

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



**TESIS**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES AURÍFEROS DE LA  
MATRIZ SULFURADA Y EVALUACIÓN DE PROCESOS DE GRAVIMETRÍA Y  
FLOTACIÓN DEL YACIMIENTO CONSTANZA – CORI-PUNO SAC**

**PRESENTADO POR:**

Br. DAVID LEGUIA MAUCAYLLE

Br. DELIA MAÑACCASA CUSIHUAMAN

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

**ASESOR:**

Ing. EDUARDO MARCELO QUISPE NINA

**CUSCO- PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES AURÍFEROS DE LA MATRIZ SULFURADA Y EVALUACIÓN DE PROCESOS DE GRAVIMETRÍA Y FLOTACIÓN DEL YACIMIENTO CONSTANZA - CORI - PUNO SAC.

presentado por: DAVID LEBUJA MAUCAYLLE con DNI Nro.: 48338712 presentado por: DELIA MAÑACCASA CUSHUAMAN con DNI Nro.: 47548852 para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el Software 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, 17 de DICIEMBRE de 2024

  
Firma

Post firma EDUARDO MARCELO GUISEPÉ NINA

Nro. de DNI 23957145

ORCID del Asesor 0000 - 0002 - 4473 - 1580

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259 : 416905858

# DAVID LEGUIA MAUCAYLLE

## INFORME DE TESIS

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

---

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:416905858

Fecha de entrega

17 dic 2024, 10:09 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 dic 2024, 10:18 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

delia observadas.pdf

Tamaño de archivo

4.2 MB

206 Páginas

33,470 Palabras

190,211 Caracteres

# 9% Similitud general

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

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

## Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**  
21 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**  
6 caracteres sospechosos en N.º de página  
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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

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

## 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 de investigación intitulado:

“CARACTERIZACIÓN DE LOS MINERALES AURÍFEROS DE LA MATRIZ SULFURADA Y EVALUACIÓN DE PROCESOS DE GRAVIMETRÍA Y FLOTACIÓN DEL YACIMIENTO CONSTANZA- CORI-PUNO SAC”  
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

El presente Investigación Tecnológica es de carácter correlacional-experimental, en el cual se estudió la caracterización del mineral y el comportamiento de los minerales auríferos mediante procesos unitarios de gravimetría y flotación para obtener una mayor recuperación.

Los graduandos

## **DEDICATORIA**

A mis padres Vicente Leguia Huayana y Teresa Maucaylle Amable y hermanos. Por darme los consejos, motivación, alentarme y por creer en mí siempre para lograr mis objetivos todo con sacrificio y levantarme cada día.

A mis amigos y compañeros. Por los bonitos momentos que pasamos en la universidad fracasos y frustraciones, siempre se aprende de las caídas.

**David Leguia Maucaylle**

Dedico esta tesis a Dios, a mi madre Fidelia por su amor, sacrificio y confianza brindada en los momentos difíciles de mi vida, a mi padre Valerio por sus sabios consejos que me han encaminado para llegar al éxito, enseñado a ser perseverante y a no rendirme ante los desafíos, a mis dos adoradas hijas por ser mi fortaleza para seguir este camino montañoso, a mis hermanos, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida y en mis logros.

**Delia Mañaccasa Cusihuaman**

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación experimental se centró en caracterizar el mineral Constanza y evaluar su comportamiento en los procesos de gravimetría y flotación, con el objetivo de mejorar la recuperación de oro (Au). Las pruebas de caracterización y experimentación se realizaron en el laboratorio metalúrgico de la unidad minera Cori Puno SAC y en el laboratorio de concentración de minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalurgia de la UNSAAC. El mineral Constanza presenta características específicas como una gravedad específica de 2.83, un pH de 6.5, y un índice de Bond de 14.04 kWh/tc, con una ley de cabeza de 2.23 g/t de Au. Los principales sulfuros presentes son Pirrotita, Lollingita y Arsenopirita. El oro, en su forma de electrum, se encuentra en partículas menores a 13 micras, tanto en la Arsenopirita como en la Estibina (Au-Sb). Antes de la concentración, el mineral se somete a un proceso mecánico de chancado, obteniendo un producto de 100% pasante malla -10. Luego, se determina la moliendabilidad del mineral, cuyo tiempo de molienda óptimo es de 20 minutos y 48 segundos para alcanzar la granulometría adecuada. Se utilizó un diseño factorial  $2^3$  con 2 puntos centrales y un mínimo de 10 pruebas para optimizar la recuperación de oro. Las variables óptimas en el proceso de gravimetría fueron 3 Psi, frecuencia de 80 Hz y granulometría de 60% malla -200, logrando una recuperación máxima de 29.85%. El relave de la gravimetría se usó como cabeza de flotación, con una ley de 1.82 g/t de Au. Se realizó una prueba de cinética de flotación para determinar el tiempo de flotación óptimo, el cual fue escalado desde el laboratorio (2 a 4) a la operación de planta, resultando en un tiempo de flotación de 14 minutos y 54 segundos, según el modelo de García Zúñiga. Las pruebas de flotación se diseñaron con un factorial fraccionado  $2^{(4-1)}$ , con un mínimo de 8 pruebas, sin repetición, y 2 puntos centrales. Con las variables óptimas en flotación, se logró una recuperación máxima de 63.14% de Au. Finalmente, en la prueba de flotación cíclica, con granulometría de 90% malla -200, dosificación de reactivos Z-6 (24 g/t), AP-4037 (76 g/t) y sulfato de cobre (40 g/t), se obtuvo una recuperación global de 92.99%, que es la suma de los procesos gravimétrico y de flotación.

**Palabras clave:** Flotación, Gravimetría, cinética, Arsenopirita, recuperación, Constanza.

## ABSTRACT

The present experimental research work focused on characterizing the Constanza mineral and evaluating its behavior in the gravimetry and flotation processes, with the objective of improving the recovery of gold (Au). The characterization and experimental tests were carried out in the metallurgical laboratory of the Cori Puno SAC mining unit and in the mineral concentration laboratory of the Professional School of Metallurgical Engineering of UNSAAC. The Constanza mineral presents specific characteristics such as a specific gravity of 2.83, a pH of 6.5, and a Bond index of 14.04 kWh/tc, with a head grade of 2.23 g/t of Au. The main sulfides present are Pyrrhotite, Lollingite and Arsenopyrite. Gold, in its electrum form, is found in particles smaller than 13 microns, both in Arsenopyrite and Stibnite (Au-Sb). Before concentration, the mineral is subjected to a mechanical crushing process, obtaining a 100% passable product with a mesh size of -10. The grindability of the mineral is then determined, with an optimal grinding time of 20 minutes and 48 seconds to achieve the appropriate granulometry. A  $2^3$  factorial design with 2 central points and a minimum of 10 tests was used to optimize gold recovery. The optimal variables in the gravimetry process were 3 Psi, a frequency of 80 Hz and a granulometry of 60% mesh -200, achieving a maximum recovery of 29.85%. The gravimetry tailings were used as a flotation head, with a grade of 1.82 g/t Au. A flotation kinetics test was performed to determine the optimal flotation time, which was scaled from the laboratory (2 to 4) to the plant operation, resulting in a flotation time of 14 minutes and 54 seconds, according to the García Zúñiga model. The flotation tests were designed with a fractional factorial  $2^{(4-1)}$ , with a minimum of 8 tests, without repetition, and 2 central points. With the optimal flotation variables, a maximum recovery of 63.14% of Au was achieved. Finally, in the cyclic flotation test, with a particle size of 90% mesh -200, dosage of reagents Z-6 (24 g/t), AP-4037 (76 g/t) and copper sulphate (40 g/t), an overall recovery of 92.99% was obtained, which is the sum of the gravimetric and flotation processes.

Keywords: Flotation, gravimetry, kinetics, arsenopyrite, recovery, Constanza.

