento minero Ancasilla Sol Candente I, la muestra se procesó en el laboratorio de procesamiento de minerales en la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC.

El objetivo de esta investigación es determinar las variables operacionales en el proceso de flotación para recuperar eficientemente el contenido de cobre de los minerales mixtos.

#### **5.1 Muestreo en yacimiento**

Se hizo un muestreo representativo del mineral de 40 kg en el yacimiento del minero artesano, se usó el método de muestreo por puntos GRAP SAMPLING que esta representa de 20 kg para la preparación de la muestra para el proceso de experimentación. (Egg, 1995)

#### **Materiales y equipos**

Se utilizaron las siguientes materiales y equipos.

- Pico
- Pala
- Comba
- Cincel
- Saco minero
- Cinta adhesiva
- Plumón

### **5.1.1 Toma de muestra**

Se tomó una muestra de forma aleatoria representativa de un total de 40 Kg de mineral mixto con contenido de cobre. Las cuáles son evaluadas en el laboratorio de procesamiento de minerales de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Abad del Cusco (UNSAAC) para su respectiva preparación mecánica (chancado y molienda). Posteriormente se realizó las pruebas experimentales de flotación en el laboratorio en un determinado tiempo.

El muestreo se realizó mediante la obtención de pequeñas muestras de mineral mediante el método por muestreo por puntos, que representa las cualidades y propiedades físicas y químicas del mineral original a ser tratado.

### **5.2 Preparación de la muestra**

La muestra fue traída y recepcionada en laboratorio para ser preparada previamente, es decir son trituradas en una chancadora de laboratorio, luego se preparan las muestras para diferentes ensayos como análisis químico, granulometría, gravedad específica (G.E.), la caracterización mineralógica y liberación de los minerales valiosos mediante el proceso de flotación con las variables decididas o seleccionadas para el análisis de los resultados y discutir posteriormente. Los resultados de análisis químico de presentan a continuación.

#### **Equipos y materiales**

- Mineral mixto de Cu (40 kg)
- Bolsas plásticas
- Chancadora quijada 5x6 MOTEUR C.A.
- Chancadora cónica 3x4 BALDOR
- Chancadora de rodillos 10x8 VYMSA

- Balanza de precisión
- Mallas ASTM
- Brochas
- Mortero
- Comba
- Plumón indeleble para rotulado

### **Procedimiento**

- Se toma una muestra de 40 kg que proviene del yacimiento para reducirlo manualmente de su tamaño hasta un aproximado de 3 pulgadas, para luego obtener una representativa de 20 kg.
- Los 20 kg del mineral se reducen en una chancadora de quijadas de dimensiones 5”x6” hasta la obtención del tamaño del producto de 100% -1/4 malla.
- Se continua con la reducción del tamaño en la chancadora cónica hasta obtener un producto de 100% -10 malla, los productos retenidos a malla 10 se fracciona en la chancadora cónica hasta minimizar el tamaño cual sea posible o manualmente en el mortero con la comba hasta llegar a un 100% -10 malla.
- Homogenizar la muestra (100% -10 malla) unos 10 veces y luego cuartear, a partir de esta muestra se obtuvo 200 gramos de una muestra representativa para realizar un análisis químico.
- Finalmente se pesa y se rotula las muestras representativas debidamente etiquetados.

### **5.3 Análisis químico**

Se realizaron los ensayos de análisis químico enviando las muestras pulverizadas a un laboratorio químico. (VER ANEXO 2).

**Tabla 3**

*Análisis químico*

ELEMENTO	Au	Ag	Cu	Cu Ox
METODO	CMP-09	CMP-04	CMP-01	CMP-06
UNIDAD	Oz/Tc	Oz/Tc	%	%
NEWMONT	Ley de Au	Ley de Ag	Ley de Cu	Ley de Cu Ox
Mineral Au-Ag-Cu	0.088	1.610	9.40	1.49

*Nota.* Elaborado el análisis químico en Laboratorio Control minerals, Arequipa.

### **5.3.1 Determinación de la gravedad específica del mineral**

Se determinó la gravedad específica del mineral por el método de la fiola.

#### **Materiales y equipos**

- Mineral 10g (100% -10 Mallas)
- Agua destilada 1L
- Fiola de 100 ml
- Pizeta
- Espátula
- Balanza de precisión
- Embudo de vidrio
- Probeta de 1L
- Calculadora

- Brocha

### Procedimiento

- Pesar 30g de mineral para 3 pruebas, cada prueba de 10 g
- Pesar la fiola vacía y seca
- Pesar fiola más agua destilada
- Pesar fiola más muestra de mineral
- Pesar fiola, más agua destilada, más mineral

### Figura 27

*Determinación de la gravedad específica*



*Nota:* Realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales.

Se realiza el cálculo de la gravedad específica utilizando la siguiente fórmula matemática:

$$GE = \frac{M}{(FA-F)-(FAM-FM)} \quad (15)$$

Donde.

M: peso de mineral

F: peso de fiola

FA: peso de fiola más peso de agua

FM: peso de fiola más peso de mineral

FAM: peso de fiola más peso de agua más peso de mineral

**Tabla 4**

*Cálculo de peso específico*

Nomenclatura	Pesos experimentales		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
<b>M</b>	10	10	10
<b>F</b>	56.2	56.6	55.4
<b>FA</b>	155.7	155.9	155.2
<b>FM</b>	77.2	66.6	66.1
<b>FAM</b>	162.2	162.2	161.6

*Nota:* Elaborado por los tesisistas; realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales.

**Tabla 5**

*Resultados de la gravedad específica*

Pruebas	Gravedad específica (x)	x <sup>2</sup>
<b>1</b>	2.856	8.162
<b>2</b>	2.873	8.254
<b>3</b>	2.865	8.208
<b>SUMA</b>	<b>8.595</b>	<b>24.624</b>

*Nota:* Elaborado por los tesisistas; realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales.

### **Cálculo de la media aritmética**

Se utiliza la siguiente expresión matemática.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (16)$$

Calculando el promedio de la gravedad específica:

$$\bar{x} = \frac{2.856 + 2.873 + 2.865}{3}$$
$$\bar{x} = 2.864$$

## **Resultados**

Se realizó de tres pruebas de gravedad específica teniendo como resultado de la gravedad específica promedio: GE = 2.86g/ml.

### **5.4 Pruebas de moliendabilidad**

Determinar el tiempo adecuado de la molienda para este tipo de mineral sulfurado mixto de cobre, del yacimiento minero Ancasilla Sol Candente I para las respectivas pruebas de flotación.

Las pruebas de molienda se realizaron con la finalidad de obtener un modelo matemático que nos permite a ver el tiempo óptimo de la moliendabilidad.

## **Materiales y equipos**

- 4 kg de mineral 100% a -10 malla
- Molino de bolas
- Malla 200 serie ASTM
- Balanza electrónica
- Cronómetro
- Brocha
- Bolsas plásticas
- Pasar a malla -200 y pesar el porcentaje de pasante y porcentaje de retenido.

## Procedimiento

- Pesar 1 kg de mineral para cada ensayo de molienda (total de 4 pruebas)
- Realizar la molienda a distintos periodos de tiempo: 5, 10, 15 y 20 minutos.
- Realizar el tamizado a 200 malla.
- Efectuar la gráfica % pasante (-200 malla) versus tiempo de molienda para las 4 pruebas.
- Establecer el período de molienda para 60% -200 malla.

## Figura 28

### *Prueba de molienda*



*Nota:* Realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales.

### **5.4.1 Determinación del tiempo de molienda**

Para establecer el tiempo de la molienda se tomaron 4 tiempos distintos de (5, 10, 15 y 20 minutos), los productos obtenidos de cada tiempo fueron analizados e interpretados de manera granulométrica para construir la curva de moliendabilidad.

Los ensayos de molienda se realizaron en molino de bolas de laboratorio, el siguiente cuadro nos muestra los resultados obtenidos.

**Tabla 6**

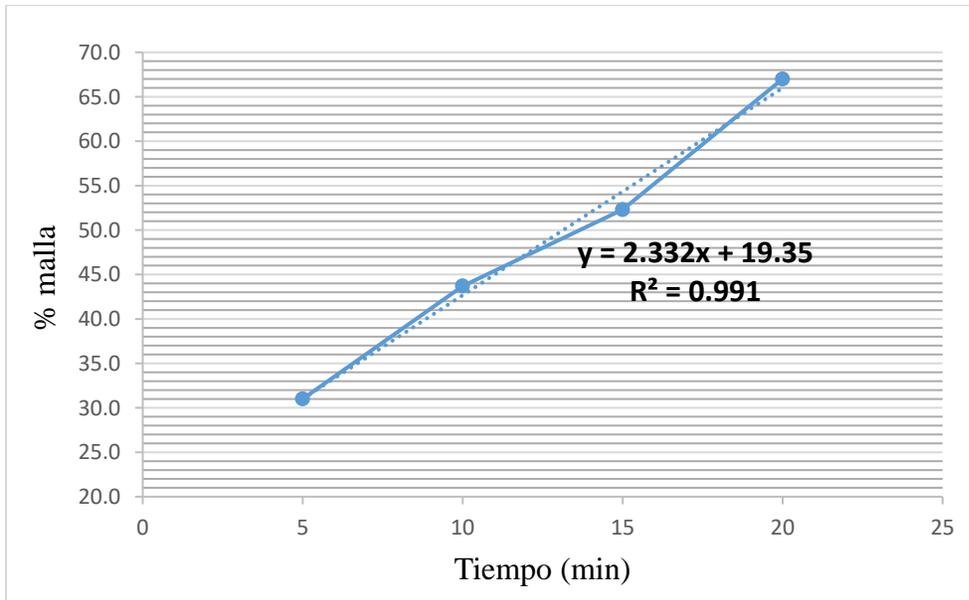
*Resumen de tiempo de molienda*

<b>MOLIENDA</b>				
<b>N°</b>	<b>TIEMPO (MIN)</b>	<b>PESO DE MUESTRA (g)</b>	<b>RETENIDO (%) 200 MALLA</b>	<b>PASANTE (%) -200 MALLA</b>
<b>1</b>	5	100	69.0	31.0
<b>2</b>	10	100	56.3	43.7
<b>3</b>	15	100	47.7	52.3
<b>4</b>	20	100	33.0	67.0

*Nota.* Realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales.

**Figura 29**

*Curva de moliendabilidad*



*Nota.* Realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales. Elaboración propia

Según la ecuación obtenida por el gráfico, se despeja el valor de “x” y se reemplaza el valor de “y” por 60, de esta manera se obtiene el tiempo necesario de la molienda y óptimo para que el mineral quede a un 60% malla -200.

$$y = 2.332x + 19.35 \quad (17)$$

Despejando

$$x = \frac{y-19.35}{2.332} \quad (18)$$

Reemplazando “y” por 60

$$x = \frac{60-19.35}{2.332} = \frac{40.65}{2.332}$$

$$x = \mathbf{17.43}$$

Reemplazando “y” por 55

$$x = \frac{55-19.35}{2.332} = \frac{35.65}{2.332}$$

$$\mathbf{X = 15.30}$$

Reemplazando “y” por 57.5

$$x = \frac{57.5-19.35}{2.332} = \frac{38.15}{2.332}$$

$$\mathbf{X = 16.40}$$

### Tabla 7

*Resultados de tiempo de molienda*

<b>% pasante (-200 malla)</b>	<b>Tiempo (min)</b>
<b>60</b>	17.43
<b>55</b>	15.30
<b>57.5</b>	16.40

*Nota.* Elaboración propia

El tiempo necesario para la molienda de este mineral para alcanzar un nivel de granulometría de 60% -200 malla en el molino de bolas de laboratorio de procesamiento de minerales es de 17 minutos y 16 segundos.

**Tabla 8**

*Análisis de varianza de granulometría*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Granulometría</b>	2	0.2051	0.10253	4.01	0.062
<b>Error</b>	8	0.2047	0.02559		
<b>Total</b>	10	0.4098			

*Nota.* Data de software Minitab 20

**Tabla 9**

*Resumen del modelo y media de granulometría*

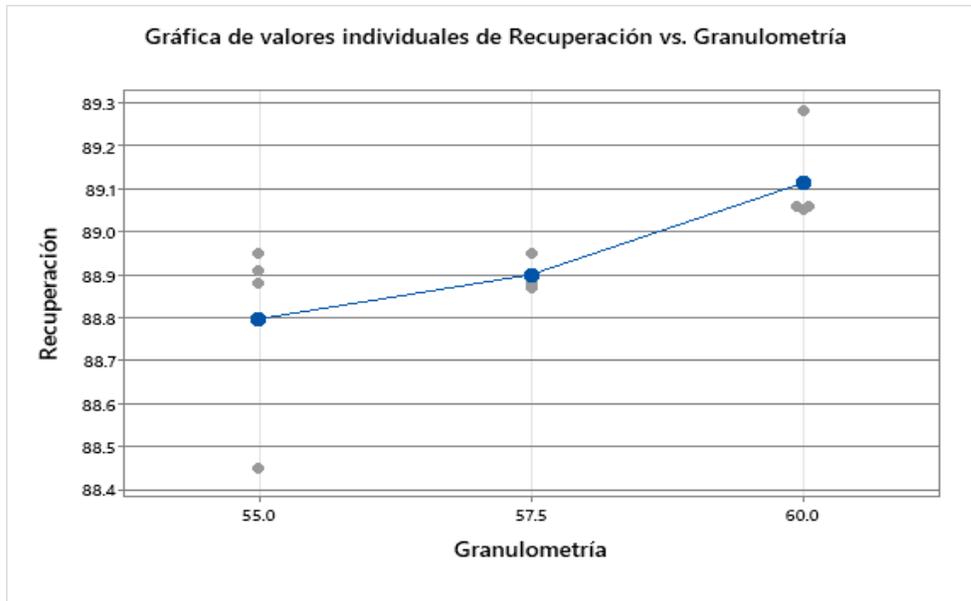
S	R-cuadrado	R cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
<b>0.159980</b>	50.04%	37.55%	10.74%

Granulometría	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
55.0	4	88.797	0.233	(88.613, 88.982)
57.5	3	88.9000	0.0436	(88.6870, 89.1130)
60.0	4	89.1125	0.1118	(88.9280, 89.2970)

*Nota.* Data de software Minitab 20

**Figura 30**

*Gráfica de valores individuales de Recuperación vs Granulometría*

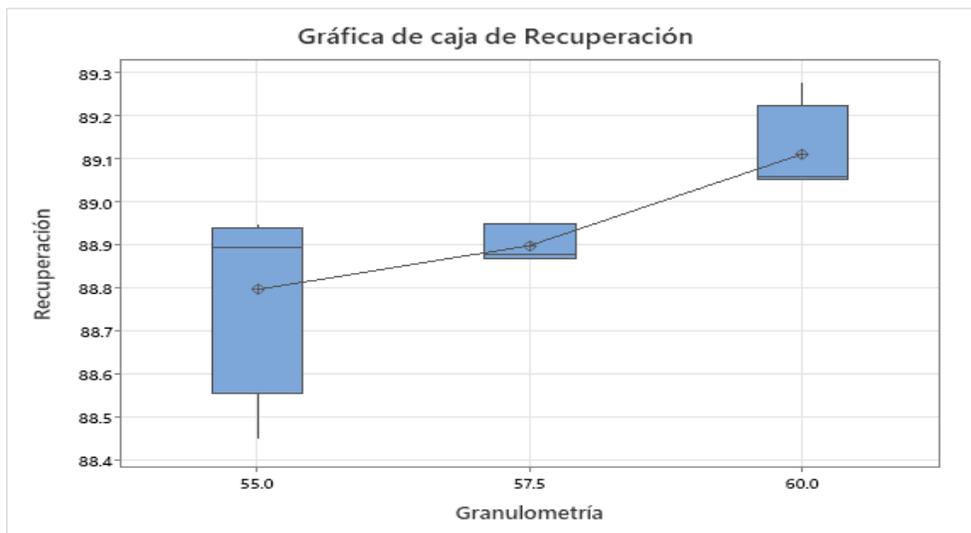


*Nota.* Data de software Minitab 20

Esta gráfica de valores individuales revela una menor dispersión en los datos para la granulometría de 57.5, lo que podría indicar una mayor consistencia en este nivel.

**Figura 31**

*Gráfica de cajas de recuperación*



*Nota.* Data de software Minitab 20

Esta gráfica de cajas confirma la tendencia ascendente de que a mayor granulometría mayor recuperación y muestra que la distribución de los datos es relativamente simétrica para cada nivel

### **5.5 Análisis granulométrico**

Realizar la distribución granulométrica en peso y luego realizar la gráfica del porcentaje de acumulación pasante en relación con el tamaño de las partículas.

#### **Equipos y materiales**

- Equipo Ro-tap
- Mineral sulfurado mixto de cobre 500 g (100% -10 malla)
- Juego de tamices ASTM (mallas 16, 20, 28, 48, 65, 120, 150, 200)
- Espátula
- Brocha
- Bolsas plásticas
- Libreta de apuntes

#### **Procedimiento**

- ❖ Pesar 500 g de mineral
- ❖ Preparar el juego de tamices serie ASTM (16, 20, 28, 48, 65, 120, 150, 200)
- ❖ Poner el mineral en los tamices y tamizar en Ro-tap durante 8 minutos.
- ❖ Retirar el tamiz, pesar los minerales retenidos en cada malla y registrar los datos.
- ❖ Analizar la distribución granulométrica experimental del mineral en las diferentes mallas.

## Figura 32

### *Análisis granulométrico*



*Nota.* Realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales.

## Resultados

A continuación, se muestra la distribución granulométrica.

**Tabla 10**

*Distribución granulométrica*

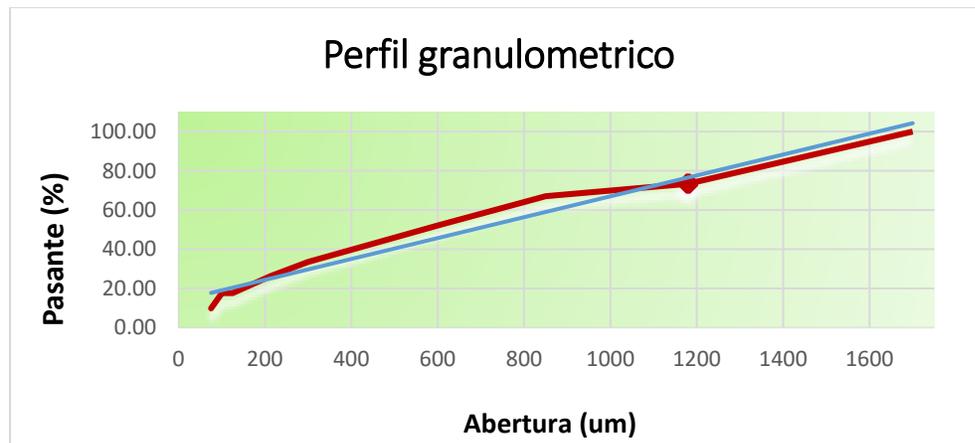
<b>MALLA</b>	<b>Abertura ASTM (um)</b>	<b>PESO (g)</b>	<b>% EN PESO</b>	<b>% ACUM. RETENIDO</b>	<b>%ACUM. PASANTE</b>
<b>-10</b>	1700	0	0.000	0.000	100.00
<b>16</b>	1180	115.6	26.618	26.618	73.382
<b>20</b>	850	27.5	6.332	32.950	67.050
<b>28</b>	600	65.0	14.967	47.916	52.084
<b>48</b>	300	80.5	18.536	66.452	33.548
<b>65</b>	212	31.9	7.345	73.797	26.203
<b>120</b>	125	37.2	8.566	82.362	17.638
<b>150</b>	100	0.2	0.046	82.408	17.592
<b>200</b>	75	33.8	7.783	90.19	9.809
<b>-200</b>	-75	42.6	9.809	100.000	0.000
<b>TOTAL</b>		<b>434.3</b>	<b>100.000</b>		

*Nota.* Elaborado propia, realizado en laboratorio de procesamiento de minerales.

Del cuadro la distribución granulométrica se interpreta que el tamaño óptimo de liberación se encuentra en la malla 200.

**Figura 33**

*Distribución granulométrica*



*Nota.* Elaboración propia en Microsoft Excel

Con base en los resultados obtenidos del análisis, podemos ver intuitivamente que el 90.19% de la liberación ocurre en malla 200.

### 5.5.1 Función matemática de GATES-GAUDIN SCHUHMANN: G-G-S

Esta función matemática nos ayuda a ajustar los datos experimentales y encontrar las variables de la ecuación de distribución del tamaño de partículas.

La siguiente función está definida por:

$$F(x) = 100 \times \left[ \frac{x}{x_0} \right]^m \quad (19)$$

Donde:

$X_0$ : tamaño máximo de la partícula

$m$ : pendiente de la recta

$F(x)$ : porcentaje acumulado pasante (corregido)

$X$ : abertura de la malla (um)

Linealizando la ecuación tenemos:

$$\text{Log}F(x) = \text{Log} \frac{100}{x_0^m} + m \text{Log}x \quad (20)$$

$$a = \text{Log} \frac{100}{x_0^m} \quad (21)$$

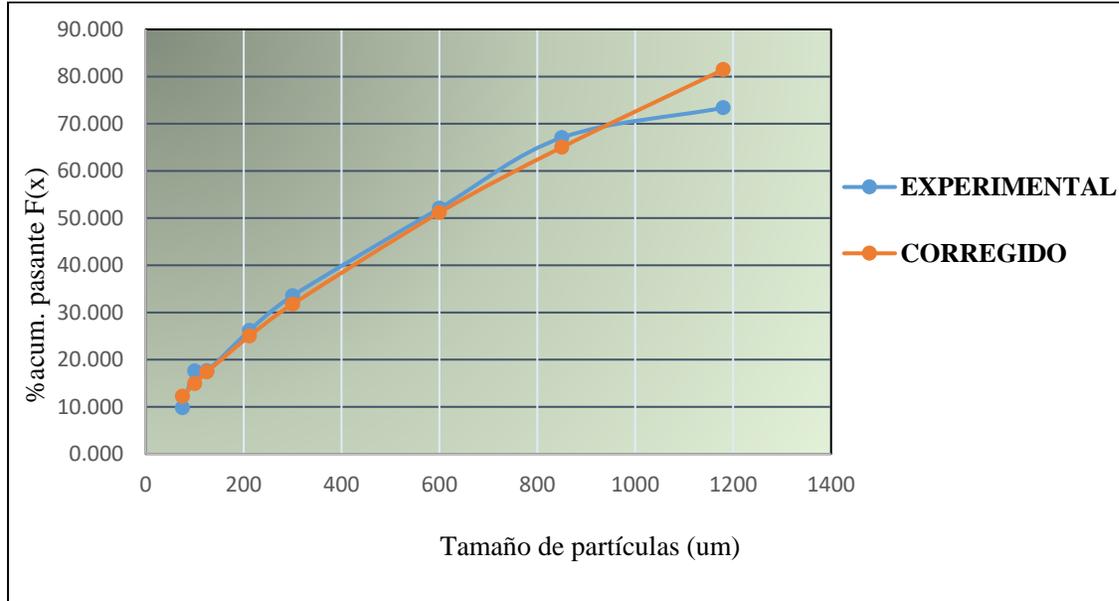
**Tabla 11***Cálculos con la función de GATES GAUDIN SCHUHMANN*

<b>N° Malla</b>	<b>Abertura (um)</b>	<b>Peso (gr)</b>	<b>% pasante acum.</b>	<b>log(x)</b>	<b>log(y)</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>XY</b>	<b>Y<sup>2</sup></b>	<b>% pasante acum. Corregido</b>
<b>16</b>	1180	115. 6	73.382	3.072	1.866	9.436	5.731	3.480	81.48
<b>20</b>	850	27.5	67.050	2.929	1.826	8.581	5.350	3.336	65.02
<b>28</b>	600	65.0	52.084	2.778	1.717	7.718	4.769	2.947	51.17
<b>48</b>	300	80.5	33.548	2.477	1.526	6.136	3.779	2.328	31.77
<b>65</b>	212	31.9	26.203	2.326	1.418	5.412	3.300	2.012	25.02
<b>120</b>	125	37.2	17.638	2.097	1.246	4.397	2.614	1.554	17.40
<b>150</b>	100	0.2	17.592	2.000	1.245	4.000	2.491	1.551	14.92
<b>200</b>	75	33.8	9.809	1.875	0.992	3.516	1.859	0.983	12.25
				$\Sigma x =$ <b>19.555</b>	$\Sigma y =$ <b>11.836</b>	$\Sigma x^2 =$ <b>49.197</b>	$\Sigma xy =$ <b>29.893</b>	$\Sigma y^2 =$ <b>18.190</b>	

*Nota.* Elaborado por los tesisistas

**Figura 34**

*Distribución granulométrica de GATES GAUDIN SCHUHMAN*



*Nota.* Elaboración propia en Microsoft Excel

Según la gráfica de la distribución granulométrica las líneas experimental y corregido se visualiza que el proceso de reducción del tamaño está funcionando eficientemente con coincidencia cercana.

Los valores de las variables de distribución se determinan mediante el método de mínimos cuadrados, se tiene la siguiente relación.

$$m = \frac{N\sum xy - \sum x \sum y}{N\sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (22)$$

$$a = \frac{\sum y - m\sum x}{N} \quad (23)$$

$$r = \frac{N\sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[N\sum x^2 - (\sum x)^2][N\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (24)$$

Reemplazando los valores en las ecuaciones 20, 21 y 22 con los datos de la tabla, tenemos lo siguiente.

$$m = \frac{8(29.893) - (19.555)(11.836)}{8(49.197) - (19.555)^2}$$

$$m = 0.688$$

$$a = \frac{11.836 - (0.688)(19.555)}{8}$$

$$a = -0.202$$

$$r = \frac{8(29.893) - (19.555)(11.836)}{\sqrt{[8(49.197) - (19.555)^2][8(18.190) - (11.836)^2]}}$$

$$r = 0.987$$

De la ecuación x resolvemos  $x_0$ :

$$a = \text{Log} \frac{100}{x_0^m} \quad (25)$$

$$a = \log 100 - m \log X_0$$

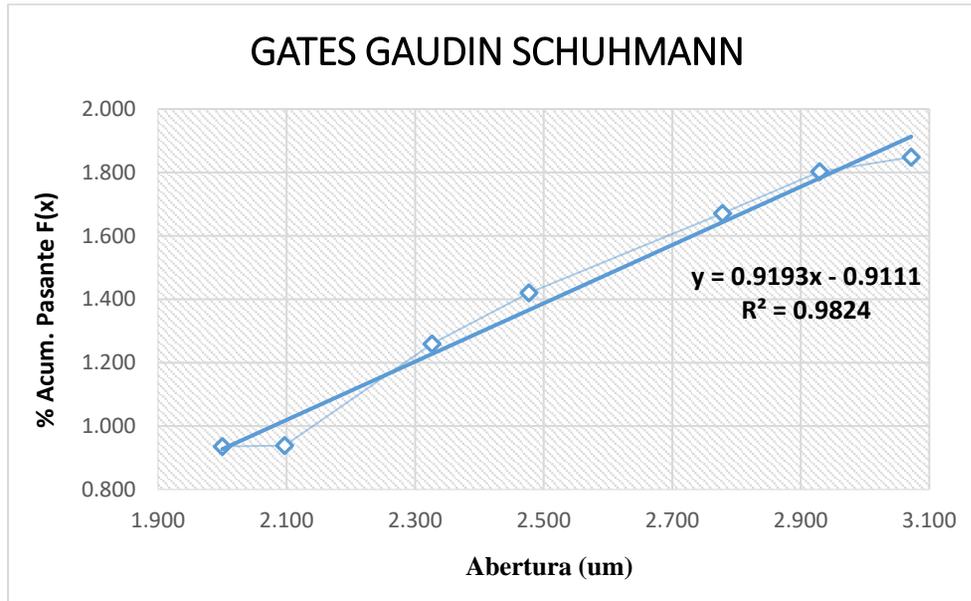
$$-0.202 = 2 - (0.688) \log X_0$$

$$\log X_0 = 3.200$$

$$X_0 = 1467.73 \mu m$$

De la tabla N° 10 obtenemos la figura 35 con su respectiva ecuación para calcular el P80.

**Figura 35** Gráfica de cálculo P80 de GATES GAUDIN SCHUHMANN



*Nota.* Elaboración propia en Microsoft Excel

$$P80 = \left[ \frac{80}{100} \right]^{\frac{1}{a}} x X_0 \quad (26)$$

Donde el valor de a y b obtenemos de la ecuación de la gráfica.

$$a = 0.9193$$

$$b = -0.9111$$

$$X_0 = 1467.73 \mu m$$

Por lo tanto

$$P80 = \left[ \frac{80}{100} \right]^{\frac{1}{0.9193}} \times 1467.73$$

$$P80 = 1151\mu\text{m}$$

De la figura N° 35 con su respectiva ecuación se realizó los cálculos de P80, donde nos indica que el valor de 1151 $\mu\text{m}$  es el tamaño de la partícula 80% pasante.

El valor de  $X_0$  de la ecuación N° 23 que es 1467.73 $\mu\text{m}$ , nos indica que es el tamaño de la partícula máxima respecto al análisis granulométrico de la experimentación que se realizó.

### **5.6 Pruebas de flotación de minerales mixtos de cobre a nivel de laboratorio**

Se llevaron a cabo las evaluaciones experimentales de flotación por espuma con las muestras representativas obtenidas del dicho yacimiento, evaluando y obteniendo las variables más influyentes en la flotación de los minerales mixtos de cobre como se encontraron silicatos, carbonatos, sulfuros y óxidos junto a los minerales de oro y plata, entre otros.

El uso del reactivo colector Xantato Amfílico de Potasio (Z-6) se trabajó experimentalmente manipulando la dosificación para poder verlo en cuanto y cómo afecta este colector en el proceso de flotación por espuma. Las pruebas de la muestra fueron realizadas en el laboratorio de procesamiento de minerales en la carrera profesional de Ingeniería Metalúrgica, UNSAAC.

**Figura 36**

*Máquina de flotación para las pruebas metalúrgicas*



*Nota.* Realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales.

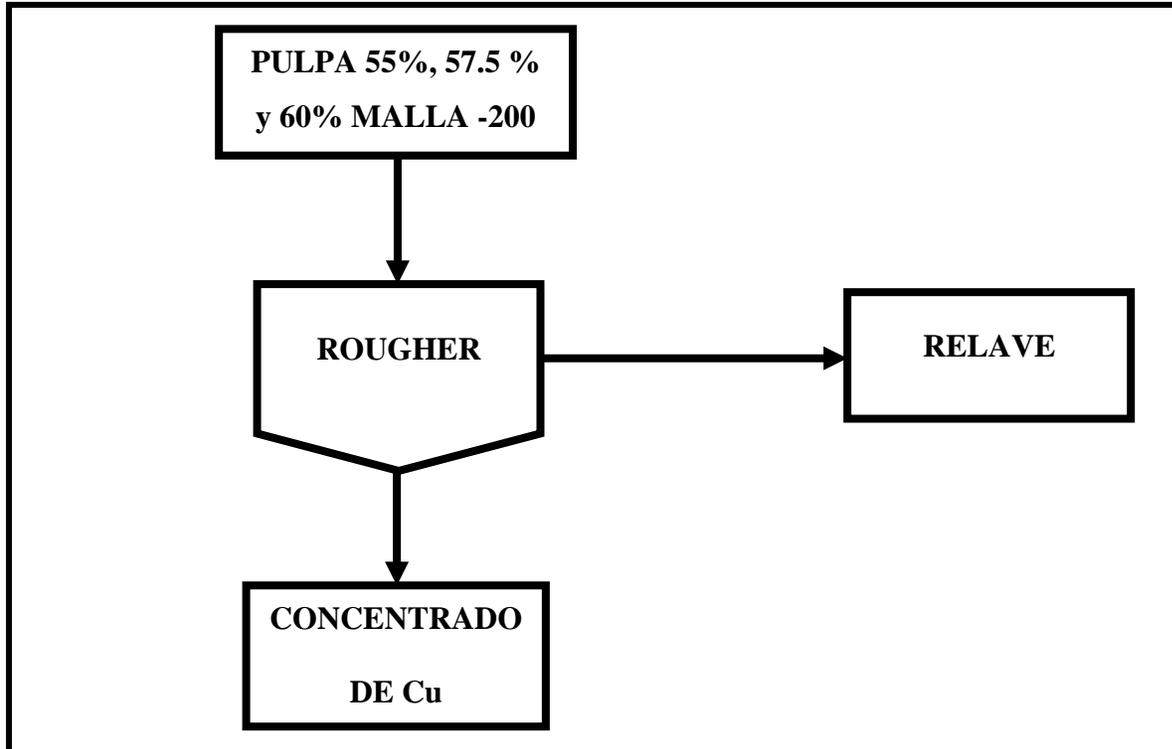
### **5.6.1 Muestra del mineral**

Para tratar el mineral mixto de cobre se realizó un análisis químico de cabeza, análisis granulométrico y posteriormente el análisis químico de los concentrados y relaves. Las propiedades de flotación fueron tomados y llevados con la misma magnitud de las experiencias anteriores a un nivel laboratorio, realizando los paletesos o limpiando las espumas cargadas de mineral valioso en la celda por cada un minuto.