## INDICE

PRESENTACIÓN.....	i
DEDICATORIA .....	ii
RESUMEN .....	iii
ABSTRACT.....	iv
INDICE.....	1
INDICE DE TABLAS .....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	15
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	19
INTRODUCCION .....	20
CAPÍTULO I .....	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	21
1.1 Situación Problemática.....	21
1.2 Formulación de Problema .....	22
1.2.1 Problema General.....	22
1.2.2 Problema Específico.....	22
1.3 Justificación.....	22
1.3.1 Conveniencia.....	22
1.3.2 Relevancia social.....	22
1.3.3 Relevancia Tecnológica .....	23
1.3.4 Valor Teórico .....	23

	2
1.3.5 Utilidad Metodológica.....	23
1.4 Objetivos de Investigación.....	23
1.4.1 Objetivo General.....	23
1.4.2 Objetivos Específicos.....	23
CAPITULO II.....	25
MARCO TEORICO.....	25
2.1 Antecedentes Internacionales.....	25
2.2 Antecedentes Nacionales.....	25
2.3 Antecedentes Locales.....	27
2.4 Conceptos Básicos.....	28
2.4.1 Minerales y Menas.....	28
2.4.2 Métodos de Identificación Mineralógica.....	29
2.4.2.1 Difracción de Rayos x.....	29
2.4.2.2 Caracterización Geoquímica.....	29
2.4.2.3 Caracterización Fisicoquímica.....	30
2.4.2.4 Determinación de Densidades.....	30
2.4.2.5 Determinación del Grado de Acidez.....	30
2.4.2.6 Caracterización Metalúrgica.....	30
2.5 Métodos de Tratamiento en Menas Auríferas.....	30
2.5.1 Introducción a la Concentración de Minerales.....	30

2.5.2	Concentración Gravimétrica .....	31
2.5.2.1	Generalidades .....	31
2.5.2.2	Fundamentos y Criterios de Aplicación .....	32
2.5.3	Métodos de Separación por Gravedad .....	34
2.5.4	Equipos de Concentración Gravimétrica.....	34
2.5.5	Concentradores Convencionales .....	35
2.5.5.1	Jigs.....	35
2.5.5.2	Mesas vibratorias.....	37
2.5.5.2.1	Variables de operación de las Mesas Vibratorias.....	38
2.5.5.3	Características de la Concentración en Mesas Vibratorias .....	39
2.5.5.4	La Capacidad de la Mesa Vibratoria Depende de los Sigüientes factores: 40	
2.5.5.5	Concentración en Espirales .....	40
2.5.5.6	Concentración Gravimétrica - Centrífuga .....	43
2.5.5.6.1	Generalidades .....	43
2.5.5.6.2	Equipos de Concentración Gravimétrica – Centrífuga .....	43
2.5.5.7	Concentradores Falcon.....	44
2.5.5.7.1	Generalidades .....	44
2.5.5.7.2	Parámetros Operacionales de Diseño .....	45
2.5.5.7.3	Características .....	45

2.5.5.7.4	Ventajas .....	46
2.5.5.7.5	Aplicaciones .....	46
2.5.5.8	Modelos del Concentrador Falcon .....	47
2.5.5.8.1	Concentradores Falcon Semi Lote “SB” .....	47
2.5.5.9	Concentrador Centrifugo Falcon sb-40 (laboratorio).....	48
2.5.5.9.1	Parámetros Operacionales de Diseño .....	48
2.5.5.9.2	Diseño.....	49
2.5.5.9.3	Aplicaciones .....	51
2.5.5.9.4	Principales Ventajas .....	51
2.5.6	Proceso de Flotación .....	52
2.5.7	Introducción .....	52
2.5.8	Flotación de Minerales .....	53
2.5.9	Termodinámica de Flotación.....	54
2.5.10	Cinética de Flotación.....	57
2.5.10.1	Minerales Hidrofílicos.....	62
2.5.10.2	Minerales Hidrofóbicos.....	62
2.5.11	Celda por Dispersión de Aire .....	63
2.5.12	Tipos de Flotación.....	64
2.5.12.1	Fase de Flotación.....	65
2.5.13	Clasificación de los Colectores .....	66

2.5.13.1	Colectores.....	67
2.5.13.1.1	Colector Xantato Amilico de Potasio (z - 6).....	68
2.5.13.1.2	Colector Ap -4037.....	69
2.5.14	Espumante.....	69
2.5.14.1	Reguladores.....	70
2.5.14.1.1	Cal.....	70
2.5.14.2	Activadores.....	71
2.5.14.2.1	Sulfato de Cobre CuSO <sub>4</sub> .....	71
2.5.14.3	Depresores.....	72
2.5.15	Circuitos de Flotación y Equipos.....	72
CAPÍTULO III.....		74
HIPÓTESIS Y VARIABLES.....		74
3.1	Hipótesis.....	74
3.1.1	Hipótesis General.....	74
3.1.2	Hipótesis Específico.....	74
3.2	Variables.....	74
3.2.1	Identificación de Variables.....	74
3.2.1.1	Variable Dependiente (Y1).....	74
3.2.1.2	Variables Independientes(X1).....	74
3.2.1.3	Variables Intervinientes Controladas.....	75

3.2.1.4	Variable Dependiente (Y2) .....	75
3.2.1.5	Variables Independientes(X2).....	75
3.2.1.6	Variables Intervinientes Controladas .....	75
3.2.2	Operacionalización de Variables e Indicadores .....	76
CAPÍTULO IV.....		77
METODOLOGÍA.....		77
4.1	Diseño de Investigación .....	77
4.1.1	Método .....	77
4.1.2	Tipo .....	77
4.1.3	Alcance.....	78
4.1.3.1	Descriptivo .....	78
4.1.3.2	Analítico.....	78
4.1.3.3	Explicativo .....	78
4.2	Población de Estudio.....	78
4.2.1	Unidad de Análisis .....	78
4.2.1.1	Población.....	78
4.2.1.1.1	Falla Constanza .....	80
4.2.1.2	Tamaño de Muestra.....	82
4.2.1.3	Validez y Confiabilidad de Instrumentos.....	82
4.2.1.4	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	83

4.2.2 Equipos e Instrumentos .....	83
4.2.2.1 Equipos Usados .....	83
4.2.2.2 Instrumentos de Laboratorio .....	86
4.2.2.3 Reactivos .....	87
CAPÍTULO V .....	88
DESARROLLO EXPERIMENTAL I .....	88
5.1 Diagrama de Flujo del Procedimiento Experimental .....	88
5.2 Preparación Mecánica de Muestra .....	89
5.2.1 Operación de Chancado Primario (chancadora de quijadas) .....	89
5.2.2 Operación de Chancado Secundario (Chancadora de rodillos).....	89
5.3 Operación de Molienda .....	89
5.4 Caracterización Mineralógica .....	89
5.4.1 Tipo de Yacimiento .....	89
5.4.2 Ensayo Mineralógico por Microscopía Óptica y Barrido de Electrones.....	90
5.4.3 Composición Mineralógica del Mineral de Cabeza .....	91
5.4.4 Imagen, Composición y Espectro de Muestra “Mineral de cabeza”.....	95
5.5 Caracterización Geoquímica .....	100
5.6 Caracterización Fisicoquímica .....	101
5.6.1 Determinación de Densidades.....	101
5.6.2 Determinación del Grado de Acidez.....	102

5.7	Caracterización Metalúrgica .....	102
5.7.1	Determinación del Índice de Bond.....	102
5.8	Prueba Experimental Proceso de Gravimetría .....	105
5.8.1	Trabajos Preliminares.....	105
5.8.1.1	Determinación de curva de Moliendabilidad para la Prueba de Gravimetría	105
5.8.2	Molienda para el Ensayo Gravimétrico.....	110
5.8.3	Matriz del Diseño .....	111
5.8.4	Pruebas Perentorias .....	112
CAPITULO IV.....		124
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS I .....		124
6.1	Evaluación Estadística.....	124
6.1.1	Análisis de Datos.....	124
6.1.1.1	Diagrama de Pareto .....	127
6.1.1.2	Análisis de los Efectos Principales de cada Variable en la Recuperación 128	
6.1.2	Efecto de Variables Individuales.....	129
6.1.3	Análisis de los Efectos de las Interacciones en la Recuperación .....	132
6.1.4	Optimización de Respuesta: %Re .....	136
6.1.4.1	Prueba de Final de Proceso Gravimetría .....	138
CAPÍTULO VII .....		139

DESARROLLO EXPERIMENTAL II.....	139
7.1 Prueba Experimental Proceso de Flotación.....	139
7.1.1 Trabajos Preliminares.....	139
7.1.1.1 Determinación de Curva de Moliendabilidad para la Prueba de Flotación	
139	
7.1.1.2 Molienda para la Prueba de Flotación.....	140
7.1.2 Matriz del Diseño .....	140
7.1.3 Pruebas de cinética de flotación .....	141
7.1.4 Proceso de Flotación .....	145
CAPITULO VIII.....	162
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS II.....	162
8.1 Evaluación Estadística.....	162
8.1.1 Análisis de Datos.....	162
8.1.2 Diagrama de Pareto .....	165
8.1.3 Análisis de los Efectos Principales de cada Variable en la Recuperación ..	166
8.1.4 Efecto de Variables Individuales.....	168
8.1.5 Análisis de los Efectos de las Interacciones en la Recuperación .....	175
8.1.6 Optimización de Respuesta: %Re .....	178
8.1.7 Balance Global de Gravimetría y Flotación.....	185
CONCLUSIÓN.....	186
RECOMENDACIONES.....	187