El objetivo de esta investigación de trabajo es evaluar el colector Xantato Amílico de Potasio (Z-6), reemplazando la dosificación en disminuir y aumentar para obtener una mayor recuperación de cobre total.

**Figura 37**

*Diagrama de flujo de flotación*



*Nota.* Elaborado por los tesisistas

### **Equipos y materiales usados en laboratorio metalúrgico**

- Celda de flotación de 1L Denver (D12) tipo subaireación
- Mineral de cobre
- Balanza de precisión
- Balanza digital
- Cronometro
- Probeta de vidrio 1L
- Vaso precipitado 500 ml
- Pizeta
- Jeringas

- Espátula
- Brocha
- Peachimetro digital METTLER TOLEDO
- Bandejas
- Reactivo para flotación colector Z- 6

### **Figura 38**

*Máquina de flotación Denver*



*Nota.* Realizado en laboratorio de procesamiento de Minerales.

#### **5.6.2 Rango de variables**

El cuadro siguiente nos presenta el espectro de variables en términos reales, tomando en cuenta las pruebas centrales que simbolizan aproximadamente el valor histórico a la utilización de las variables en las operaciones industriales la longitud del rango es equivalente al punto central que se toma representando los valores mínimos y máximos que estos son posibles para aplicar y estudiar lo necesario.

**Tabla 12***Rango de variables*

<b>Variables</b>	<b>Niveles</b>		
	<b>Inferior</b>	<b>Central</b>	<b>Superior</b>
<b>A Granulometría (% malla 200)</b>	55	57.5	60
<b>B Dosificación de reactivos (g/tn)</b>	40	45	50
<b>C Tiempo de flotación (min)</b>	6	8	10

*Nota.* Elaborado por los tesisistas

Donde:

A: Granulometría (% malla)

B: dosificación de reactivos (g/tn)

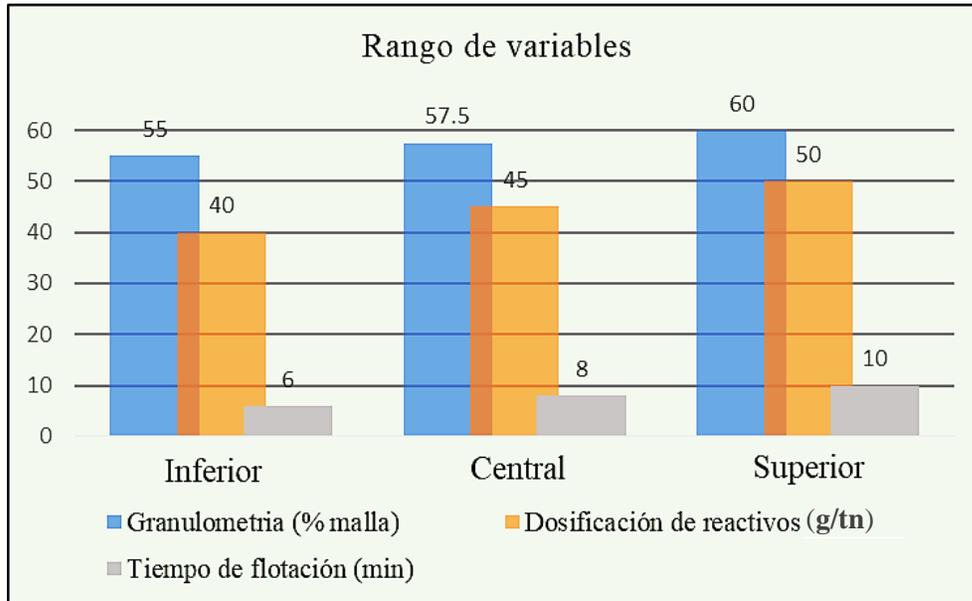
C: tiempo de flotación (min)

#### **Variable X<sub>2</sub> (xantato Z-6)**

Este reactivo es un colector donde actúa en los minerales sulfuros de cobre como: Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), Covelita ( $\text{CuS}$ ), Bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), entre otros. Es decir, colecta los minerales valiosos de cobre según su dosificación del reactivo que se aplica en el proceso de flotación.

**Figura 39**

*Rango de variables*



*Nota:* elaboración propia

De la figura 39, se obtuvo un gráfico que nos muestra con cada una de ellas de las variables para la prueba experimental de flotación con adición de reactivos y el tiempo de flotación que se va a manipular.

### 5.6.3 Plantilla de diseño experimental

Usando la tabla N° 12 se realiza la matriz del diseño en escala codificada y natural para realizar el diseño factorial, como la siguiente tabla.

**Tabla 13**

*Plantilla de diseño experimental codificada y real*

N°	ESCALA CODIFICADA			ESCALA NATURAL		
	A	B	C	A	B	C
1	1	-1	-1	60	40	6
2	1	1	-1	60	50	6
3	1	-1	-1	60	40	10
4	1	1	-1	60	50	10
5	-1	-1	1	55	40	6
6	-1	1	1	55	50	6
7	-1	-1	1	55	40	10
8	-1	1	1	55	50	10
9	0	0	0	57.5	45	8
10	0	0	0	57.5	45	8
11	0	0	0	57.5	45	8

*Nota.* Elaborado por los tesistas

### **Procedimiento**

Para ejecutar las pruebas del proceso de flotación, se realiza con los siguientes pasos.

- Realizar el peso del mineral de cada malla de 55%, 57.5% y 60% a -200 malla de acuerdo al cálculo que se realizó según la capacidad de la celda de flotación a realizar la prueba.
- Realizar el cálculo de cantidad del reactivo para disoluciones de los reactivos en medio líquido.
- Preparar la pulpa en una probeta de 1000 cm<sup>3</sup> para una capacidad de celda 1L según los parámetros para la flotación necesaria y adecuada.

- Adicionar la pulpa a la celda de flotación para su acondicionamiento con el colector Z – 6 de 4 minutos.
- Adicionar los reactivos de acuerdo la dosificación a la celda de flotación con pulpa.
- Inyectar el aire a la celda de flotación parcialmente hasta la formación de las burbujas y posteriormente para flotar el mineral al tiempo establecido y necesario.
- Las burbujas se mineralizan con el mineral valioso de cobre bien concentradas o cargadas para flotar mediante las espumas y luego proceder separar usando una paleta a una bandeja.
- Los concentrados y relaves obtenidos de cada prueba son enviados a un laboratorio para su análisis correspondiente.
- Efectuar el balance metalúrgico.

### **Preparación de pulpas para la flotación de minerales mixtos**

La preparación de las pulpas para cada prueba de flotación se realizó en una probeta de 1L agregando el mineral mixto de cobre de 461.5 g y se agrega 838.4 ml de agua obteniendo la pulpa con una densidad de 1300 g/L, la densidad que se trabajó según las experiencias que se tuvo fue entre los rangos de 1250g/L a 1350g/L, La pulpa es depositada en una celda de flotación de 1L para realizar la prueba a nivel de laboratorio.

## Figura 40

### *Preparación de pulpa y acondicionamiento*



*Nota.* Acondicionamiento de pulpa, elaboración propia

## Tabla 14

### *Preparación de pulpas*

<b>Flotación</b>	<b>Densidad</b>	<b>1300</b>
	<b>(g/L)</b>	
	<b>% solidos</b>	35.5
	<b>Dilución</b>	1.82
	<b>(PI/Ps)</b>	
	<b>Gravedad</b>	2.86
	<b>específica</b>	

*Nota.* Elaborado por los tesisistas, laboratorio de procesamiento de minerales.

#### 5.6.4 Dosificación de reactivos

La adquisición del reactivo que se utilizó en el proceso de flotación es de acuerdo al criterio que se fundamenta en la experiencia y en los datos recabados durante el estudio de la investigación.

La dosificación del reactivo a nivel de la experiencia es mililitros por minuto.

**Figura 41**

*Dosificación de reactivos*



*Nota:* Dosificación del reactivo, elaboración propia

#### 5.6.5 Cálculo del consumo del reactivo para pruebas de flotación

Para realizar el cálculo correspondiente se inició primeramente con el dato que se basó en la experiencia anterior, según a eso se realizó el cálculo adecuado para la dosificación.

**Tabla 15**

*Datos para el cálculo de consumo de reactivos en g/tn*

Reactivos	% de solución	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Flujo (g/tn)
Z - 6	10		50
Dowfroat 250	puro	0.98	8

Por consiguiente, se realiza el siguiente cálculo.

$$Z - 6 = 72 \text{ ml/min}$$

$$\text{Dowfroat 250} = 8 \text{ ml/min}$$

Se realiza el cálculo de la dosificación con la siguiente fórmula:

$$X = \frac{f \cdot d}{w} \quad (27)$$

Donde:

f: factor de potencia

d: densidad de reactivo

w: peso de mineral (g)

#### calculando el consumo del reactivo Z-6

$$X = \frac{72 \text{ ml}}{\text{min}} * 0.10 * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{8.5 \text{ tn}} = 50 \text{ g/tn}$$

$$X = 461.5 \text{ g} * \frac{50 \text{ g}}{10^6 \text{ g}} * \frac{100 \text{ ml (sol)}}{5 \text{ g Z-6}} = 0.46 \text{ ml Z-6}$$

#### calculando el consumo del reactivo Dowfroat 250

$$X = \frac{8 \text{ ml}}{\text{min}} * \frac{0.98 \text{ g}}{\text{cm}^3} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{8.5 \text{ TM}} = 55.3 \text{ g/tn}$$

$$X = 461.5 \text{ g} * \frac{55.3 \text{ g}}{10^6 \text{ g}} = 0.025 \text{ ml DF-250}$$

Dosificación de reactivos a nivel de laboratorio para una celda de un 1L.

Reactivos	Dosificación
Colector Z-6 (ml)	0.46
Dowfroat 250 (ml)	0.025
Cal (g)	0.5

### 5.6.6 Condiciones operativas para las pruebas de flotación de minerales mixtos

**Tabla 16**

*Tiempos de molienda*

<b>Granulometría %</b>	<b>55% - 200 malla</b>	<b>60% - 200 malla</b>	<b>57.5% - 200 malla</b>
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	15.30	17.43	16.40

**Tabla 17**

*Condiciones de flotación*

<b>Celda de flotación (L)</b>	1
<b>Gravedad específica</b>	2.86
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	6, 10
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>Peso de mineral (g)</b>	461.5
<b>Agua (ml)</b>	838.5
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5 - 9
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	40, 50
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4
<b># paletas/min</b>	2

Evaluación de la flotación preliminar mediante la siguiente expresión matemática.

$$K = \frac{G.E.-1}{G.E.} \quad (28)$$

$$\%S = \frac{(W-1000)*100\%}{WK} \quad (29)$$

$$W_S = \frac{W*\%S}{100} \quad (30)$$

Donde:

K: constante de mineral

W: peso de la pulpa

Ws: peso del mineral

G.E: Gravedad específica

**Calculando K.**

$$K = \frac{2.86 - 1}{2.86}$$

$$\mathbf{K = 0.65}$$

**Calculando el porcentaje de sólidos (%S)**

$$\%S = \frac{(1300 - 1000) * 100}{1300(0.65)}$$

$$\%S = \mathbf{35.50\%}$$

**Calculando el peso de mineral (Ws)**

$$W_S = \frac{1300 * 35.50}{100}$$

$$\mathbf{W_S = 461.5g}$$

**Calculando volumen de agua ( $V_{\text{agua}}$ )**

$$V_{\text{agua}} = \frac{W(100 - \%S)}{100} \quad (31)$$

$$V_{\text{agua}} = \frac{1300(100 - 35.5)}{100}$$

$$V_{\text{agua}} = 838.5 \text{ ml}$$

**Figura 42**

*Pruebas y resultados de flotación*



*Nota:* Esta figura representa las 11 muestras de concentrados de cobre obtenidos por flotación, elaborado en laboratorio de procesamiento de minerales.

### **5.7 Ensayos de flotación de minerales mixtos**

#### **Prueba de flotación N° 1**

Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones.

**Tabla 18***Condiciones operativas para flotación N° 1*

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	55, 57.5 y 60 -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	17.43, 15.30 y 16.40
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	6
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	40
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	125.20	30.65	38.37	88.45	3.69
<b>RELAVE</b>	336.34	1.49	5.01	11.55	

**Prueba de flotación N° 2**

**Tabla 19**

*Condiciones operativas para flotación N° 2*

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	60% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	17.43
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	6
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	50
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	138.43	27.91	38.64	89.05	3.33
<b>RELAVE</b>	323.11	1.47	4.75	10.95	

**Prueba de flotación N° 3**

**Tabla 20**

*Condiciones operativas para flotación N° 3*

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	60% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	17.43
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	10
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	40
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	137.71	28.00	38.56	88.88	3.35
<b>RELAVE</b>	323.83	1.49	4.83	11.12	

## Prueba de flotación N° 4

Tabla 21

Condiciones operativas para flotación N° 4

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	60% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	17.43
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	10
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	50
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	142.98	27.09	38.73	89.28	3.23
<b>RELAVE</b>	318.56	1.46	4.65	10.72	

## Prueba de flotación N° 5

**Tabla 22**

*Condiciones operativas para flotación N° 5*

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	55% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	15.30
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	6
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	40
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	136.45	28.27	38.57	88.91	3.38
<b>RELAVE</b>	325.09	1.48	4.81	11.09	

## Prueba de flotación N° 6

Tabla 23

Condiciones operativas para flotación N° 6

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	55% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	15.30
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	6
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	50
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	138.64	27.87	38.64	89.06	3.33
<b>RELAVE</b>	322.90	1.47	4.75	10.94	

**Prueba de flotación N° 7**

**Tabla 24**

*Condiciones operativas para flotación N° 7*

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	55% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	15.30
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	6
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	40
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	135.36	28.51	38.59	88.95	3.41
<b>RELAVE</b>	326.18	1.47	4.79	11.05	

## Prueba de flotación N° 8

Tabla 25

Condiciones operativas para flotación N° 8

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	55% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	15.30
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	10
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	50
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	140.86	27.43	38.64	89.06	3.28
<b>RELAVE</b>	320.68	1.48	4.75	10.94	

**Prueba de flotación N° 9**

**Tabla 26**

*Condiciones operativas para flotación N° 9*

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	57.5% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	16.40
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	8
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	45
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	137.68	28.03	38.59	88.95	3.35
<b>RELAVE</b>	323.86	1.48	4.79	11.05	

## Prueba de flotación N° 10

Tabla 27

Condiciones operativas para flotación N° 10

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	57.5% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	16.40
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	8
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	45
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	135.49	28.46	38.56	88.88	3.41
<b>RELAVE</b>	326.05	1.48	4.83	11.12	

## Prueba de flotación N° 11

Tabla 28

*Condiciones operativas para flotación N° 11*

<b>Molienda</b>	
<b>Granulometría %</b>	57.5% -200 malla
<b>Tiempo de molienda (min)</b>	16.40
<b>Flotación</b>	
<b>Densidad de pulpa (g/l)</b>	1300
<b>Flotación (RPM)</b>	1400
<b>Tiempo de flotación (min)</b>	8
<b>Acondicionamiento (RPM)</b>	1100
<b>% sólidos</b>	35.5
<b>pH</b>	8.5
<b>Colector Z-6 (g/tn)</b>	45
<b>Dowfroat 250 (g/tn)</b>	8
<b>Acondicionamiento (min)</b>	4

Fuente: elaboración propia

Balance metalúrgico

<b>PRODUCTO</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Ley Cu (%)</b>	<b>Cont. Metálico</b>	<b>Recuperación</b>	<b>K</b>
<b>CABEZA</b>	461.54	9.40	43.38	100.00	
<b>CONCENTRADO</b>	132.95	29.00	38.56	88.87	3.47
<b>RELAVE</b>	328.59	1.47	4.83	11.13	

## 5.8 Evaluación de los coeficientes codificados

Podemos derivar que las variables son significativas si  $p < 0.05$ , según el análisis se observa en los gráficos que la granulometría y la dosificación de los reactivos son relevantes significativamente, por lo tanto, según los análisis afirmados que son las variables que tienen mayor significancia en el proceso.