	10
REFERENCIAS.....	188
ANEXO.....	191

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Equipos de Concentración Gravimétrica .....	35
<b>Tabla 2</b> <i>Tipos de Modelos Falcon SB</i> .....	49
<b>Tabla 3</b> Operacionalización de Variables e Indicadores .....	76
<b>Tabla 4</b> Simbología .....	91
<b>Tabla 5</b> Análisis de liberación y asociaciones con énfasis en oro nativo. ....	92
<b>Tabla 6</b> Distribución elemental de los minerales portadores identificados en la muestra de cabeza.....	95
<b>Tabla 7</b> Análisis químico del mineral .....	101
<b>Tabla 8</b> Densidad del mineral .....	101
<b>Tabla 9</b> Determinación del pH.....	102
<b>Tabla 10</b> Granulometría del alimento y producto del mineral Constanza .....	103
<b>Tabla 11</b> Granulometría del alimento y producto del mineral Cuarzo .....	104
<b>Tabla 12</b> Comparativo de Índice de trabajo Constanza-Cuarzo .....	104
<b>Tabla 13</b> <i>Analisis Granulometrico para tiempo 0min y 10min</i> .....	106
<b>Tabla 14</b> <i>Analisis Granulometrico para tiempo 20min y 30min</i> .....	107
<b>Tabla 15</b> <i>Analisis Granulometrico para tiempo 40min y 50min</i> .....	108
<b>Tabla 16</b> <i>Modelo matematico %-m200</i> .....	109
<b>Tabla 17</b> <i>Variables y su codificación</i> .....	111

<b>Tabla 18</b> <i>Variables reales</i> .....	111
<b>Tabla 19</b> <i>Condiciones para cada prueba</i> .....	112
<b>Tabla 20</b> <i>Condiciones para el proceso 01</i> .....	113
<b>Tabla 21</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 01</i> .....	114
<b>Tabla 22</b> <i>Condiciones para el proceso 02</i> .....	114
<b>Tabla 23</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 02</i> .....	115
<b>Tabla 24</b> <i>Condiciones para el proceso 03</i> .....	115
<b>Tabla 25</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 03</i> .....	116
<b>Tabla 26</b> <i>Condiciones para el proceso 04</i> .....	116
<b>Tabla 27</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 04</i> .....	117
<b>Tabla 28</b> <i>Condiciones para el proceso 05</i> .....	117
<b>Tabla 29</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 05</i> .....	118
<b>Tabla 30</b> <i>Condiciones para el proceso 06</i> .....	118
<b>Tabla 31</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 06</i> .....	119
<b>Tabla 32</b> <i>Condiciones para el proceso 07</i> .....	119
<b>Tabla 33</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 07</i> .....	120
<b>Tabla 34</b> <i>Condiciones para el proceso 08</i> .....	120
<b>Tabla 35</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 08</i> .....	121
<b>Tabla 36</b> <i>Condiciones para el proceso 09</i> .....	121
<b>Tabla 37</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría</i> .....	122
<b>Tabla 38</b> <i>Condiciones para el proceso 10</i> .....	122
<b>Tabla 39</b> <i>Balance metalúrgico de Gravimetría 10</i> .....	123
<b>Tabla 40</b> <i>Resultados obtenidos para cada prueba</i> .....	124

<b>Tabla 41</b> <i>Coeficientes codificados</i> .....	125
<b>Tabla 42</b> <i>Análisis de Varianza</i> .....	126
<b>Tabla 43</b> <i>Análisis de varianza de Presión (Psi)</i> .....	129
<b>Tabla 44</b> <i>Resumen del modelo</i> .....	129
<b>Tabla 45</b> <i>Análisis de varianza de %-m200</i> .....	130
<b>Tabla 46</b> <i>Resumen del modelo</i> .....	131
<b>Tabla 47</b> <i>Ecuación de regresión en unidades no codificadas</i> .....	136
<b>Tabla 48</b> <i>Parámetros</i> .....	136
<b>Tabla 49</b> <i>Solución</i> .....	137
<b>Tabla 50</b> <i>Predicción de respuesta múltiple</i> .....	137
<b>Tabla 51</b> <i>Condiciones para el proceso</i> .....	138
<b>Tabla 52</b> <i>Balance metalúrgico proceso de gravimetría</i> .....	138
<b>Tabla 53</b> <i>Determinación de tiempo faltante para la prueba de flotación</i> .....	140
<b>Tabla 54</b> <i>Variables y su codificación</i> .....	140
<b>Tabla 55</b> <i>Variables reales</i> .....	141
<b>Tabla 56</b> <i>Condiciones para cada prueba</i> .....	141
<b>Tabla 58</b> <i>Recuperación en función del tiempo</i> .....	143
<b>Tabla 59</b> <i>Constante para el modelo de Garcia zuñiga</i> .....	144
<b>Tabla 60</b> <i>Tiempo Optimo para el Proceso de Flotacion</i> .....	145
<b>Tabla 61</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°01</i> .....	146
<b>Tabla 62</b> <i>Condiciones operativas y dosificacion N°01</i> .....	147
<b>Tabla 63</b> <i>Balance metalúrgico N°01</i> .....	147
<b>Tabla 64</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N° 02</i> .....	148

<b>Tabla 65</b> <i>Condiciones operativas y dosificación N°02</i> .....	148
<b>Tabla 66</b> <i>Balance metalúrgico N°02</i> .....	149
<b>Tabla 67</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°03</i> .....	149
<b>Tabla 68</b> <i>Operación con reactivos N°03</i> .....	150
<b>Tabla 69</b> <i>Balance metalúrgico N°03</i> .....	150
<b>Tabla 70</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°04</i> .....	151
<b>Tabla 71</b> <i>Condiciones operativas y dosificación N°04</i> .....	151
<b>Tabla 72</b> <i>Balance metalúrgico N°04</i> .....	152
<b>Tabla 73</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°05</i> .....	152
<b>Tabla 74</b> <i>Condiciones operativas y dosificación N°05</i> .....	153
<b>Tabla 75</b> <i>Balance metalúrgico N°05</i> .....	153
<b>Tabla 76</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°06</i> .....	154
<b>Tabla 77</b> <i>Condiciones operativas y dosificación N°06</i> .....	154
<b>Tabla 78</b> <i>Balance metalúrgico N°06</i> .....	155
<b>Tabla 79</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°07</i> .....	155
<b>Tabla 80</b> <i>Condiciones operativas y dosificación N°07</i> .....	156
<b>Tabla 81</b> <i>Balance metalúrgico N°07</i> .....	156
<b>Tabla 82</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°08</i> .....	157
<b>Tabla 83</b> <i>Condiciones operativas y dosificación N°08</i> .....	157
<b>Tabla 84</b> <i>Balance metalúrgico N°08</i> .....	158
<b>Tabla 85</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°09</i> .....	158
<b>Tabla 86</b> <i>Condiciones operativas y dosificación N°09</i> .....	159
<b>Tabla 87</b> <i>Balance metalúrgico N°09</i> .....	159

<b>Tabla 88</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°10</i> .....	160
<b>Tabla 89</b> <i>Condiciones operativas y dosificación N°10</i> .....	160
<b>Tabla 90</b> <i>Balance metalúrgico N°10</i> .....	161
<b>Tabla 91</b> <i>Resultados obtenidos para cada prueba</i> .....	162
<b>Tabla 92</b> <i>Coeficientes codificados</i> .....	163
<b>Tabla 93</b> <i>Análisis de varianza</i> .....	164
<b>Tabla 94</b> <i>Análisis de varianza de sulfato de cobre</i> .....	168
<b>Tabla 95</b> <i>Resumen del modelo de dosificación</i> .....	169
<b>Tabla 96</b> <i>Análisis de varianza de z-6</i> .....	170
<b>Tabla 97</b> <i>Resumen del modelo de dosificación</i> .....	171
<b>Tabla 98</b> <i>Análisis de varianza de AP-4037</i> .....	172
<b>Tabla 99</b> <i>Resumen del modelo de dosificación</i> .....	172
<b>Tabla 100</b> <i>Análisis de varianza de %-m200</i> .....	174
<b>Tabla 101</b> <i>Resumen del modelo de %-m200</i> .....	174
<b>Tabla 102</b> <i>Ecuación de regresión en unidades no codificadas</i> .....	179
<b>Tabla 103</b> <i>Parámetros</i> .....	179
<b>Tabla 104</b> <i>Solución</i> .....	180
<b>Tabla 105</b> <i>Predicción de respuesta múltiple</i> .....	180
<b>Tabla 106</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones</i> .....	182
<b>Tabla 107</b> <i>Condiciones operativas y dosificación</i> .....	183
<b>Tabla 108</b> <i>Resultados de la flotación cíclica</i> .....	184
<b>Tabla 109</b> <i>Balance metalúrgico flotación cíclica</i> .....	184
<b>Tabla 110</b> <i>Balance global</i> .....	185

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Vista trasversal y longitudinal del concentrador Jigs .....	36
<b>Figura 2</b> Partes de una mesa vibratoria .....	39
<b>Figura 3</b> Partes de un Concentrador Espiral Humphrey.....	42
<b>Figura 4</b> Proceso de Funcionamiento del Concentrador gravimétrico Falcon SB .....	50
<b>Figura 5</b> Partes del concentrador gravimétrico Falcon SB 40.....	50
<b>Figura 6</b> Celda de Flotación Convencional .....	54
<b>Figura 7</b> Determinación del Valor de $K$ .....	61
<b>Figura 8</b> Comportamiento Hidrofílico .....	62
<b>Figura 9</b> Comportamiento Hidrofóbico .....	63
<b>Figura 10</b> Celda de Flotación por Dispersión de Aire .....	64
<b>Figura 11</b> Esquema de una Celda de Flotación Mecánica .....	66
<b>Figura 12</b> Clasificación de los Colectores .....	67
<b>Figura 13</b> Hidrofobicidad de una Partícula .....	68
<b>Figura 14</b> Esquema de Adsorción de Espumante en una Burbuja de Aire .....	70
<b>Figura 15</b> Representación del Circuito de Flotación.....	73
<b>Figura 16</b> Mapa del yacimiento Untura- sandía.....	79
<b>Figura 17</b> Perfil estructural nevado Ananea- yacimiento Untuca.....	81
<b>Figura 18</b> Diagrama de Flujo del Procedimiento Experimental .....	88
<b>Figura 19</b> Fotomicrografía Aumento 968x .....	93
<b>Figura 20</b> Fotomicrografía Aumento 866x .....	93
<b>Figura 21</b> Fotomicrografía Aumento 1030x .....	94

<b>Figura 22</b> fotomicrografía de arsenopirita a 572x .....	95
<b>Figura 23</b> composición y espectro de arsenopirita.....	96
<b>Figura 24</b> fotomicrografía de lollinguita a 572x.....	96
<b>Figura 25</b> Composición y espectro de lollinguita .....	97
<b>Figura 26</b> Fotomicrografía de oro nativo a 572x .....	97
<b>Figura 27</b> Composición y espectro de oro nativo .....	98
<b>Figura 28</b> Fotomicrografía de la Pirrotita a 572x .....	98
<b>Figura 29</b> Composición y espectro de la pirrotita.....	99
<b>Figura 30</b> Fotomicrografía de aleación Oro- Bismuto a 4886x.....	99
<b>Figura 31</b> Composición y espectro de aleación oro- bismuto.....	100
<b>Figura 32</b> <i>Grafica de tamaño de particula vs Tiempo de molienda</i> .....	109
<b>Figura 33</b> <i>Determinacion de tiempos de molienda</i> .....	110
<b>Figura 34</b> <i>Diagrama de flujo para el proceso de gravimetria</i> .....	110
<b>Figura 35</b> <i>Diagrama de Pareto de los efectos</i> .....	127
<b>Figura 36</b> <i>Gráfica de efectos principales para recuperación de Au</i> .....	128
<b>Figura 37</b> <i>Valores individuales de recuperación vs Frecuencia (Hz)</i> .....	129
<b>Figura 38</b> <i>Gráfica de cajas de recuperación vs Frecuencia (Hz)</i> .....	130
<b>Figura 39</b> <i>Valores individuales de recuperación vs %-m200</i> .....	131
<b>Figura 40</b> <i>Gráfica de cajas de recuperación vs %-m200</i> .....	132
<b>Figura 41</b> <i>Gráfica de interacción para recuperación de Au</i> .....	133
<b>Figura 42</b> <i>Gráfica de superficie de recuperación vs A: Presión (Psi), B: Frecuencia (Hz) .....</i>	133
<b>Figura 43</b> <i>Gráfica de superficie de recuperación vs A: Presión (Psi), C: Granulometría (%-m200)</i> .....	134

<b>Figura 44</b> <i>Gráfica de superficie de recuperación vs B: Frecuencia (Hz) C: Granulometría (%-m200)</i> .....	134
<b>Figura 45</b> <i>Gráfica de cubos (medias ajustadas) de recuperación de Au</i> .....	135
<b>Figura 46</b> <i>Gráfica de optimización de recuperación , según el modelo matemático</i> .....	137
<b>Figura 47</b> <i>Tamaño de partícula vs tiempo de molienda</i> .....	139
<b>Figura 48</b> <i>Pruebas de Cinética de Flotación</i> .....	142
<b>Figura 49</b> <i>Tiempo vs % de Recuperación</i> .....	143
<b>Figura 50</b> <i>Curva de recuperacion</i> .....	144
<b>Figura 51</b> <i>Modelo cinetico Garcia Zuñiga</i> .....	144
<b>Figura 52</b> <i>Esquema de dosificación de prueba de flotación Batch</i> .....	146
<b>Figura 53</b> <i>Diagrama de Pareto de los efectos</i> .....	165
<b>Figura 54</b> <i>Gráfica de efectos principales para recuperación de Cu%</i> .....	167
<b>Figura 55</b> <i>Gráfica de residuos para porcentaje de recuperación</i> .....	168
<b>Figura 56</b> <i>Valores individuales de recuperación vs sulfato de cobre</i> .....	169
<b>Figura 57</b> <i>Gráfica de cajas de recuperación con dosificación de sulfato de cobre</i> .....	170
<b>Figura 58</b> <i>Valores individuales de recuperación vs Z-6</i> .....	171
<b>Figura 59</b> <i>Gráfica de cajas de recuperación con dosificación de Z-6</i> .....	172
<b>Figura 60</b> <i>Valores individuales de recuperación vs AP-4037</i> .....	173
<b>Figura 61</b> <i>Gráfica de cajas de recuperación con dosificación de sulfato de cobre</i> .....	173
<b>Figura 62</b> <i>Valores individuales de recuperación vs %-m200</i> .....	174
<b>Figura 63</b> <i>Gráfica de cajas de recuperación con %-m200</i> .....	175
<b>Figura 64</b> <i>Gráfica de interacción para recuperación de Au</i> .....	176
<b>Figura 65</b> <i>Gráfica de superficies para la recuperación de Au</i> .....	176

<b>Figura 66</b> <i>Gráfica de superficie de recuperación vs A: Sulfato de cobre, D: Granulometría (%-m200)</i> .....	177
<b>Figura 67</b> <i>Gráfica de cubos (medias ajustadas) de recuperación de Au</i> .....	178
<b>Figura 68</b> <i>Gráfica de optimización de recuperación de cobre, según el modelo matemático ..</i>	179
<b>Figura 69</b> <i>Esquema de Flotacion ciclica</i> .....	182

## SIGLAS Y ABREVIATURAS

<b>%</b>	Porcentaje
<b>µm</b>	Micrómetros
<b>Ag</b>	Plata
<b>AP</b>	Aerophine
<b>Ca (OH)<sub>2</sub></b>	Hidróxido de calcio
<b>Cm<sup>3</sup></b>	Centímetro cubico
<b>CN</b>	Cianuro
<b>Cosθ</b>	Coseno del ángulo $\theta$
<b>Cu</b>	Cobre
<b>D-12</b>	Denver
<b>DO</b>	Oxígeno disuelto
<b>Ef</b>	Esfalerita
<b>Fe</b>	Hierro
<b>FeS</b>	Pirita
<b>G</b>	Gramos
<b>GE</b>	Gravedad especifica
<b>GGs</b>	Gangas
<b>GL</b>	Grado de Libertad
<b>Hz</b>	Hertz
<b>K</b>	Kelvin
<b>M</b>	Metros
<b>Min</b>	Minutos
<b>mm</b>	Milímetro
<b>N°</b>	Numero
<b>NaSH</b>	Sulfuro de sodio (acido)
<b>Ni</b>	Niquel
<b>Onz</b>	Onzas convencional
<b>PbS</b>	Galena
<b>pH</b>	Potencial de hidrogeno
<b>Po</b>	Pirrotina
<b>Psi</b>	Libras de fuerza por pulgada cuadrada
<b>R<sub>∞</sub></b>	Recuperación limite a tiempo infinito
<b>Rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>Rt</b>	Recuperación estimada
<b>S</b>	Sistema
<b>SB</b>	Semi Batch
<b>Tn</b>	Tonelas
<b>W</b>	Watts
<b>Z-6</b>	Zantato Amilico de potasio
<b>ZnS</b>	Sulfuro de zinc
<b>γGL</b>	Tensión gas liquido
<b>γGS</b>	Tensión gas solido
<b>γSL</b>	Tensión solida liquido

## INTRODUCCIÓN

En la Compañía Minera Constanza-cori Puno SAC ubicada a una altura de 4950 m.s.n.m, en la orilla sur del distrito de Quiaca, Provincia de Sandía, Departamento de Puno, esta planta procesa minerales auríferos (pirita, pirrotita, limonita) para los cual cuenta con los procesos de chancado, molienda. Gravimetría, flotación; ya que de estos dos últimos se obtiene los concentrados. la Planta posee un tonelaje de tratamiento de 1800 TMS/día, el trabajo lo realiza continuamente durante todo el día, meses y año. Para obtener respuestas metalúrgicas de un mineral proveniente de mina, es necesario realizar un estudio metalúrgico del mineral, ya que esto permite anticiparnos y predecir el comportamiento metalúrgico antes que ingrese el mineral a la Planta Concentradora, bajo esta premisa se realizó un conjunto de pruebas con el mineral Constanza, se diseñó adecuadamente todas las secuencias realizando su caracterización mineralógica, físicas, químicas, y fisicoquímicas seguido de las pruebas experimentales como primera etapa de preconcentración proceso de gravimetría teniendo en cuenta las variables de granulometría, presión y Frecuencia. Las pruebas de caracterización del mineral, preparación de muestras y las pruebas experimentales se realizaron en el área de laboratorio metalúrgico de la unidad minera Cori Puno SAC. También se realizó en el laboratorio de concentración de minerales de la escuela profesional de ingeniería metalurgia UNSAAC. La etapa final de concentración se realizó mediante el proceso de flotación teniendo en cuenta las variables de dosificación de reactivos: sulfato de cobre, Z-6, AP-4037 y la granulometría. Los resultados obtenidos de las pruebas metalúrgicas se analizaron con ayuda del software MINITAB evaluando el nivel de significancia de las variables y optimizando el proceso para obtener una recuperación máxima.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Situación Problemática

CORI PUNO SAC es una compañía peruana enfocada en la exploración, explotación y recuperación de minerales de oro. La empresa emplea prácticas óptimas y tecnología avanzada tanto en minería a cielo abierto como subterránea, con el objetivo de expandir sus actividades y garantizar su sostenibilidad a largo plazo., mediante actividades de prospección y exploración en las zonas de Constanza.