**Tabla 29**

*Resultados de las pruebas experimentales y su análisis*

<b>Pruebas</b>	<b>A: Granulometría (% malla)</b>	<b>B: Dosificación de reactivos</b>	<b>C: Tiempo de flotación</b>	<b>Y: % Recuperación</b>
<b>1</b>	60	40	6	88.45
<b>2</b>	60	50	6	89.05
<b>3</b>	60	40	10	88.88
<b>4</b>	60	50	10	89.28
<b>5</b>	55	40	6	88.91
<b>6</b>	55	50	6	89.06
<b>7</b>	55	40	10	88.95
<b>8</b>	55	50	10	89.06
<b>9</b>	55.7	45	8	88.95
<b>10</b>	55.7	45	8	88.88
<b>11</b>	55.7	45	8	88.87

Nota: elaboración propia

**Tabla 30***Análisis de varianza de dosificación*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Dosificación</b>	2	0.06785	0.03393	0.79	0.485
<b>Error</b>	8	0.34195	0.04274		
<b>Total</b>	10	0.40980			

*Nota.* Data del Software MINITAB 20**Tabla 31***Resumen del modelo de dosificación*

<b>Dosificación</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>IC de 95%</b>
<b>40</b>	4	88.867	0.287	(88.629, 89.106)
<b>45</b>	3	88.9000	0.0436	(88.6247, 89.1753)
<b>50</b>	4	89.0425	0.1748	(88.8041, 89.2809)

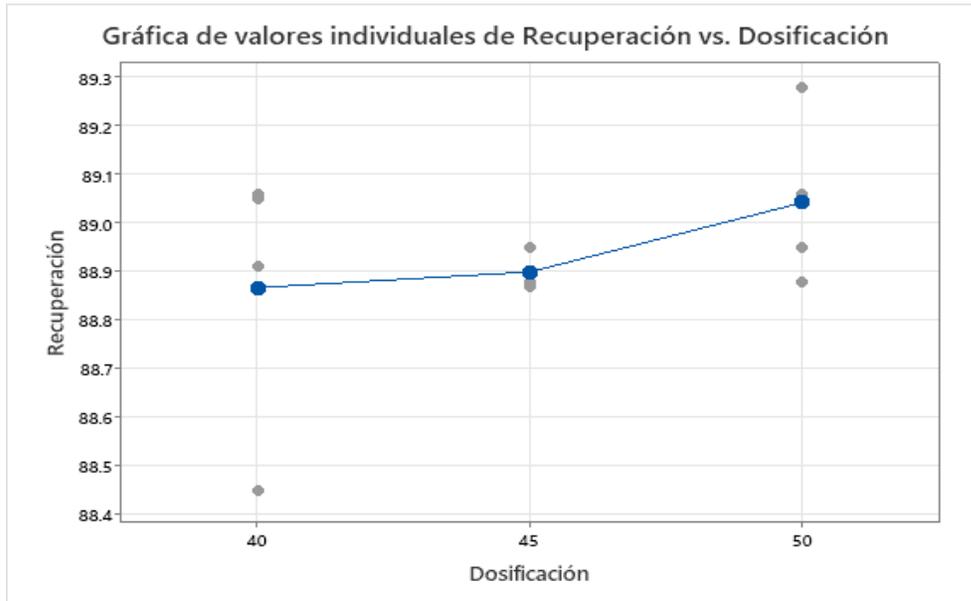
*Nota.* Data del Software MINITAB 20**Tabla 32***Pruebas simultáneas para diferencias de las medias*

<b>Diferencia de niveles</b>	<b>Diferencia de las medias</b>	<b>EE de la diferencia</b>	<b>IC de 95%</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p ajustado</b>
<b>45 – 40</b>	0.032	0.158	(-0.419, 0.484)	0.21	0.977
<b>50 – 40</b>	0.175	0.146	(-0.243, 0.593)	1.20	0.487
<b>50 – 45</b>	0.143	0.158	(-0.309, 0.594)	0.90	0.654

*Nota.* Data del Software MINITAB 20

**Figura 43**

*Valores individuales de recuperación vs dosificación*

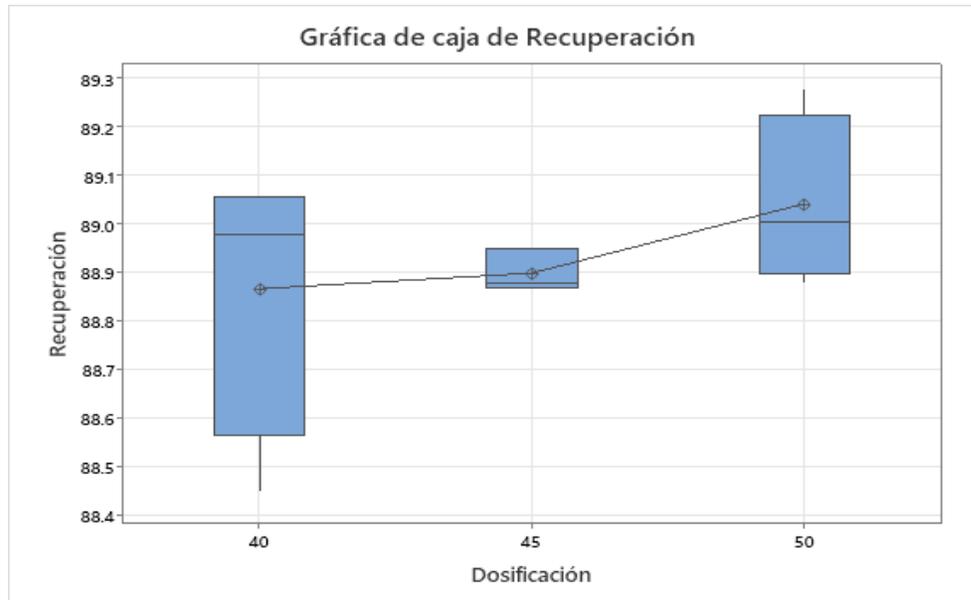


*Nota.* Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de valores individuales revela una mayor dispersión en los datos para la dosificación de 40 y 50 g/tn, mientras que 45 g/tn muestra menor variabilidad.

**Figura 44**

*Gráfica de cajas de recuperación con dosificación*



*Nota.* Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de caja confirma la tendencia ligeramente ascendente y muestra algunas asimetrías en la distribución de los datos, especialmente para la dosificación de 40 g/tn.

**Tabla 33**

*Análisis de varianza del tiempo*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Tiempo</b>	2	0.01940	0.009700	0.20	0.824
<b>Error</b>	8	0.39040	0.048800		
<b>Total</b>	10	0.40980			

*Nota.* Data del Software MINITAB 20

**Tabla 34***Resumen del modelo de tiempo*

<b>Tiempo</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>IC de 95%</b>
<b>6</b>	4	88.915	0.351	(88.660, 89.170)
<b>8</b>	3	88.9000	0.0436	(88.6059, 89.1941)
<b>10</b>	4	88.9950	0.0768	(88.7403, 89.2497)

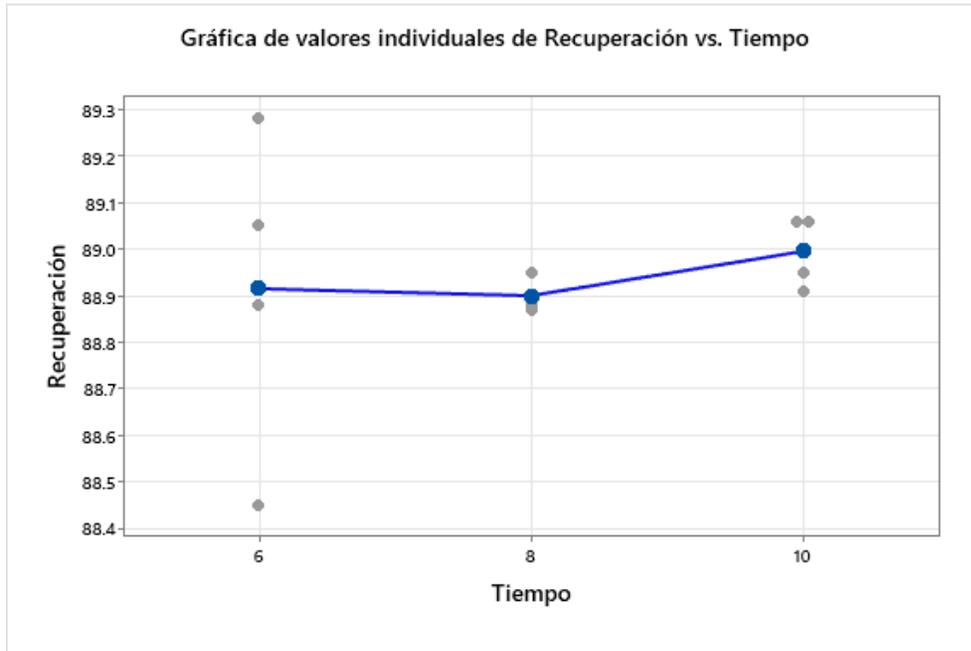
*Nota.* Data del Software MINITAB 20**Tabla 35***Pruebas simultáneas para diferencias de las medias*

<b>Diferencia de niveles</b>	<b>Diferencia de las medias</b>	<b>EE de diferencia</b>	<b>IC de 95%</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p ajustado</b>
<b>8 – 6</b>	-0.015	0.169	(-0.497, 0.467)	-0.09	0.996
<b>10 – 6</b>	0.080	0.156	(-0.366, 0.526)	0.51	0.868
<b>10 – 8</b>	0.095	0.169	(-0.387, 0.577)	0.56	0.843

*Nota.* Data del Software MINITAB 20

**Figura 45**

*Gráfica de valores individuales de recuperación con tiempo*

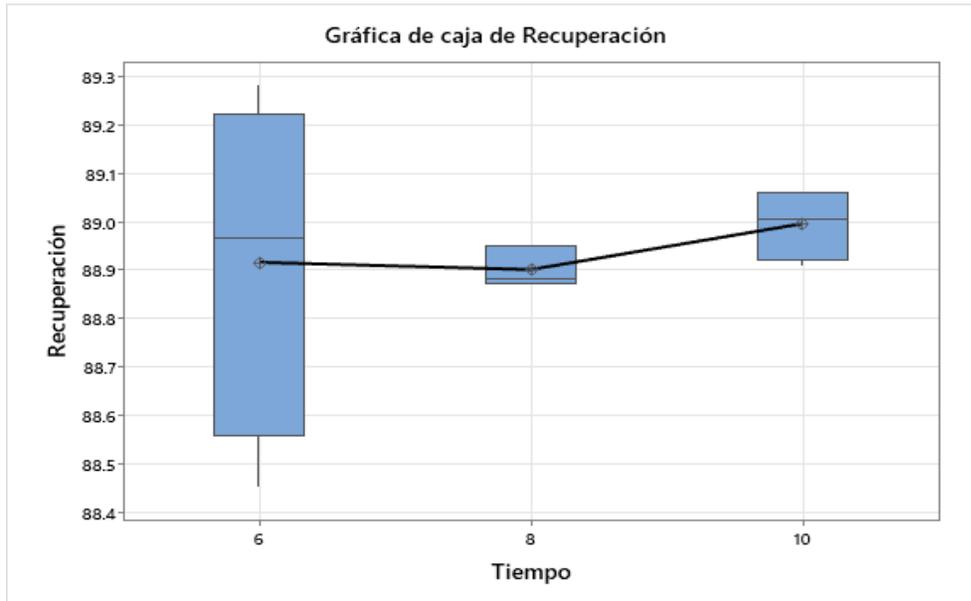


*Nota.* Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de valores individuales revela una mayor dispersión en los datos para el tiempo de 6 minutos, mientras que 8 y 10 minutos muestran menor variabilidad.

**Figura 46**

*Gráfica de cajas de recuperación con tiempo*



*Nota.* Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de caja no muestra una tendencia clara y revela algunas asimetrías en la distribución de los datos, especialmente para 6 minutos. (Astuhuaman, 2015)

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 6.1 Diseño factorial para el análisis de resultados mediante el software de Minitab 20

Seguidamente se realizó el estudio de los resultados alcanzados durante el periodo de tiempo que se trabajó en experimentación. Cabe señalar que el análisis estadístico se realizó teniendo en cuenta los objetivos como; granulometría, dosificación del colector Z-6 y tiempo de flotación.

Dado el diseño factorial ( $2^3$ ) utilizado en las pruebas experimentales (Tabla 12) y el porcentaje de recuperación en cada prueba experimental llevada a cabo (Tabla 28), se elaboró una matriz del diseño para las pruebas experimentales y las respuestas obtenidas de dichas pruebas que se realizó, utilizando software Minitab 20. Tras ejecutar las combinaciones pertinentes se obtiene la figura 47 del análisis de diseño factorial  $2^3$  con mediadores adicionales. En el gráfico se pueden identificar las variables más importantes.

#### Figura 47

*Matriz de diseño para las pruebas experimentales y el análisis de las respuestas de acuerdo al diseño factorial  $2^3$*

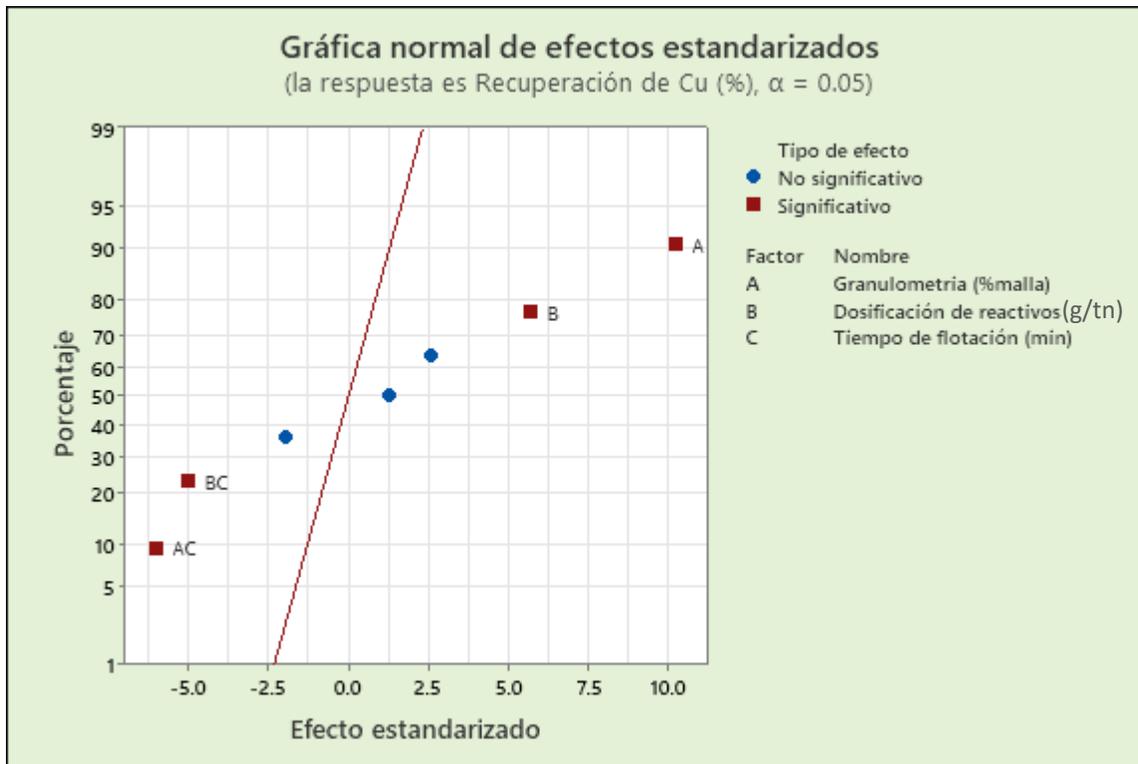
↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	✓
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	A	B	C	Y	
1	1	1	1	1	55.0	40	6	88.45	
2	2	2	1	1	60.0	40	6	89.05	
3	3	3	1	1	55.0	50	6	88.88	
4	4	4	1	1	60.0	50	6	89.28	
5	5	5	1	1	55.0	40	10	88.91	
6	6	6	1	1	60.0	40	10	89.06	
7	7	7	1	1	55.0	50	10	88.95	
8	8	8	1	1	60.0	50	10	89.06	
9	9	9	0	1	57.5	45	8	88.95	
10	10	10	0	1	57.5	45	8	88.88	
11	11	11	0	1	57.5	45	8	88.87	

*Nota:* (A: Granulometría (% malla), B: Dosificación de reactivos(g/tn), C: Tiempo de flotación(minutos), Recuperación de cobre % (Y). Elaborado en Minitab 20

De todos los ensayos experimentales que se realizó según el diseño factorial  $2^3$ , la recuperación más efectiva del mineral mixto de cobre del yacimiento Anccasilla Sol Candente I, se observó en el cuarto ensayo experimental, se llega a una recuperación de 89.28%. Este valor del porcentaje recuperado se obtiene con las condiciones: 50 g/tn de dosificación de colector Z-6, granulometría de 60%-200 malla y 6 min tiempo de flotación.