Al tratar nuevas especies mineralógicas sulfuradas de oro no se conoce con exactitud los parámetros más adecuados, teniendo pérdidas de insumos y reactivos como la adición excesiva de colectores, espumantes, modificadores. etc.

También se desconoce el comportamiento de este mineral en todo el proceso para su obtención metalúrgica es aquí donde surge el problema principal que radica, en la obtención de una recuperación desfavorable de oro

Por lo tanto, estamos convencidos haciendo el estudio metalúrgico que se centra principalmente en la caracterización metalúrgica, fisicoquímica y teniendo énfasis es su recuperación de oro mediante las operaciones unitarias de gravimetría como preconcentración y flotación como etapa final. Debemos tener en cuenta que los resultados obtenidos en el laboratorio producen recuperaciones superiores a las de Planta por los cuidados y facilidades propios del laboratorio que se trabaja en condiciones ideales.

## **1.2 Formulación de Problema**

### ***1.2.1 Problema General***

¿De qué manera caracterizar y evaluar el comportamiento metalúrgico mediante los procesos unitarios de gravimetría y flotación del mineral aurífero?

### ***1.2.2 Problema Específico***

- ¿Por qué caracterizar el mineral aurífero provenientes de la zona Constanza?
- ¿Cuáles son las variables influyentes en el proceso metalúrgico de gravimetría como pre concentración para la recuperación de oro?
- ¿Cuáles son las variables influyentes en el proceso metalúrgico de flotación como concentración final para la recuperación de oro a partir del relave gravimétrico?

## **1.3 Justificación**

### ***1.3.1 Conveniencia***

El presente trabajo está orientado a investigar el comportamiento del mineral aurífero de la zona Constanza mediante los procesos unitarios de gravimetría, flotación y la caracterización que nos permitirá tener una premisa enfocadas principalmente en la recuperación ayudando entonces el desarrollo de nuestro proyecto queda plenamente justificado.

### ***1.3.2 Relevancia social***

El procesamiento de nuevos yacimientos como constanza impulsa a la minería formal a contribuir significativamente al desarrollo de la sociedad. Esto se traduce en una mejor calidad de vida mediante la creación de empleos directos e indirectos, además de fomentar proyectos de inclusión social y construir infraestructura en áreas como la salud y la educación.

### ***1.3.3 Relevancia Tecnológica***

El proyecto contara con la tecnología necesaria para realizar los estudios y poder caracterizar y evaluar el comportamiento metalúrgico mediante los procesos unitarios de gravimetría y flotación mejorando la recuperación de oro.

### ***1.3.4 Valor Teórico***

El estudio de caracterizar y evaluar el comportamiento metalúrgico mediante los procesos unitarios de gravimetría y flotación, aportará a la ciencia un documento de consulta rápida, como también a diferentes áreas de extracción de minerales auríferos en la industria minera para la recuperación de oro.

### ***1.3.5 Utilidad Metodológica***

La metodología aplicada para la investigación permite determinar buenos resultados y obtener un buen análisis en la obtención de oro mediante los procesos unitarios de gravimetría y flotación, la metodología aplicada es de carácter correlativo – experimental. ya que pretende, mediante la aplicación de diferentes métodos prácticos caracterizar y evaluar el comportamiento metalúrgico en los procesos de unitarios de gravimetría y flotación.

## **1.4 Objetivos de Investigación**

### ***1.4.1 Objetivo General***

Caracterizar el mineral de la zona Constanza y evaluar el comportamiento metalúrgico con respecto a las operaciones unitarias de gravimetría y flotación.

### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

- Caracterizar el mineral por medio de microscopia óptica de luz reflejada y microscopia electrónica provenientes de la zona Constanza

- Evaluar las variables de presión, frecuencia y granulometría en el proceso metalúrgico de gravimetría como pre concentración para la recuperación de oro.
- Evaluar las variables dosificación de sulfato de cobre, AP-4037, Z-6 y granulometría en el proceso metalúrgico de flotación como concentración final para la recuperación de oro a partir del relave gravimétrico.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1 Antecedentes Internacionales**

Yanes & García (2005) presentan en su estudio “Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar - Colombia) para la selección de los procesos de extracción” los resultados del análisis y caracterización de los minerales con contenido de oro y plata de dicha región. A través de la caracterización fisicoquímica, se determinaron condiciones clave para los procesos metalúrgicos de una posible planta de tratamiento. Entre los resultados obtenidos, se estima que un porcentaje óptimo de sólidos contenidos en la región de la pulpa es de concentración 40% en peso; no obstante, la alta presencia de minerales de características arcillosos podría complicar los procesos de separación entre material. Entre los resultados obtenidos, se estima que un porcentaje óptimo de sólidos en la pulpa es del 40% en peso; no obstante, la alta presencia de minerales arcillosos podría complicar los procesos de separación entre material sólido y líquido. Además, según los análisis mineralógicos y metalúrgicos, el oro presenta un tamaño promedio menor a 75  $\mu\text{m}$ , lo que sugiere que el proceso de cianuración por agitación sería el más eficiente para su recuperación.

#### **2.2 Antecedentes Nacionales**

Portilla (2022), en su estudio titulado "Efecto de la presión de agua y la frecuencia de rotación del concentrador Falcon L40 en la recuperación de oro mediante concentración gravimétrica de relaves", investigó cómo estos dos factores influyen en la recuperación de oro por gravimetría, utilizando relaves de flotación obtenidas de Consorcio Minero Horizonte SA (CMHSA). El enfoque experimental fue un diseño bifactorial con tres niveles y dos repeticiones,

lo que resultó en 18 ensayos para asegurar la validez y confiabilidad de los resultados. La muestra utilizada correspondió al relave final del circuito de flotación de CMHSA.

En cuanto a la presión ejercida por el agua, se procedieron a la evaluación de tres niveles: 0.5, 2 y 3.5 psi, mientras que para lo concerniente a las frecuencias de rotación fueron tomados en cuenta en función a 45, 55 y 65 Hz. Los resultados mostraron que las recuperaciones de oro fueron de 38.84 %, 37.40 % y 33.82 % para las presiones de 0.5, 2 y 3.5 psi, respectivamente. En cuanto a las frecuencias de rotación, las recuperaciones alcanzaron 35.81 %, 37.34 % y 36.91 % para 45, 55 y 65 Hz, respectivamente. La combinación óptima se encontró con una presión de 0.5 psi y una frecuencia de 45 Hz, obteniendo una recuperación máxima de 41.84 %. Se concluyó que únicamente la presión de agua tiene un impacto significativo en el porcentaje de recuperación de oro mediante concentración gravimétrica.

Pacheco (2018) en su trabajo de investigación “Optimización en la recuperación por diseño experimental Plackett Burman en el proceso de extracción de oro por gravimetría y flotación del mineral de UNTUCA – Minera CORIPUNO, efectos de la molienda - sobre molienda y liberación de oro”. Este estudio empleó el diseño experimental Plackett Burman como herramienta estadística para mejorar los procesos de recuperación de oro mediante gravimetría y flotación, destacando la importancia de la granulometría en estos procesos. Se identificó que la sobre molienda de minerales con alto contenido de oro dificulta su recuperación por estos métodos. Las pruebas de concentración gravimétrica, realizadas con minerales catalogadas como de baja ley provenientes de los niveles respectivos 0, 1, 2 y 3 del tajo Cerro La Torre, resultaron mostrar una ley promedio de aproximadamente 1.48 g Au/t llegando a alcanzar también el nivel 2, la cual disminuyó a 0.84 g Au/t en el nivel 3, con una recuperación media de 36,93% mediante gravimetría. En cuanto a la flotación, se observará que las partículas más finas favorecen la recuperación, por lo que se

recomienda optimizar la granulometría, alcanzando niveles cercanos al 99.59% en malla -200 y más del 90% en la remolienda.