**Figura 48**

*Resultados del análisis de diseño factorial en efectos estandarizados*



*Nota:* (A: Granulometría (% malla), B: Dosificación de reactivos (g/tn), C: Tiempo de flotación(minutos). Elaborado en Minitab 20

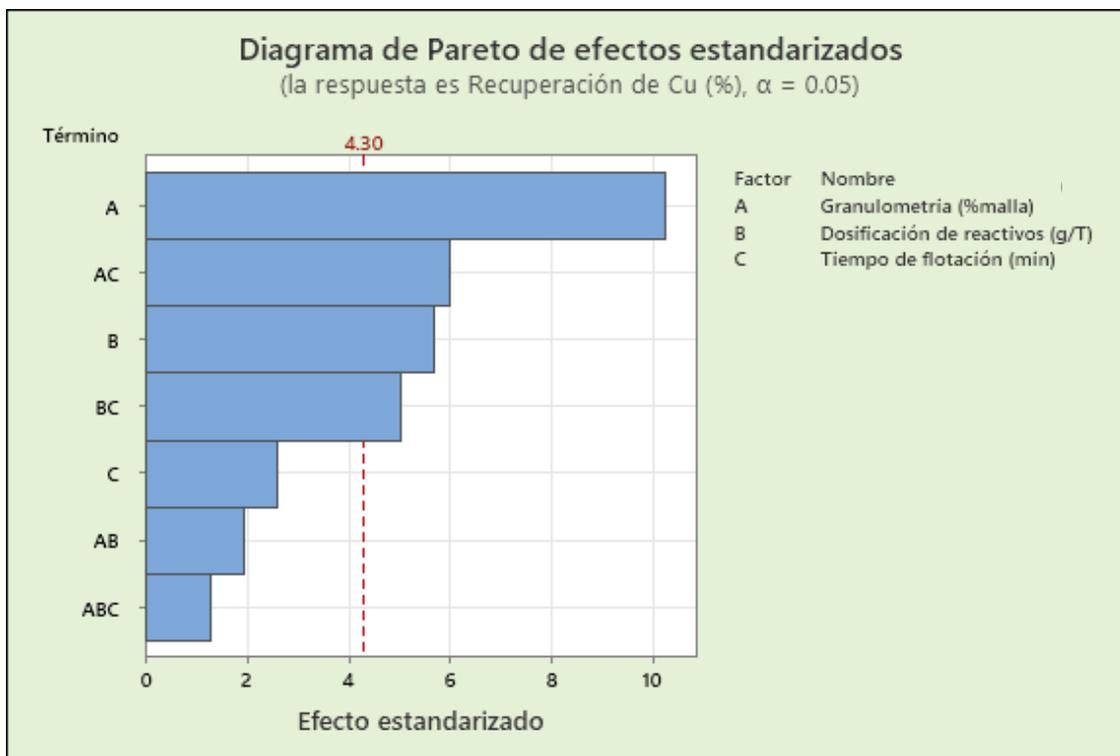
Esta gráfica muestra la magnitud y dirección de los efectos de cada factor e interacción.

- La línea de referencia (cerca del 0 en el eje X) ayuda a identificar efectos significativos.
- Los efectos que se extienden más allá de esta línea son estadísticamente significativos.
- A (Granulometría) tiene el mayor efecto positivo, seguido por B (Dosificación de reactivos).
- Las interacciones AC (Granulometría \* Tiempo) y BC (Dosificación \* Tiempo) tienen efectos negativos significativos.
- C (Tiempo) tiene un efecto positivo menor.
- La interacción AB y el efecto de curvatura (punto central) tienen efectos menores.

Esta gráfica confirma que la granulometría y la dosificación de reactivos son los factores más influyentes, mientras que sus interacciones con el tiempo son importantes, pero en dirección negativa.

**Figura 49**

*Diagrama de Pareto de los efectos*



*Nota:* (A: Granulometría (% malla), B: Dosificación de reactivos(g/tn), C: Tiempo de flotación(minutos). Elaborado en Minitab 20

Este diagrama muestra la magnitud absoluta de los efectos y ayuda a identificar cuáles son estadísticamente significativos.

- La línea vertical representa el umbral de significancia estadística.
- Los efectos que sobrepasan esta línea son estadísticamente significativos.
- A (Granulometría) tiene el mayor efecto, seguido por AC (Granulometría \* Tiempo).
- B (Dosificación de reactivos) y BC (Dosificación \* Tiempo) también son significativos.
- C (Tiempo) por sí solo no alcanza el umbral de significancia.
- AB, ABC y punto central no son estadísticamente significativos.

Este diagrama refuerza la importancia de la granulometría y la dosificación de reactivos, así como sus interacciones con el tiempo de flotación.

**Tabla 36**

*Tabla de valores residuos*

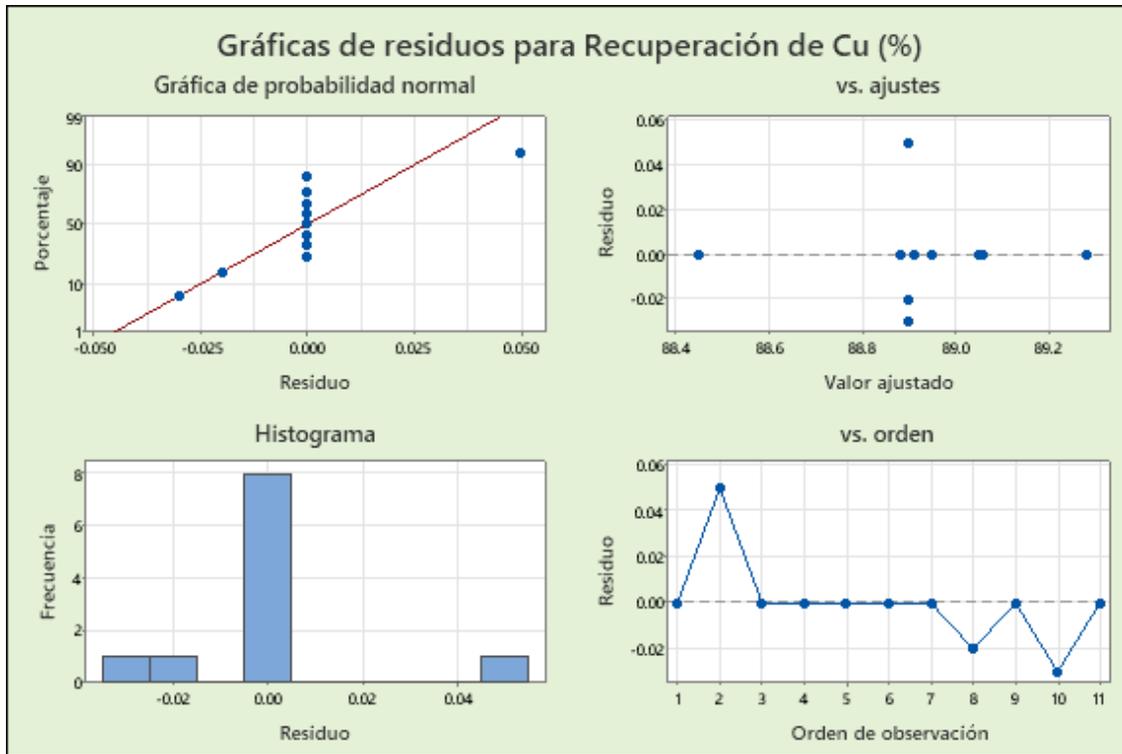
<b>N°</b>	<b>Y observado</b>	<b>Y estimado</b>	<b>Residuo</b>
1	88.45	88.435	0.015
2	89.05	89.035	0.015
3	88.88	88.865	0.015
4	89.28	89.265	0.015
5	88.91	88.895	0.015
6	89.06	89.045	0.015
7	88.95	88.935	0.015
8	89.06	89.045	0.015
9	88.95	88.94	0.01
10	88.88	88.94	-0.06
11	88.87	88.94	-0.07

*Nota:* Elaborado en Minitab 20

El residuo es el valor que se obtiene de la diferencia entre el valor Y observado y el valor Y estimado ajustado correspondiente, utilizada para examinar la bondad de ajuste de regresión.

**Figura 50**

*Gráfica de residuos para porcentaje de recuperación*



*Nota:* (A: Granulometría (% malla), B: Dosificación de reactivos(g/tn), C: Tiempo de flotación(minutos). Elaborado en Minitab 20

Estas gráficas de residuos nos permiten verificar la aleatoriedad de la data en nuestro fenómeno, ayudan a verificar los supuestos del modelo de regresión, según las gráficas vistas como la gráfica de probabilidad podemos ver como:

**a) Gráfica de probabilidad normal:**

- Los puntos mantienen alrededor de una línea recta, lo que sugiere que los residuos están normalmente distribuidos.
- Esto indica que el modelo cumple con el supuesto de normalidad.

**b) Residuos vs. Ajustes:**

- No se observa un patrón claro, lo que sugiere que la varianza de los residuos es invariable (homocedasticidad).
- Esto apoya el supuesto de variación constante en el modelo.

**c) Histograma de residuos:**

- La forma es aproximadamente simétrica y se asemeja a una distribución normal.
- Esto respalda el supuesto de normalidad de los residuos.

**d) Residuos vs. Orden:**

- No se observe un patrón claro en la secuencia de los residuos.
- Esto sugiere que no hay autocorrelación significativa en los residuos.

Las gráficas de residuos indican que el modelo cumple razonablemente bien con los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de los residuos. Esto aumenta la confianza en la validez del modelo y sus conclusiones.

## 6.2 Coeficientes codificados para el modelo matemático

**Tabla 37**

*Coeficientes codificados*

<b>Término</b>	<b>Efecto</b>	<b>Coef.</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
<b>Constante</b>		88.955	0.0154	5772.160	0.000	1.00
<b>Granulometría (A)</b>	0.315	0.1575	0.0154	10.220	0.009	1.00
<b>Dosf. reactivos (B)</b>	0.175	0.0875	0.0154	5.680	0.030	1.00
<b>T. flotación (C)</b>	0.080	0.04	0.0154	2.600	0.122	1.00
<b>A*B</b>	0.060	-0.03	0.0154	-1.950	0.191	1.00
<b>A*C</b>	0.185	0.0925	0.0154	-6.000	0.027	1.00
<b>B*C</b>	0.155	0.0775	0.0154	-5.030	0.037	1.00
<b>A*B*C</b>	0.040	0.02	0.0154	1.300	0.324	1.00

*Nota.* (EE: Error estándar del coeficiente, FIV: Factor de inflación varianza). Data del Software MINITAB 20

En la tabla N° 35 podemos ver que los dos primeros factores (A y B) tiene una significancia mayor respecto del último factor (C) y las interacciones dobles y triples de los factores tienen significancia media y baja.

Durante la recuperación de cobre los variables granulometría (A), la dosificación del colector Z6 (B) y el tiempo de flotación (C) contribuye positivamente en el proceso de recuperación de cobre en fusión de los minerales del yacimiento minero Ancasilla Sol Candente I.

**Tabla 38***Análisis de varianza predeterminado (ANOVA)*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Modelo</b>	7	0.3994	0.057057	16.46	0.021
<b>Lineal</b>	3	0.2725	0.090833	26.20	0.012
<b>Granulometría (A)</b>	1	0.19845	0.19845	57.25	0.005
<b>Dosf. reactivos (B)</b>	1	0.06125	0.06125	17.67	0.025
<b>T. flotación (C)</b>	1	0.0128	0.0128	3.69	0.150
<b>Interacciones de 2 términos</b>	3	0.1237	0.041233	11.89	0.036
<b>A*B</b>	1	0.0072	0.0072	2.08	0.245
<b>A*C</b>	1	0.06845	0.06845	19.75	0.021
<b>B*C</b>	1	0.04805	0.04805	13.86	0.034
<b>Interacciones de 3 términos</b>	1	0.0032	0.0032	0.92	0.408
<b>A*B*C</b>	1	0.0032	0.0032	0.92	0.408
<b>Error</b>	<b>3</b>	<b>0.0104</b>	<b>0.003467</b>		
<b>Curvatura</b>	1	0.0066	0.0066	3.47	0.203
<b>Error puro</b>	2	0.0038	0.0019		
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>0.4098</b>			

*Nota:* (GL: Grados Libertad, SC Ajust: Suma cuadrados, MC Ajust: Cuadrado medio, F: Distribución de probabilidad p: probabilidad). Dato del Software MINITAB 20

La varianza es un indicador de dispersión que refleja la variabilidad de un conjunto de datos en relación a su promedio, en el estudio de varianza, se muestra la tabla 35, la cual nos muestra que el valor p (Pearson) del modelo y la interacción entre las dos variables excede el 0.05, lo que ratifica que las variables no son relevantes para el proceso.

Al analizar el diseño de la Tabla 36, se nota que las estimaciones realizadas por Minitab para los valores F y p se presentan en la salida. Esto ocurre porque el modelo señala que existe una

variabilidad superior entre los grupos en comparación con la variabilidad interna de los grupos y hay suficiente grado de libertad para el error (G.L error = 3). El software Minitab lo calcula indicando que en el análisis realizado el error tiene tres grados de libertad, esto significa que hay tres valores independientes que pueden variar para estimar el error residual después de ajustar el modelo.

Cuando sea mayor número de grados de libertad para el error suele implicar una estimación más precisa del error residual, mientras que un menor número de grados de libertad puede indicar una menor precisión y mayor riesgo de error en las conclusiones del análisis.

**Tabla 39**

*Resumen del modelo de análisis de varianza*

<b>S</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad. (ajustado)</b>	<b>R-cuad. (pred)</b>
0.05541	97.46%	91.54%	98.30%

*Nota.* Data del Software MINITAB 20

### **6.2.1 Modelo matemático de correlación para la optimización de recuperación de Cu % del proceso**

Según el análisis de diseño factorial 2<sup>3</sup>, utilizando el software MINITAB 20, la ecuación de regresión expresada en unidades no codificadas es:

$$Y = 50.3 + 0.607 A + 0.585 B + 3.50 C - 0.00880 A *B - 0.0545 A*C - 0.0537 B *C + 0.000800 A*B*C - 0.0550 \text{ Punto Central}$$

Donde:

A: Granulometría (%malla)

B: Dosificación de reactivos (g/tn)

C: Tiempo de flotación (min)

### 6.2.2 Optimización de respuesta de la recuperación de Cu%

Con el modelo de optimización de la respuesta se maximiza la recuperación de cobre, ver la figura 52.