El análisis de malla en el molino primario de 8'x10' mostró que el contenido de oro metálico en las mallas finas ascendió de 19.39% en la alimentación a 43.31% en la descarga, con un 82.81% del contenido metálico liberado listo para ser extraído, en un peso total de pulpa tratada de 72.58%. Para prevenir la pérdida de partículas finas de oro menores a 38 micras en el relave final, se recomienda la instalación de un concentrador Falcon antes del proceso de flotación. En una segunda fase de pruebas con minerales de baja ley, se sugiere el uso de Z6 (39.56 g/t), AP-4037 (118.29 g/t), sulfato de cobre (50.92 g/t) y aceite de pino (3.94 g/t), trabajar a un pH de 7 y garantizar una granulometría superior al 90% en la remolienda para optimizar la recuperación.

### **2.3 Antecedentes Locales**

Soto & Leguía (2020) desarrollaron la investigación “Influencia mineragráfica en la recuperación de oro en los procesos metalúrgicos de la Minera Qero’s Gold de Paucartambo-Cusco”. Este estudio se utilizó análisis mineragráficos para determinar el proceso metalúrgico más eficiente en la recuperación de oro, empleando una caracterización microscópica y macroscópica del mineral. Con base en esta caracterización, se realizaron pruebas metalúrgicas que incluyeron moliendabilidad, cianuración en botellas, concentración centrífuga y flotación Rougher. Los resultados mostraron que, al tratar el mineral base mediante flotación selectiva y emplear una mezcla (blending) compuesta por un 36% de mineral de la veta Inkaracay y un 64% de la veta Sanca 2, se logró una recuperación de oro del 94.48%.

Vilcapoma & Chávez (2012) llevaron a cabo el estudio “Pruebas experimentales a nivel de laboratorio de concentración gravimétrica y flotación de minerales de oro en la planta

concentradora 'Caselita' en Condorama - Cuzco". Este estudio se centró en la recuperación de partículas de oro libre mediante métodos de concentración gravimétrica no tradicionales, utilizando el concentrador Falcon. Según la literatura, este equipo es más versátil y eficiente en comparación con tecnologías tradicionales como el Jig, gracias a su capacidad para manejar parámetros como el campo centrífugo y el porcentaje de sólidos en el flujo.

El esquema de tratamiento implementado comenzó con la concentración gravimétrica de los minerales de oro y continuó con la recuperación del oro remanente mediante la flotación de los relaves generados por el concentrador Falcon. El mineral utilizado en las pruebas provino de tres áreas de la mina: Esperanza, Gavilán de Oro y Marisol. Los análisis químicos iniciales indicaron que los minerales de estas zonas eran económicamente viables. Sin embargo, tras los estudios preliminares, se decidió trabajar únicamente con muestras de las zonas Marisol y Gavilán de Oro, excluyendo el mineral de la zona Esperanza debido a su baja ley de cabeza.

## **2.4 Conceptos Básicos**

### **2.4.1 *Minerales y Menas***

La mayoría de los metales se encuentran principalmente en la corteza terrestre y en el fondo marino. Su forma de presentación varía, dependiendo en gran medida de su nivel de reactividad con el entorno, particularmente con elementos como el oxígeno, el azufre y el dióxido de carbono. Los metales que no reaccionan con el ambiente como el Au, Pt estas permanecen en estado nativo o metálico, mientras que los metales como el Ag, Cu, Hg, etc. estas si reaccionan como sulfuros, carbonatos, cloruros, nativos, etc. Por lo general los metales más reactivos forman compuestos denominados minerales como: PbS (galena), Cu<sub>2</sub>S (calcosina), SnO<sub>2</sub> (casiterita), etc. (Conejeros, 2003, p.14)

## **2.4.2 Métodos de Identificación Mineralógica**

Desde tiempos antiguos, los minerales se han clasificado utilizando criterios basados en la observación visual, como su forma, color y brillo. Además, se han analizado aplicando esfuerzos que permiten evaluar propiedades como la dureza, mediante el rayado, o la rotura, evidenciada en su exfoliación y fractura. Actualmente existe un gran número de técnicas analíticas para la identificación de minerales, las más comunes son la difracción de rayos X y la petrografía mediante microscopía óptica y electrónica. (Yanes & Garcia, 2005)

### **2.4.2.1 Difracción de Rayos x**

Los rayos X constituye haces de radiación electromagnética con longitudes de ondas que puede ser cortas y alta energía. Uno de los métodos más confiables para la identificación mineralógica en materiales con estructura cristalina, donde sus componentes están organizados de manera ordenada, es la técnica que utiliza la interferencia de un haz de rayos X con la red cristalina. Las longitudes de onda empleadas son muy pequeñas (del orden de 1 Å) y su valor depende del metal empleado para la generación de rayos X; uno de los metales más empleados es el cobre. (Pozo, 2019)

### **2.4.2.2 Caracterización Geoquímica**

La caracterización geoquímica permite identificar las concentraciones de oro y plata en cada muestra, mediante técnicas como el ensayo al fuego convencional y el ensayo al fuego combinado con absorción atómica. Asimismo, se utilizan técnicas de análisis químico cuantitativo y cualitativo, tales como la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), el análisis instrumental por activación de neutrones (INAA) y la espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICPOES), para medir la concentración de elementos que podrían afectar los procesos de extracción.

### ***2.4.2.3 Caracterización Fisicoquímica***

Dado que los procedimientos extractivos en metalurgia requieren el manejo de pulpas, es crucial evaluar algunas propiedades no solamente físicos sino también químicos del mineral, tales como la densidad, el pH, el tipo de sales solubles, la tasa de sedimentación, la viscosidad de la pulpa y el porcentaje de retención de líquidos.

### ***2.4.2.4 Determinación de Densidades.***

Se identifican tres tipos de densidades: la densidad aparente, la densidad real mediante desplazamiento de volumen y la densidad determinada por picnometría.

### ***2.4.2.5 Determinación del Grado de Acidez.***

La medición del pH es un factor crucial en el proceso de flotación, por lo que se realiza la determinación del pH del mineral.

### ***2.4.2.6 Caracterización Metalúrgica***

Para evaluar la respuesta del mineral en los procesos de beneficio y extracción, así como para predecir su comportamiento metalúrgico en operaciones unitarias como la gravimetría y la flotación, se lleva a cabo el análisis del índice de trabajo (Work Index) y el estudio mediante malla valorada.

## **2.5 Métodos de Tratamiento en Menas Auríferas**

### ***2.5.1 Introducción a la Concentración de Minerales.***

Las sustancias minerales deben alcanzar cierto grado alto nivel de pureza o de concentración, ya que no es rentable aplicar procesos de extracción o refinación costosos a pequeñas cantidades de metales como cobre, oro, plomo, zinc o molibdeno en su forma natural. Por lo tanto, es necesario concentrar estos metales en volúmenes reducidos antes de someterlos a tratamientos más intensivos y costosos para obtener el metal puro. El procesamiento de minerales

consiste en tratar los materiales para obtener productos con valor comercial, utilizando técnicas que mantengan sus propiedades físicas o químicas. Esta definición excluye procesos como la refinación, el tratamiento térmico, la lixiviación y otros procedimientos químicos. El proceso incluye una serie de etapas sucesivas, cuyos principios fundamentales se aplican independientemente del tipo de material que se trate.

El objetivo de la concentración de minerales, sin importar los métodos empleados, es siempre el mismo: separar los minerales en dos o más productos, como concentrados, colas y partículas mixtas (Conejeros, 2003).

## ***2.5.2 Concentración Gravimétrica***

### ***2.5.2.1 Generalidades***

La concentración gravimétrica es posiblemente la técnica más antigua para separar minerales, permitiendo aislar la fracción útil en un concentrado y relegar la parte no aprovechable, conocida como ganga, al relave. Este método se basa en la separación de partículas según su forma, tamaño y peso específico, utilizando la fuerza de gravedad, y en algunos casos, la fuerza centrífuga.

Hoy en día la concentración gravimétrica se aplica principalmente en el tratamiento de minerales de alta densidad que no reaccionan de manera eficiente a la flotación, como también en aquellos con tamaños de liberación moderadamente grandes. También se utiliza cuando una reducción excesiva de tamaño puede generar partículas finas ("sliming") y pérdidas en la recuperación. Este método resulta ventajoso en operaciones donde se busca simplicidad en el circuito, como en la preconcentración de minerales de baja ley, y cuando su bajo consumo energético y su menor impacto ambiental son factores decisivos. Estas características hacen de los métodos gravimétricos,

ya sea de forma independiente o en combinación con otros, una opción atractiva para el tratamiento de minerales.

Actualmente, se emplea en el procesamiento de minerales como estaño, tungsteno y oro, que tienen alto peso específico, así como en el carbón, que es más ligero que la ganga. En el caso del oro, este método tiene amplia aplicación en el Perú, siendo el preferido para tratar arenas de lavaderos de oro y formando parte de circuitos de beneficio combinados para todo tipo de minerales auríferos (Conejeros, 2003).