**Tabla 40**

*Parámetros de la respuesta*

---

<b>Respuesta</b>	<b>Meta</b>	<b>Inferior</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Superior</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Importancia</b>
(%) Rec.Cu	Máximo	88.45	89.28		1	1

---

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 41**

*Solución de la optimización*

---

<b>Solución</b>	<b>Granulometría (%malla)</b>	<b>Dosificación de reactivos (g/tn)</b>	<b>Tiempo de flotación (min)</b>	<b>Recuperación de Cu (%) Ajuste</b>	<b>Deseabilidad compuesta</b>
1	60	50	6	89.265	0.981928

---

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 42**

*Predicción de respuesta múltiple*

Variable	Valor de configuración
Granulometría (% malla)	60
Dosificación de reactivos (g/tn)	50
Tiempo de flotación (min)	6

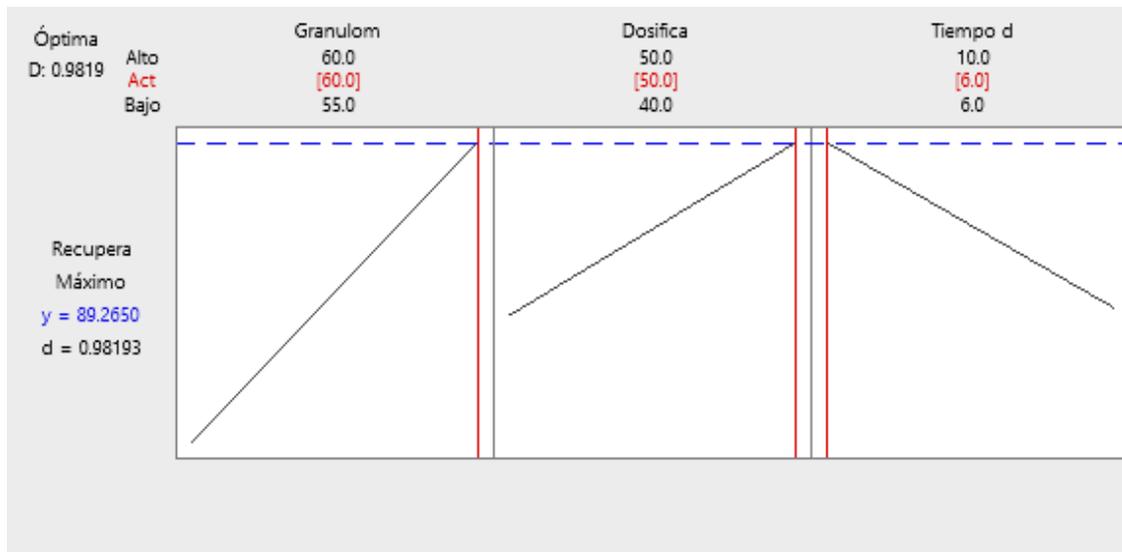
  

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
% Rec. Cu	89.2650	0.0579	(89.0808; 89.4492)	(89.0023; 89.5277)

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Figura 51**

*Gráfica de optimización de recuperación de cobre, según el modelo matemático*



*Nota:* Data de Software MINITAB 20

Podemos observar que bajo los valores que nos darán el resultado óptimo para nuestro fenómeno nuestras variables tienen una pendiente positiva lo cual indica que todos los factores son directamente proporcionales al factor de respuesta.

Siempre se trata buscar de maximizar en la recuperación mediante el procedimiento de flotación de los minerales mixtos de cobre del Yacimiento minero Ancasilla Sol Candente I.

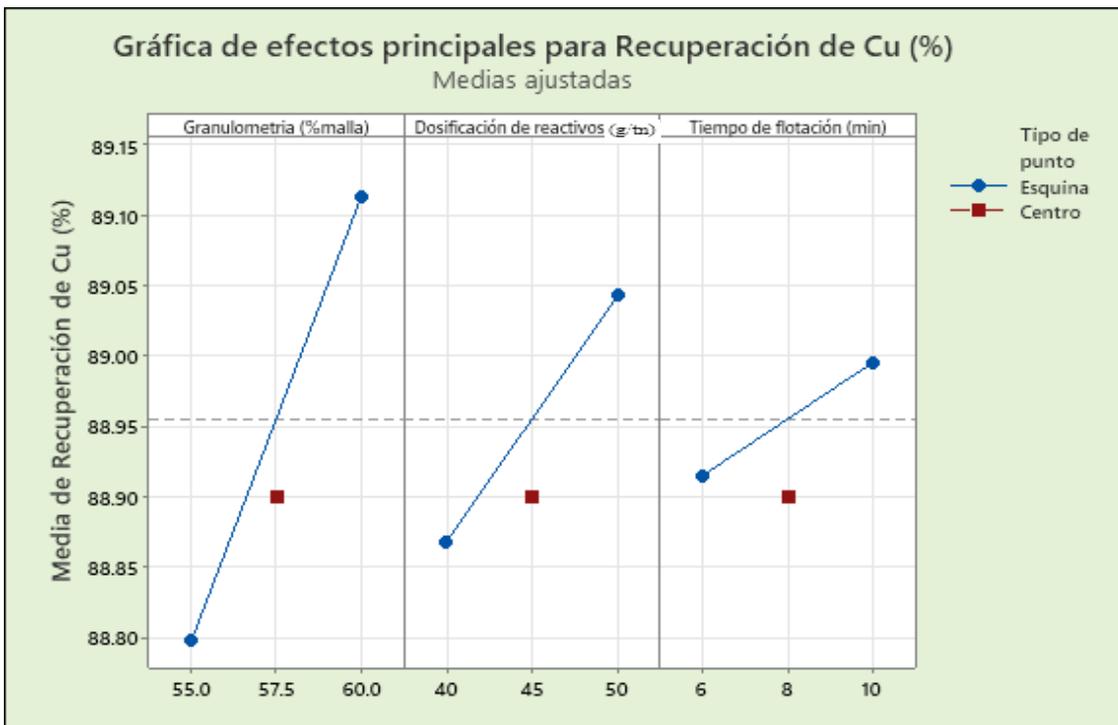
Según el diseño, la mayor recuperación de cobre se logra con las variables de Granulometría 60% -200 malla (A), Dosificación de reactivos Z6 50 g/tn (B) y el tiempo de flotación 6 minutos (C).

### 6.3 Análisis de los efectos principales de cada variable en la recuperación

En la Figura 53 se pueden ver líneas con pendientes pronunciadas que representan factores dentro del modelo. Si estas líneas no son pronunciadas, quedarán fuera del modelo. En este caso las variables de granulometría (% malla) es más significativo que la dosificación de reactivos Z6 y tiempo de flotación.

**Figura 52**

*Gráfica de efectos principales para recuperación de Cu %*



*Nota:* (A: Granulometría (% malla), B: Dosificación de reactivos(g/tn), C: Tiempo de flotación(minutos). Elaborado en Minitab 20.

Esta gráfica muestra cómo cada factor individual afecta la recuperación de cobre:

- Factor A: Tiene la pendiente más pronunciada, lo que indica el mayor efecto. Al aumentar A de su nivel bajo a alto, la recuperación de Cu aumenta aproximadamente de 88.8% a 89.1%. Este es el factor más influyente.
- Factor B: Muestra una pendiente positiva moderada. Al incrementar B, la recuperación aumenta de aproximadamente 88,85% a 89,05%.
- Factor C: Tiene la pendiente más suave, indicando el menor efecto. Al aumentar C, la recuperación sube ligeramente de 88,9% a unos 88,95%.

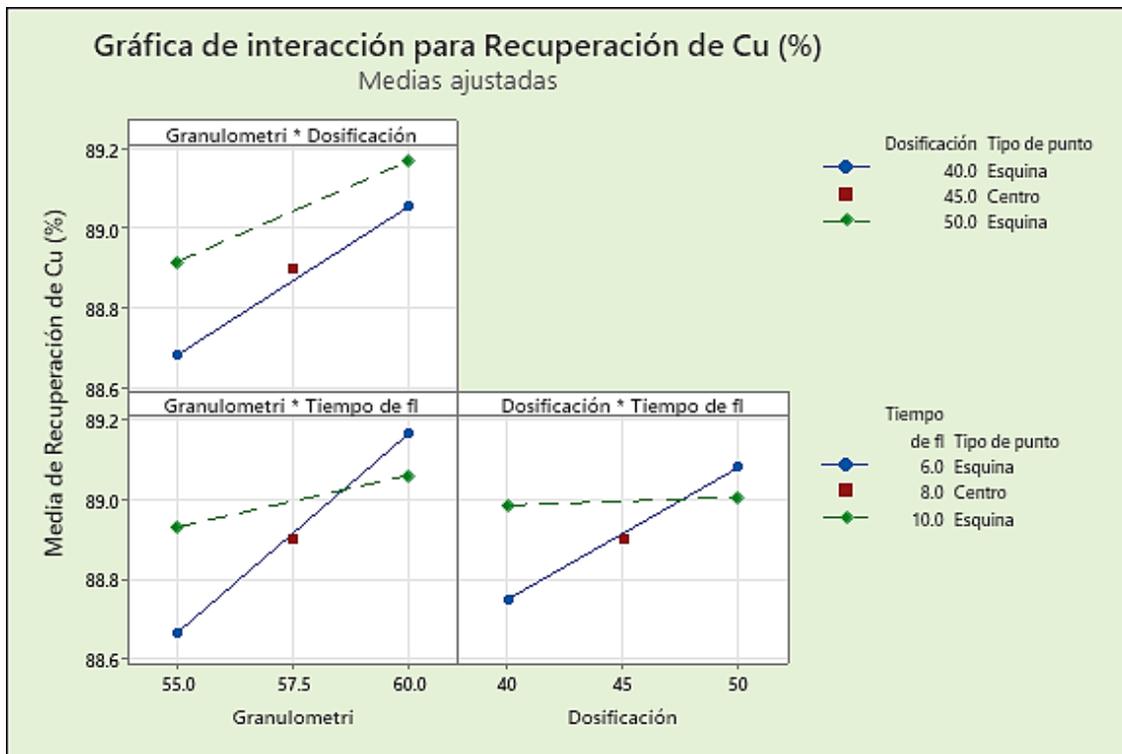
La grafica de factoriales nos da a conocer el tipo y grado de incidencia de nuestros factores en el fenómeno para cual podemos ver que todos tienen una inclinación positiva, lo cual nos dice que todos intervienen de forma directamente proporcional a nuestro factor de respuesta, podemos ver que el factor que tiene mayor incidencia es la granulometría, seguido de la dosificación de reactivos y por último el tiempo de flotación.

#### **6.4 Análisis de los efectos de las interacciones en la recuperación**

La Figura 52 nos muestra el impacto de cada variable de forma independiente. Sin embargo, no se mostraron efectos de las interacciones entre las variables presentes. Estos efectos lo visualizamos en la figura 53.

**Figura 53**

Gráfica de interacción para recuperación de Cu %



Nota: (A: Granulometría (% malla), B: Dosificación de reactivos(g/tn), C: Tiempo de flotación(minutos). Elaborado en Minitab 20

Esta gráfica muestra cómo los factores interactúan entre sí:

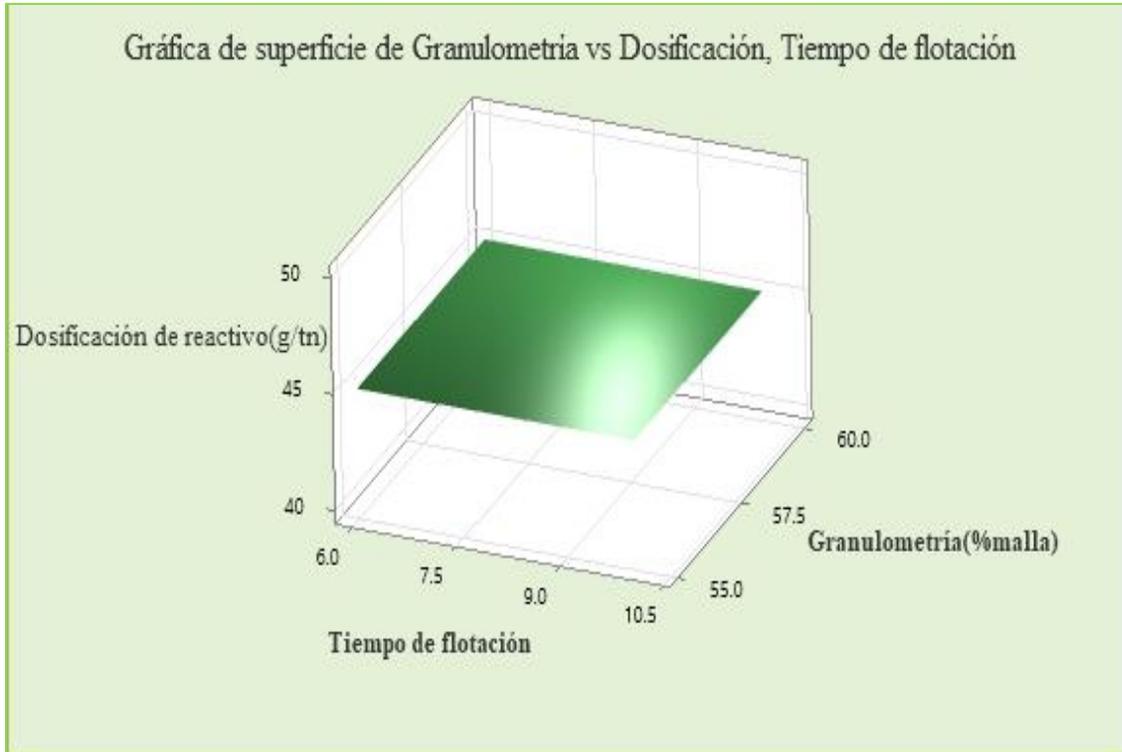
- Interacción AB: Las líneas son casi paralelas, lo que sugiere una interacción mínima entre A y B.
- Interacción AC: Las líneas se cruzan, indicando una fuerte interacción negativa. Cuando A esté bajo, aumente C incrementa la recuperación. Pero cuando A es alto, aumenta C disminuye la recuperación.
- Interacción BC: Las líneas convergen, mostrando una interacción negativa moderada. El efecto positivo de B en la recuperación es más pronunciado cuando C está en su nivel bajo.

## 6.5 Gráfico de superficie y contornos de respuesta

La relación potencial entre las variables de estudio se muestra en las figuras 54, 55 y 56.

### Figura 54

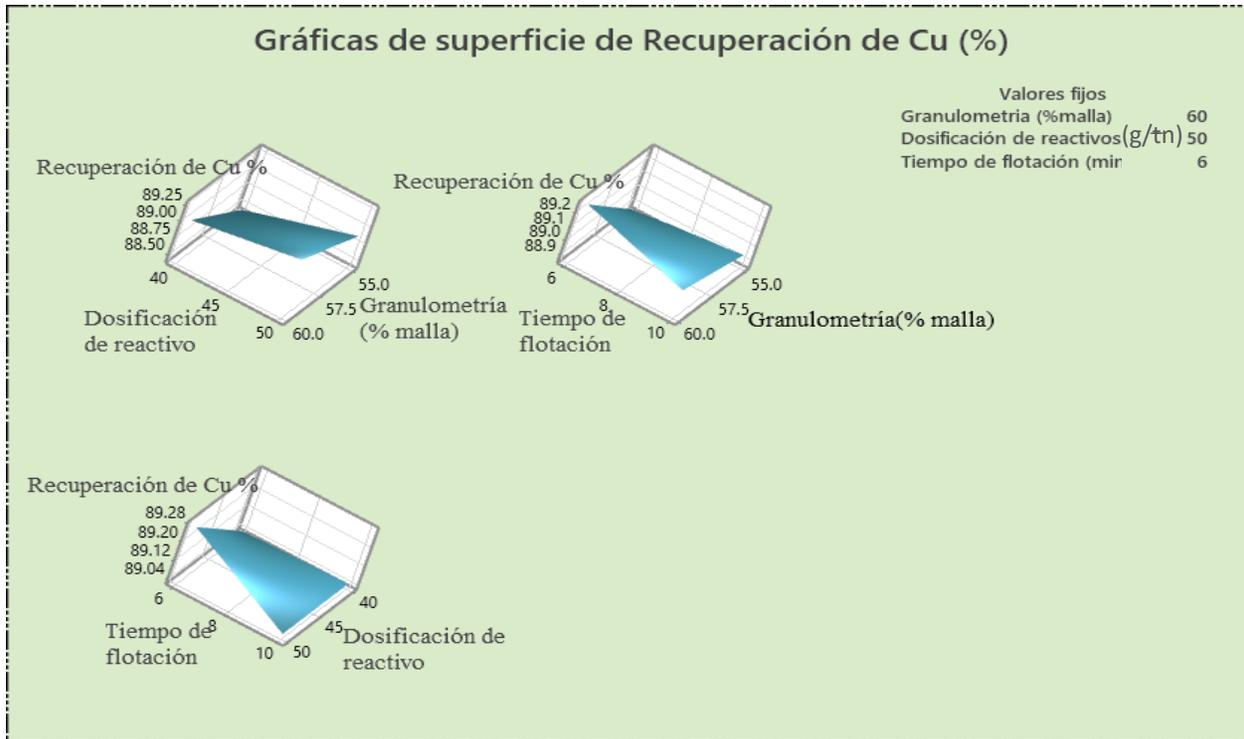
*Gráfica de superficie de recuperación vs variables independientes*



*Nota.* Data de Software MINITAB 20

**Figura 55**

*Gráfica de superficies para la recuperación de Cu %*

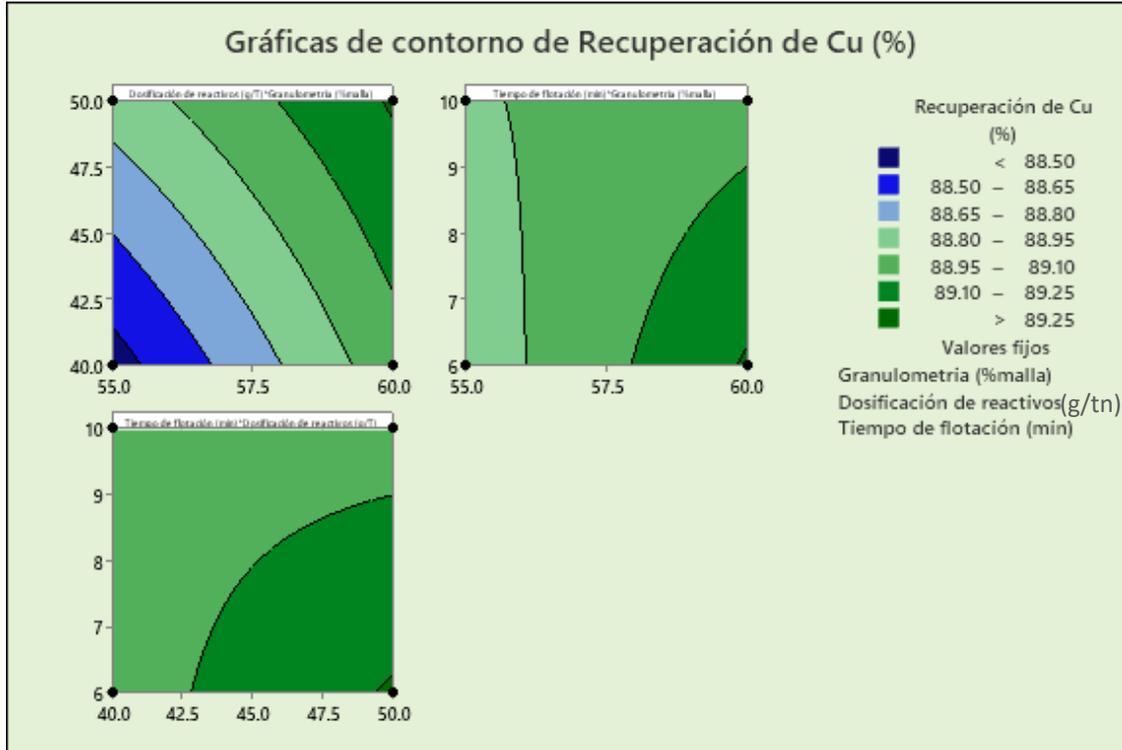


*Nota:* Data de Software MINITAB 20

La figura anterior a diferencia de grafica de contorno esta nos permite ver el comportamiento en conjunto de tres variables mediante una superficie, aquí podemos ratificar y observar de otra manera que todas las variables independientes tienen una incidencia positiva respecto al porcentaje de recuperación de cobre.

**Figura 56**

*Gráfica de contorno de recuperación vs variable independientes*

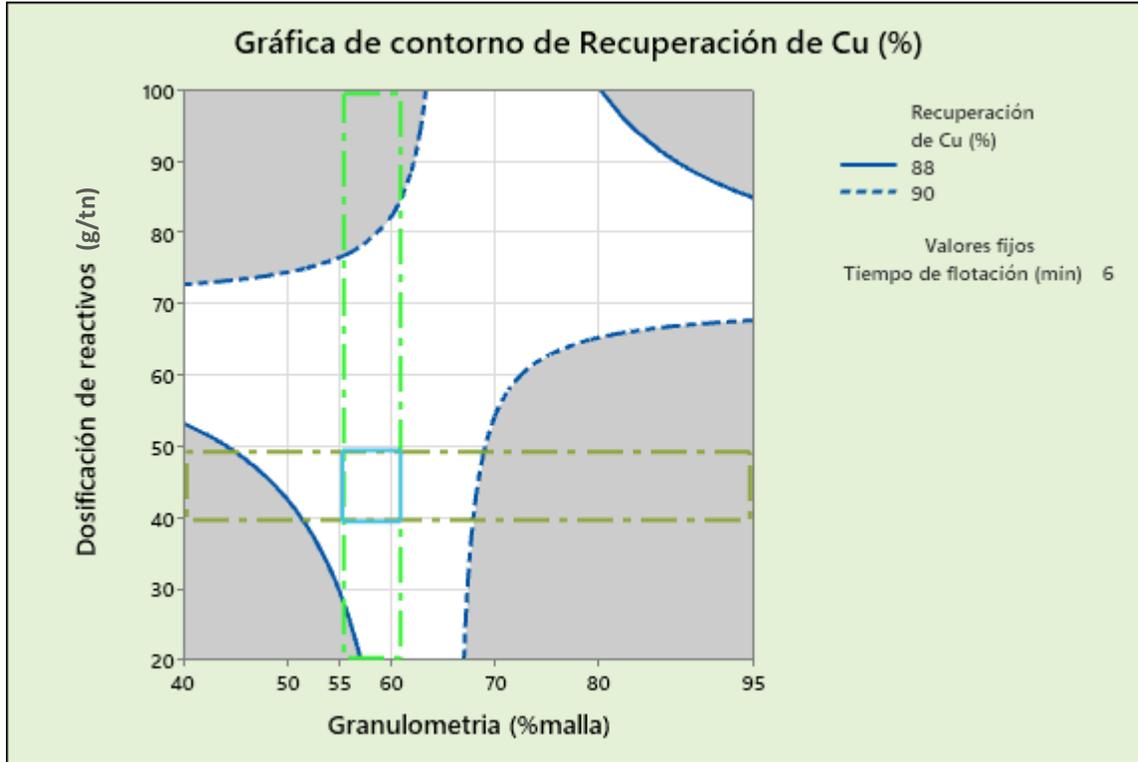


*Nota:* Data de Software MINITAB 20

La grafica de contorno tiene como característica principal mostrar la interacción de factores de 2 a 2 respecto del factor de respuesta por medio de áreas coloreadas, siendo el color verde oscuro el área que muestra los valores óptimos para nuestro fenómeno, este nos muestra que bajo las condiciones determinadas como optimas tenemos áreas relativamente grandes lo cual indica que tenemos un buen intervalo de operación para nuestras variables.

**Figura 57**

*Gráfica de contorno granulometría vs dosificación de reactivos para la recuperación de Cu*

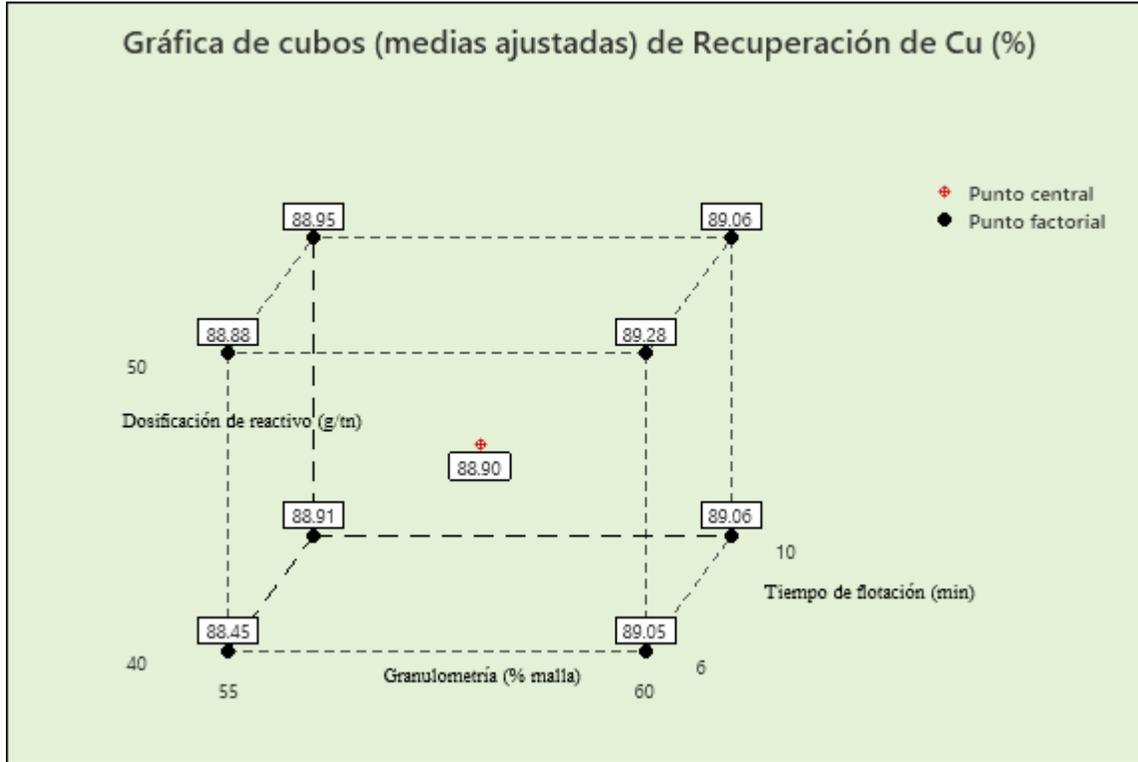


*Nota:* Data de Software MINITAB 20

La gráfica de contorno nos permite colocar los intervalos para los cuales se dan una recuperación óptima en este caso tomamos el siguiente intervalo [88% al 90%] como valor fijo le damos al tiempo un valor de seis minutos debido a que en dicho valor es el valor óptimo de este factor, así mismo usamos los factores A y B debido a que son los que tiene la mayor incidencia en el fenómeno de estudio, las líneas punteadas indican los valores máximos y mínimos tomados para nuestro diseño de experimentos, el área de la gráfica de color blanco indica que en dicha área representa el rango óptimo de recuperación, el rectángulo de color celeste es el área donde llegamos a valores que se encuentran dentro de nuestro intervalo deseado.

**Figura 58**

*Gráfica de cubos (medias ajustadas) de recuperación de Cu %*



*Nota.* Data de Software MINITAB 20

Esta gráfica muestra la recuperación predicha para cada combinación de factores:

- La mayor recuperación (89,28%) se obtiene con A alto, B alto y C bajo.
- La menor recuperación (88,57%) ocurre con A bajo, B bajo y C alto.
- Cambiar A de bajo a alto generalmente resulta en un aumento significativo en la recuperación.
- El efecto de B es más pronunciado cuando A es alto y C es bajo.
- El efecto de C varía dependiendo de los niveles de A y B, lo que confirma las interacciones observadas.

En conclusión, para maximizar la recuperación de Cu, se debería:

- Mantener A en su nivel alto
- Mantener B en su nivel alto
- Ajustar C considerando sus interacciones con A y B, pero generalmente mantenido bajo

## CONCLUSIONES

- Se consideran que las variables operativas más influyentes en el proceso de flotación para la recuperación de cobre del yacimiento minero Anccasilla Sol Candente I, son la granulometría y la dosificación de reactivos, para una composición de 9.40% de cobre y 1.49% de óxidos.
- El tamaño de partícula más adecuado para este mineral es de 60.0 % malla -200, el cual, produjo la mayor recuperación media de cobre (89.2925%). La granulometría demostró tener el efecto más significativo ( $p=0.05$ ) y positivo (efecto=0.3150), un valor  $p$  mayor a 0.05 sugiere que la variable en cuestión no tiene un impacto significativo en los resultados y el efecto se refiere a la magnitud de la diferencia entre las medias de los grupos.
- Se determina que la dosificación óptima de colector Z-6 es de 50 g/tn, resultando en una recuperación media de cobre de 89.0425%. La dosificación de reactivos mostró un efecto significativo ( $p=0.025$ ) y positivo (efecto=0.1750), siendo el segundo factor más influyente, se ha evaluado esta dosificación en un rango determinado de acuerdo a la ley de cobre.

- El tiempo de flotación por sí solo no mostró un efecto significativo ( $p=0.122$ ), sus interacciones con la granulometría y la dosificación de reactivos resultaron significativas ( $p=0.027$  y  $p=0.037$  respectivamente). El tiempo de 10 minutos produjo la mayor recuperación media (88.9950%), pero las diferencias entre los tiempos estudiados no fueron estadísticamente significativas, a mayor tiempo más insignificante (no es importante) por lo tanto a menor tiempo es más óptimo y con más significancia.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda a los futuros investigadores implementar un control riguroso de la granulometría, teniendo un buen control en la moliendabilidad adicionando las bolas de acero de acuerdo al desgaste para llegar a una liberación óptima.
- ✓ Se recomienda a los investigadores ajustar la dosificación de los reactivos colectores y los modificadores monitoreando constantemente su efecto en la recuperación y ajustando según sea necesario en función de las variaciones en la composición del mineral.
- ✓ Se aconseja a todos los interesados en el campo de la flotación realizar pruebas piloto a mayor escala para validar los resultados obtenidos en este estudio y asegurar su aplicabilidad en condiciones de producción real, también hacer el uso de un reactivo para los minerales óxidos.

## Referencias bibliográficas

- Alvarado, D. C. (2016). *Influencia de la dosificación de los colectores AP-3418 y AR404 sobre la recuperación de plomo y zinc por flotación selectiva de un mineral polimetálico de la empresa minera occidental 2 de Cajamarca S.R.L.* Cajamarca, Perú: Universidad Privada del Norte, carrera de ingeniería de minas.
- Antapaccay. (2019). *Manual de Operación de Planta Concentradora*. Perú.
- American Psychological Association. (2020). *Publication manual of the American Psychological Association* (7th ed.). <https://doi.org/10.1037/0000165-000>.
- Araya, A. B. (2021). *Análisis Granulométrico de minerales*. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Arrau, J. (2006). *Manual General de Minería y Metalurgia*. (P. minero, Ed.) Santiago, Chile: Servicios de Impresión Laser S.A. Obtenido de [https://www.academia.edu/9428635/MANUAL\\_GENERAL\\_DE\\_MINERIA\\_Y\\_METALURGIA](https://www.academia.edu/9428635/MANUAL_GENERAL_DE_MINERIA_Y_METALURGIA)
- Astuhuaman, G. G. (2015). *Estadística e Investigación*. Perú.
- Ballester, A. (2000). *Metalurgia Extractiva. Volumen 1: Fundamentos*. Madrid: Síntesis.
- Ballester, A. V. (2014). *Metalurgia Extractiva*. Madrid, España: Síntesis.
- Blanco, E. A. (2021). *Minería*. Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo - Lambayeque - Perú.
- Bravo, G. A. (2008). *Flotación de minerales de cobre, plomo y zinc*. Perú.
- Burga, J. D. (2011). *Diccionario Geológico*. (Arthaltuna, Ed.) Callao, Perú: Art. Grouting S.A.C.