### **2.5.2.2 Fundamentos y Criterios de Aplicación**

El fundamento y criterio que explica la concentración por gravedad es el denominado "asentamiento dificultado", lo que implica que las partículas de distinto tamaño y peso se asientan a diferentes velocidades en un medio líquido. Este medio también contiene partículas finas del mismo material, que obstruyen o ralentizan la caída de las partículas que se desean separar, según su velocidad de asentamiento.

Los métodos de separación gravimétrica se basan en la diferencia de gravedad específica de los minerales, separándolos según su movimiento relativo bajo la influencia de la gravedad y otras fuerzas, como la resistencia de un fluido viscoso, como el aire o el agua. Para que la separación sea efectiva, es crucial que, además de que los minerales estén liberados, exista una diferencia significativa entre sus gravedades específicas. La eficiencia de la concentración se puede estimar a través del criterio de concentración, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Criterio de concentración} = \frac{D_p - D_m}{D_l - D_m}$$

Donde:

- $D_p$  = Densidad de partículas pesadas (mena)

- $D_l$  = Densidad de las partículas livianas (ganga)
- $D_m$  = Densidad del medio fluido de separación

Si el cociente es mayor a 2.5, ya sea positivo o negativo, la separación será fácil, siempre y cuando haya una adecuada liberación de los minerales a separar.

Suponiendo que la densidad del líquido sea 1 y la de la ganga sea 2.5, se recomienda que el criterio de concentración tenga un valor de 2.5, lo que implicaría que la densidad mínima recomendable de la mena pesada sería 4.75.

Existen diversas densidades de menas y metales pesados que comúnmente se asocian con procesos gravimétricos.

Para que la concentración gravimétrica sea eficiente, es fundamental que la alimentación esté bien preparada, lo que requiere considerar los siguientes aspectos:

- a) La molienda es un paso crucial, y debe ser realizada de manera adecuada para asegurar la máxima liberación de los minerales.
- b) Se recomienda que la molienda primaria se realice en molinos de rodillos, utilizando circuitos abiertos.
- c) Si es necesaria una molienda fina, se pueden emplear molinos de bolas junto con cribas, con el fin de evitar la sobre molienda de materiales quebradizos.
- d) La presencia de lamas aumenta la viscosidad de la pulpa, lo que reduce la eficacia de la separación.
- e) En los procesos de concentración, es común eliminar las partículas menores a 10 micras, lo cual generalmente se realiza con hidrociclones; sin embargo, si es posible, es preferible utilizar un clasificador hidráulico (como espirales o rastrillos).

- f) La concentración gravimétrica es muy sensible al porcentaje de sólidos, por lo que es importante mantenerlo constante.

Se comprende fácilmente que mientras mayor sea la diferencia entre densidades de menas pesadas vs. ganga, y entre estas la densidad del líquido, el proceso será más eficiente y en especial, que la presencia de partículas finas, que forman una suspensión con el agua, con densidad mayor que 1 con mayor viscosidad, es particularmente negativa, por disminuir la velocidad de asentamiento obstaculizado de las partículas útiles, de menas pesadas. (Rivera Parra, 2017).

### ***2.5.3 Métodos de Separación por Gravedad***

En términos generales, los métodos de separación por gravedad se dividen en tres categorías principales:

- **Separación por medios densos:** Este método consiste en sumergir las partículas en un fluido con una densidad intermedia, lo que provoca que algunas floten mientras que otras se hunden.
- **Separación por corrientes verticales:** Se basa en las diferencias en las velocidades de sedimentación de partículas ligeras y pesadas, como sucede en los jigs.
- **Separación en corrientes superficiales de agua:** Conocido también como método de "clasificación en lámina delgada", empleando mesas concentradoras y separadores de espiral.

### ***2.5.4 Equipos de Concentración Gravimétrica***

Los equipos más utilizados en la concentración gravimétrica en la industria minera se pueden clasificar según el mecanismo que emplean en convencionales y centrífugos, siendo los principales los siguientes:

**Tabla 1***Equipos de Concentración Gravimétrica*

convencionales	centrifugos
Jigs	Falcon
Mesas vibratorias	Knelson
Espirales	

*Nota.* Clasificación de equipos concentradores convencionales y centrífugos (Morrall & Jimeno, 1985)

**2.5.5 Concentradores Convencionales****2.5.5.1 Jigs**

Es un equipo de concentración gravimétrica en donde minerales de formas tamaños diferentes y densidades se estratifican en un medio fluido mediante las distintas velocidades de sedimentación que alcanzan las partículas con base al movimiento de un lecho de partículas las cuales son fluidizadas intermitentemente por las pulsaciones del fluido en un plano vertical.

Este procedimiento se emplea para concentrar minerales de tamaño grueso (3-10 mm). Durante el proceso, la capa de material en tratamiento se expande, lo que hace que las partículas de mayor densidad (con alta gravedad específica) se hundan hacia el fondo, es un proceso similar al ocurrido en una sedimentación restringida, mientras que las partículas más finas se mueven hacia arriba al penetrar en los espacios de la cama.

Durante el movimiento ascendente, las partículas se reorganizan de la siguiente manera:

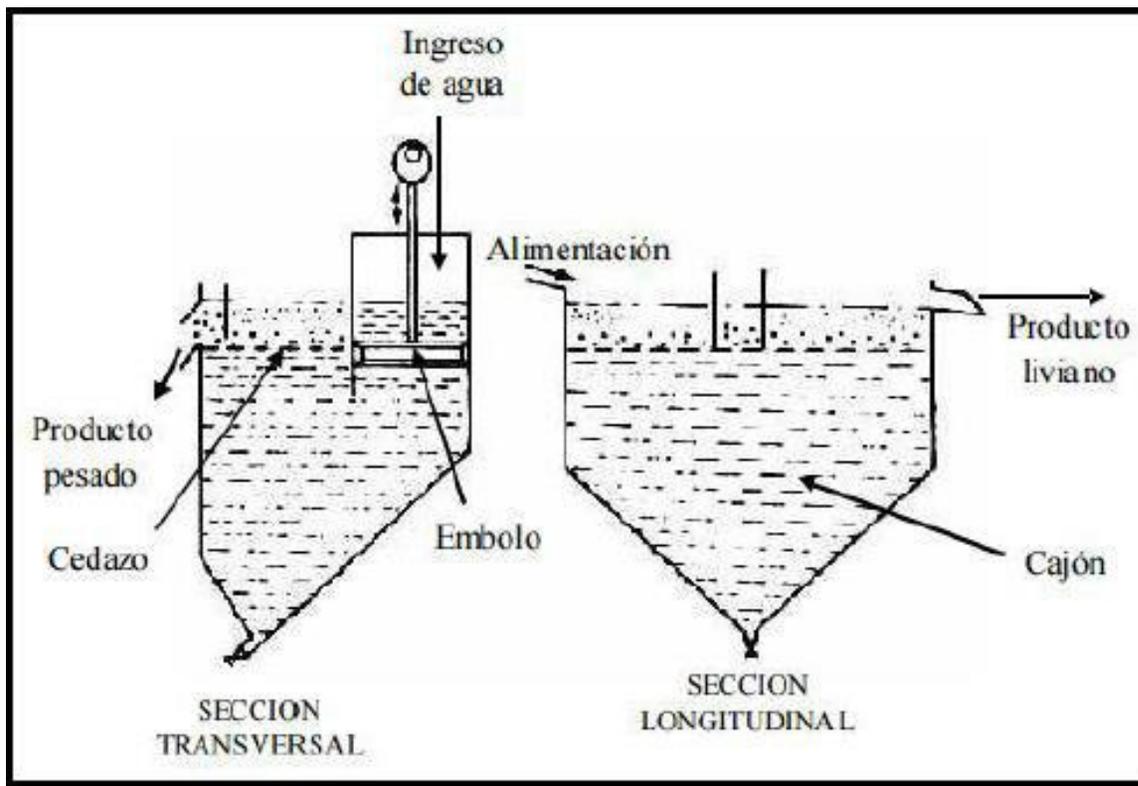
- Las partículas ligeras ascienden a posiciones superiores
- Las partículas pesadas se desplazan hacia las zonas más bajas.

Durante el golpe de retorno la cama se cierra y las partículas pesadas descienden a través de la cama hacia la zona de concentrados. (Morral & Jimeno p,24)

Cuando las partículas entran en el Jigs, la fuerza que las impulsa en dirección transversal depende de la alimentación y las dimensiones del equipo. Sin embargo, por otro lado, la fuerza que clasifica las partículas se genera por la pulsación o el flujo de agua que se introduce al Jig. La acción pulsante del agua provoca la expansión de la cama de partículas, obligando a todas ellas a desplazarse hacia arriba. El movimiento de las partículas está determinado por su tamaño, densidad, viscosidad del medio y otros factores.

### Figura 1

*Vista trasversal y longitudinal del concentrador Jigs*



*Nota.* Vista trasversal y longitudinal del concentrador Jigs. (Morral & Jimeno, 1985)

- ***Características de los Jigs***

Existen diversos tipos de Jigs que varían según su geometría, mecanismo de accionamiento y otros detalles de construcción. Sin embargo, a pesar de esta diversidad, todos ellos comparten los siguientes elementos fundamentales:

- **Caja fija:** Contiene la pulpa y permite que esta sea sometida a pulsaciones y succiones, lo que facilita la separación.