- Capponi, F., Matiolo, E., Rodriguez, R., Rubio, J. (2007). *Técnicas no convencionales de flotación de partículas finas de sulfuros de cobre y molibdeno*. Colombia.
- Cardenas Castro, M. Y. (2022). *Optimizar la recuperación de cobre por la influencia de P80*. UNSAAC.CUSCO.
- Castillo, M. J. (2006). *Investigación metalúrgica a nivel de planta piloto*. Perú. Obtenido de Obtenidode:<http://app.tecsup.edu.pe/file/sga/documentos/revistaLi/I>
- Castro, S. y. (1998). *Flotación Fundamentos y Aplicaciones*. (C. Lima-Perú, Ed.) Chile: Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción.
- Chuta, T. C. (2021). *Influencia de la dosificación de reactivos en la recuperación de oro mediante pruebas metalúrgicas de flotación a nivel de laboratorio*. Arequipa - Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Cochilco. (2017). *Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades*.
- Conejeros, T. V. (2003). *Procesamiento de minerales, Apunte para alumnos de Ingeniería Metalúrgica*. Chile, Antofagasta: Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas Universidad Católica del Norte.
- Delgado, G. (2016). *Operaciones en planta concentradora de mineral polimetálico y óxidos de plomo-plata-cobre de sociedad minera S.A*. Arequipa, Perú: UNSA.
- Echenique, E. E. (2017). *Metodología de la investigación. Manual autoformativo interactivo* (Tercera edición ed.). Huancayo, Perú: Universidad Continental.
- Egg, E. A. (1995). *Técnicas de Investigación Social* (24ª edición ed.). Buenos Aires, Buenos Aires: Lumen.

- Espinoza, G. I. (2013). *Variables y propiedades que influyen en el proceso de flotación*. Antofagasta, Chile: Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas.
- FORGIARINI, J.-L. S. (2007). *Fundamentos de la flotación* (Vol. Version # 3). (L. F. QUÍMICA, Ed.) Mérida, Venezuela: F. I. R. P.
- Gaudin, A. M. (1957). *Flotation*. Estados Unidos: JaiGyan.
- Guedez, J.-L. S. (2007). *Fundamentos de la flotación - Laboratorio de formulación, interfases reología y procesos*. Mérida, Venezuela: F.I.R.P.
- Guerreros, M. M. (2012). *Cinética de procesos metalúrgicos: Cinética de flotación*. (F. d. Materiales, Ed.) Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Gupta, D. C. (2006). *Metalurgia química : principios y práctica*. India.
- Hamid, K. y. (2011). *Flotation Frothers: Review of Their Classifications, Properties and Preparation*. *Journal of Minerals Engineering*.
- Hernández, S. R. (2014). *Metodología de la investigación* (sexta ed.). México: McGraw-Hill.
- HUDBAY. (2023). *Manual de operaciones de planta concentradora flotación*. CUSCO, Perú.
- Ingeominas. (2001). *Mejoramiento Tecnológico del Procdesamiento del mineral*. Cali.
- Kawatra, S. K. (1992). *Froth Flotation - Fundamental Principles*. Recovery of Pyrite in Coal Flotation: Entrainment or Flotation, 1-30.
- Linares, M. I. (2014). *Procesamiento de minerales - mineralurgia ii principios de la flotación de minerales*. TACNA: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.

- López; H. y Ipanaqué; O. (2008). *Caracterización y optimización de flotación a nivel laboratorio del mineral de cobre de la minera candelaria*. Lima, Perú.
- Marco Tulio Loza Holgado y Gino Jr. Rivera del Carpio C. (2009). *Concentración por el método de flotación por espumas del mineral sulfurado de cobre-molibdeno del proyecto Las Bambas*. Cusco-Perú.
- Medina Godoy, J.A. . (2019). *Análisis de desviación de P80 en etapa de clasificación de molienda*. Chile.
- Molina, V. (2017). *Estudio del efecto de la aplicación de espumantes en el proceso de flotación de mineral mixto de cobre*. Santiago, Chile: Pontificia universidad catolica de chile, Grado de magister en ciencias de la ingeniería.
- Ortiz, A. A. (2015). *Flotación y Concentración de minerales*. Lima - Perú: Primera Edición.
- Oscanoa, A. R. (2020). *Influencia del tamaño de partículas y la formación de espumas en la recuperación de minerales sulfurados de cobre por flotación*. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Paredes, R. y. (2016). *Stiffness of a Granular Base Under Optimum and Saturated Water Contents*. Revista Tecnura.
- Srdjan M. Bulatovic, S. (2007). *Handbook of Flotation Reagents, Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*. Elsevier Science & Technology Books,.
- Sutulov, Alexander. (1968). *Flotación de Minerales*. Chile.

Velásquez, B. V. (2018). *Optimización de la recuperación de cobre en el circuito de flotación de Codelco-El Salvador en base a la evaluación de nuevas formulaciones de reactivos de flotación*. Chile: Universidad de Concepción.

Yianatos, J. (2005). *Flotación de minerales*. Valparaiso - Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.

Yucra, C. D. (2022). *Evaluación metalúrgica de la flotación de sulfuros de cobre con recuperaciones bajas en planta concentradora, mediante pruebas de laboratorio*. Arequipa, Perú: Tesis.

Zumaran Ferrofin, D. (2017). *Evaluación de la influencia de las variables en la distribución*. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.: tesis de investigación.

# ANEXOS

## Anexo N° 1 Matriz de consistencia

### ANÁLISIS DE VARIABLES PARA LA RECUPERACIÓN DEL COBRE POR FLOTACIÓN A PARTIR DE MINERALES MIXTOS DEL YACIMIENTO MINERO ANCCASILLA, SOL CANDENTE I DISTRITO DE CHIARA – ANDAHUAYLAS - 2023

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGÍA
¿Qué variables serán las que influyen en la eficiencia de la recuperación del cobre en el proceso de flotación del yacimiento minero Anccasilla, Sol Candente I distrito de Chiara provincia de Andahuaylas?	Determinar las variables operacionales en el proceso de flotación para recuperar eficientemente el contenido de cobre de los minerales mixtos del yacimiento minero Anccasilla, Sol Candente I distrito de Chiara provincia de Andahuaylas.	Determinando las variables operacionales adecuadas se incrementará la recuperación de cobre por flotación de los minerales mixtos del yacimiento minero Anccasilla Sol Candente I de Chiara.	<b>Dependiente:</b> Recuperación eficiente del cobre <b>Dimensiones:</b> Contenido de cobre	<b>Tipo de investigación:</b> Tecnológico aplicada <b>Nivel de investigación:</b> Explicativo <b>Enfoque de investigación:</b> Cuantitativo <b>Diseño de Investigación:</b> Experimental, Causa - efecto. Causa                      efecto X                              → Y
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	Independientes:	
¿Cuál será el tamaño de partícula óptima que responda al proceso de flotación?	Determinar el tamaño óptimo de las partículas del mineral para el proceso de flotación.	El tamaño de las partículas del mineral más adecuado le corresponderá a 60% malla -200.	Granulometría del reactivo colector Z-6 Tiempo de flotación	Análisis de Recuperación de Cu variables
¿Cuál será la dosificación óptima del colector Z – 6 (Xantato amílico de potasio) para lograr el máximo porcentaje de recuperación de concentrado de cobre?	Establecer la dosificación adecuada del colector para lograr un buen porcentaje de recuperación del concentrado de cobre.	La dosificación adecuada del colector Z-6 permitirá una buena recuperación y calidad de concentrados de cobre.	<b>Dimensiones:</b> μm g/tn Minutos	<b>Población:</b> Todo el mineral del Yacimiento Minero Anccasilla Sol Candente <b>Muestra:</b> Representativa de 40 kg. <b>Muestreo:</b> método por puntos <b>Técnicas:</b> Revisión bibliográfica Reporte de análisis químico Pruebas metalúrgicas experimentales de reactivos Pruebas cinéticas
¿Cuál será el tiempo óptimo para obtener concentrados de cobre por flotación?	Realizar las pruebas cinéticas para conocer el tiempo óptimo de flotación de los minerales mixtos.	El tiempo de flotación necesaria para separar el mineral valioso de la ganga será de 10 minutos.		Pruebas metalúrgicas experimentales de reactivos Pruebas cinéticas <b>Instrumentos:</b> Balanza electrónica Juego de tamices Probetas pH metro Software Minitab

**Anexo N° 2: Serie de tamices de acuerdo a la norma ASTM y TYLER**

<b>ABERTURA</b>	<b>SERIE ASTM</b>	<b>SERIE TYLER</b>
	<b>N° DE TAMIZ</b>	<b>N° DE TAMIZ</b>
<b>107.6 mm</b>	4.24''	-
<b>101.6 mm</b>	4''	-
<b>90.5 mm</b>	3 1/2''	-
<b>76.1 mm</b>	3''	-
<b>64.0 mm</b>	2 1/2''	-
<b>53.8 mm</b>	2.12''	-
<b>50.8 mm</b>	2''	-
<b>45.3 mm</b>	1 3/4''	-
<b>38.1 mm</b>	1 1/2''	-
<b>32.0 mm</b>	1 1/4''	-
<b>26.9 mm</b>	1.06''	-
<b>25.4 mm</b>	1''	-
<b>22.6 mm</b>	7/8''	0.883''
<b>19.0 mm</b>	3/4''	0.742''
<b>16.0 mm</b>	5/8''	0.624''
<b>13.5 mm</b>	0.539''	0.525''
<b>12.7 mm</b>	1/2''	-
<b>11.2 mm</b>	7/16''	0.441''
<b>9.51 mm</b>	3/8''	0.371''
<b>8.0 mm</b>	5/16''	2.172''

<b>6.73 mm</b>	0.265''	3
<b>6.35 mm</b>	¼''	-
<b>5.55 mm</b>	3 ½''	3 1/2
<b>4760 μm</b>	4	4
<b>4000 μm</b>	5	5
<b>3360 μm</b>	6	6
<b>2830 μm</b>	7	7
<b>2380 μm</b>	8	8
<b>2000 μm</b>	10	9
<b>1680 μm</b>	12	10
<b>1410 μm</b>	14	12
<b>1190 μm</b>	16	14
<b>1000 μm</b>	18	16
<b>841 μm</b>	20	20
<b>707 μm</b>	25	24
<b>595 μm</b>	30	28
<b>500 μm</b>	35	32
<b>420 μm</b>	40	35
<b>354 μm</b>	45	42
<b>297 μm</b>	50	48
<b>250 μm</b>	60	60
<b>210 μm</b>	70	65

<b>177 μm</b>	80	80
<b>149 μm</b>	100	100
<b>125 μm</b>	120	115
<b>105 μm</b>	140	150
<b>88 μm</b>	170	170
<b>74 μm</b>	200	200
<b>63 μm</b>	230	250
<b>53 μm</b>	270	270
<b>44 μm</b>	325	325
<b>37 μm</b>	400	400

*Nota:* Norma ASTM y TYLER

Anexo N° 3: Análisis del mineral ley de cabeza



INFORME DE ENSAYO  
CM2023-1833

---

<b>A SOLICITUD:</b>	YENCE WILSON TOLEDO PUCA
<b>POR CUENTA DE:</b>	YENCE WILSON TOLEDO PUCA
<b>PRODUCTO DESCRITO COMO:</b>	Mineral Aurífero.
<b>TIPO DE ANALISIS:</b>	Análisis Químico de Minerales.
<b>DETALLE DE ANALISIS:</b>	Reconocimiento Au-Ag, Cu total, Cu Ox
<b>CANTIDAD DE MUESTRAS:</b>	01 Muestra.
<b>DESCRIPCION DE RECEPCION:</b>	En bolsa de plástico.
<b>FECHA DE RECEPCION:</b>	Código: YENCE 17-10-2023
<b>FECHA DE REPORTE:</b>	18-10-2023

**INTRUCCIONES DE ENSAYO:**

CMP-05-DETERMINACION DE Au-Ag POR FUNDICION -  
COPELACION DE MUESTRAS DE EXPLORACION  
CMP-04-DETERMINACION DE ANALISIS DE MINERALES POR  
DIGESTION DE TRES AODOS-AAS  
CMP-06-DETERMINACION DE Cu SOLUBLE

**DETALLE DE RESULTADOS**

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Au	Ag	Cu	Cu Ox
	METODO	CMP-09	CMP-04	CMP-01	CMP-06
	UNIDAD	Oz/Tc	Oz/Tc	%	%
	NEWMONT	Ley de Au	Ley de Ag	Ley de Cu	Ley de Cu Ox
YENCE	Mineral Au-Ag-Cu	0.088	1.610	9.40	1.49

Notas de almacenaje:  
Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.



**CONTROL MINERALS S.A.C.**  
Ing. Nelson Mejía Pizarro  
Jefe de Laboratorio Químico  
CPI: 187812

MZA. C Lote. 8 Apr. San Fernando (Altura Grillo Primax Socobaya) Arequipa-Arequipa  
Móvil: 940108691 / clientes@controlminerals.com.pe

## Anexo 4: Resultados de análisis químico de los concentrados de cobre



INFORME DE ENSAYO  
CM2024-3224

A SOLICITUD:	YENCE WILSON TOLEDO PUCA.
POR CUENTA DE:	YENCE WILSON TOLEDO PUCA.
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Concentrado de Cobre.
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Volumetría de Cu.
CANTIDAD DE MUESTRAS:	08 Muestras.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En frasco de plástico. Código: CONCENTRADO 1 – 8
FECHA DE RECEPCION:	17-02-2024
FECHA DE REPORTE:	19-02-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO: CMP-01-DETERMINACION DE Cu POR VOLUMETRIA

### DETALLE DE RESULTADOS

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Cu
	METODO	CMP-01
	UNIDAD	%
	NEWMONT	Ley de Cu
C1 CONCENTRADO 1	Concentrado Cu	30.65
C2 CONCENTRADO 2	Concentrado Cu	27.91
C3 CONCENTRADO 3	Concentrado Cu	28.00
C4 CONCENTRADO 4	Concentrado Cu	27.09
C5 CONCENTRADO 5	Concentrado Cu	28.27
C6 CONCENTRADO 6	Concentrado Cu	27.87
C7 CONCENTRADO 7	Concentrado Cu	28.51
C8 CONCENTRADO 8	Concentrado Cu	27.43

#### Notas de almacenaje:

Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.

**CONTROL MINERALS S.A.C.**  
  
**Ing. Moisés Mejía Yeo**  
 Jefe de Laboratorio Químico  
 CIP: 187812

## Anexo 5: Resultados de análisis químico de concentrado centrales



**CONTROL  
MINERALS**

INFORME DE ENSAYO  
CM2024-3225

A SOLICITUD:	YENCE WILSON TOLEDO PUCA.
POR CUENTA DE:	YENCE WILSON TOLEDO PUCA.
PRODUCTO DESCRITO COMO:	Concentrado de Cobre.
TIPO DE ANALISIS:	Análisis Químico de Minerales.
DETALLE DE ANALISIS:	Volumetría de Cu.
CANTIDAD DE MUESTRAS:	03 Muestras.
DESCRIPCION DE RECEPCION:	En frasco de plástico.
	Código: PC CONCENTRADO CENTRAL 1 – 3
FECHA DE RECEPCION:	17-02-2024
FECHA DE REPORTE:	19-02-2024

INTRUCCIONES DE ENSAYO: CMP-01-DETERMINACION DE Cu POR VOLUMETRIA

### DETALLE DE RESULTADOS

CODIGO MUESTRA	ELEMENTO	Cu
	METODO	CMP-01
	UNIDAD	%
	NEWMONT	Ley de Cu
PC1 CONCENTRADO CENTRAL 1	Concentrado Cu	28.03
PC2 CONCENTRADO CENTRAL 2	Concentrado Cu	28.46
PC3 CONCENTRADO CENTRAL 3	Concentrado Cu	29.00

Notas de almacenaje:  
Las muestras podrán ser retiradas por los interesados por un periodo de 30 días, caso contrario se procederá a desecharlas.

**CONTROL MINERALS S.A.C.**  
  
**Ing. Moisés Mejía Yto**  
Jefe de Laboratorio Químico  
CIP: 187812

**Anexo 6: Procedimiento de los ensayos en el laboratorio de procesamiento de minerales – UNSAAC**



Muestreo del mineral mixto de la zona Ancasilla Sol Candente I.



Preparación mecánica de la muestra en laboratorio de procesamiento de minerales UNSAAC.



Cálculo de la gravedad específica



Pruebas de la molienda a diferentes tiempos



Preparación de la pulpa para las pruebas de flotación



Inyección del aire, acondicionamiento de pulpa y dosificación del reactivo



Flotación por espumas en la celda Denver de laboratorio



Resultados obtenidos de las pruebas de flotación por espumas