- **Mecanismo de accionamiento:** Incluye componentes como motor, pistón y sistema de lubricación, entre otros.

- **Criba:** Soporta el lecho donde se lleva a cabo la separación.

- **Sistema de descarga:** Permite extraer tanto el concentrado como el relave.

- Los parámetros operacionales que más influyen en el funcionamiento de un JIG son: El tipo y características de la mena a utilizar, cantidad de agua frecuencia, amplitud, entre otros, etc. (vilcapoma & Chavez, 2012)

#### ***2.5.5.2 Mesas vibratorias***

Es una maquina con capacidad de separar diferentes elementos según su peso específico, también estas mesas vibratorias son equipos de concentración que actúan a través de superficies con movimientos acelerados asimétricos, combinados muchas veces con el principio de escurrimiento laminar.

Las mesas vibradoras ofrecen una amplia flexibilidad en sus parámetros operativos, lo que les permite ajustarse fácilmente al material de alimentación. Debido a que el proceso de concentración ocurre de forma visible sobre el tablero de la mesa, cualquier modificación en los parámetros, como la inclinación longitudinal o transversal y la cantidad de agua, produce cambios inmediatos en el comportamiento del material, los cuales pueden observarse directamente. Además, es posible

recolectar muestras durante la operación, por ejemplo, utilizando bateas para oro. Esto hace que la optimización del proceso sea sencilla y pueda ser realizada incluso por operadores con poca experiencia.

La mesa Wilfley, introducida en 1895, se convirtió en el modelo principal de mesas vibratorias. Tras comprobarse su eficiencia, su uso se extendió y se desarrollaron nuevas versiones. Una de las principales mejoras realizadas a este diseño fue el recubrimiento parcial del tablero con riffles paralelos al eje longitudinal, lo que permitió tratar materiales más gruesos y aumentar su capacidad. La mesa Wilfley cuenta con un mecanismo que genera un movimiento vibratorio lateral específico en dirección transversal al flujo de la pulpa, lo que facilita el desplazamiento de las partículas a lo largo de los riffles (Rivera, 2017).

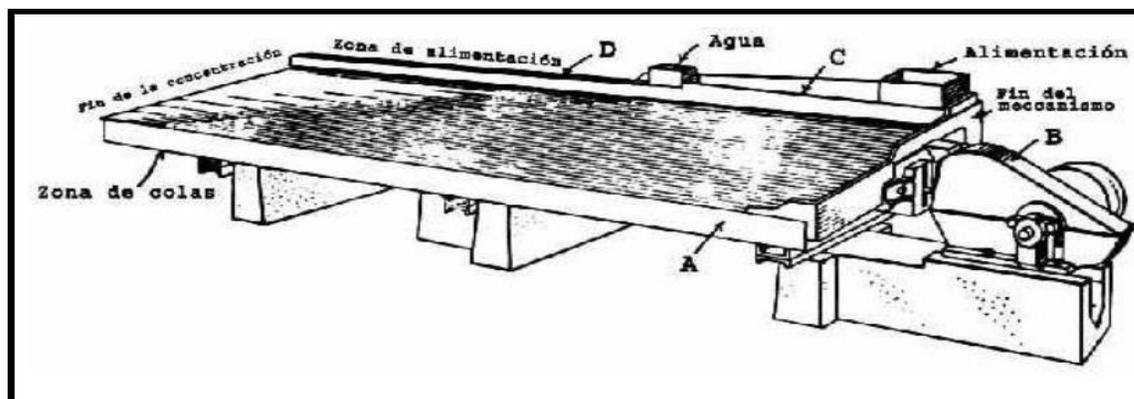
#### **2.5.5.2.1 Variables de operación de las Mesas Vibratorias**

##### **- Variables de diseño**

- Forma de la mesa.
- Tipo de material utilizado en la superficie de la mesa.
- Diseño de los riffles.
- Propiedades específicas de los riffles.
- Frecuencia de golpe.
- Granulometría de la alimentación.

##### **• Controles operacionales**

- Grado de inclinación de la mesa.
- Densidad del material que ingresara al alimento.
- Agua de lavado.
- Posición de los cortadores de productos. (Rivera, 2017)

**Figura 2***Partes de una mesa vibratoria*

*Nota.* Partes de una mesa vibratoria. (Morrall & Jimeno, 1985)

### **2.5.5.3 Características de la Concentración en Mesas Vibratorias**

- En una mesa vibradora, el tamaño máximo de las partículas que pueden separarse oscila entre 2 y 3 mm, aunque en materiales como el carbón puede llegar hasta 15 mm. El tamaño mínimo es de aproximadamente 75 micrones, dependiendo del volumen de agua utilizado y del movimiento de la mesa. Es crucial que las partículas sedimenten correctamente para integrarse al concentrado.

La concentración de sólidos en la pulpa de alimentación debe mantenerse a niveles inferiores para facilitar la estratificación y la expansión entre los rifles. Por lo general, las pulpas presentan densidades máximas de hasta 25 % de sólidos para arenas y del 30 % entre materiales finos.

- Aumentar la inclinación reduce la necesidad de agua de lavado, pero también limita la separación entre las distintas fracciones, lo que complica el proceso de corte. Esto puede ser aceptable en operaciones rougher, pero no en etapas cleaner, donde se requiere mayor precisión.

#### ***2.5.5.4 La Capacidad de la Mesa Vibratoria Depende de los Siguietes factores:***

- **Ángulo de inclinación:** Este factor influye significativamente en la calidad de la separación. Cuando existe una mayor diferencia de densidades entre los materiales del alimento, es recomendable emplear un ángulo de inclinación elevado.
- **Configuración de golpes y velocidad:** La cantidad de golpes y la velocidad de operación del equipo dependen del tipo de material alimentado. Para materiales finos, se prefieren golpes cortos a velocidades relativamente altas, mientras que para materiales gruesos se opta por golpes más largos y velocidades más bajas.
- **El Caudal de agua:** La cantidad de agua utilizada debe ser suficiente para cubrir completamente la bandeja de alimentación. Sin embargo, este parámetro puede ajustarse según el tamaño de las partículas que ingresan a la mesa, siendo posible que, en algunos casos, se requiera un caudal mayor o menor (Morrall & Jimeno, 1985).

#### ***2.5.5.5 Concentración en Espirales***

La primera espiral Humphrey fue introducida en 1945, momento en el que se desarrolló su diseño inicial. Su principio de funcionamiento se basa en el empleo de fuerzas centrífugas, combinadas con una corriente de agua, para lograr la concentración de partículas. Aunque este principio se ha mantenido hasta la actualidad, los modelos modernos han incorporado mejoras en aspectos como dimensiones, diseños y materiales de construcción.

Este equipo de concentración gravimétrica consta de un canal helicoidal, cuyo número de vueltas varía según el diseño. Su operación se fundamenta en una corriente de agua que permite separar las partículas aprovechando sus diferencias de peso. Este equipo es ampliamente utilizado en la preconcentración de materiales metálicos. Una de sus principales ventajas es la posibilidad de reutilizar el agua en caso de acceso limitado, lo que reduce su impacto ambiental.

En el extremo de la estructura helicoidal, la espiral cuenta con aberturas que permiten recolectar los tres tipos de materiales resultantes tras la separación: de alta, media y baja densidad. Estas aberturas están conectadas a tuberías cortas por las cuales se descargan los materiales. Cabe mencionar que, a medida que aumenta la cantidad de material a separar, se requiere mayor cantidad de agua. Esto se debe a que el material pasa por una bomba, y si está demasiado seco, existe el riesgo de obstrucción, lo que puede interrumpir el proceso (Morral & Jimeno, 1985).

El funcionamiento de las espirales se basa en el principio de concentración mediante un flujo laminar, donde las partículas que se deslizan por un canal circular a través de una película de fluido están sujetas, al menos, a cuatro fuerzas principales.

- Fuerza gravitacional.
- Fuerza centrífuga.
- Empuje líquido.
- Roce contra el fondo del canal.

A medida que la pulpa fluye por el canal espiral de sección semicircular, cada partícula experimenta una fuerza centrífuga tangencial al cauce. Esta fuerza es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo e inversamente proporcional al radio donde se encuentra ubicada la partícula. La fuerza centrífuga desplaza el líquido hacia la periferia del espiral, hasta que se establece un equilibrio entre esta fuerza y la gravedad. En ese punto, la velocidad del flujo disminuye con la profundidad, alcanzando su máximo en la superficie del líquido y aproximándose a cero cerca del fondo.

La reducción de la velocidad es más evidente cerca de la superficie del canal, donde se crea una capa de fluido que se desacelera debido a la fricción. Este fenómeno disminuye la fuerza

centrífuga, lo que provoca que las partículas más densas se desplacen hacia el centro del canal, mientras que las partículas más ligeras son impulsadas hacia la periferia.

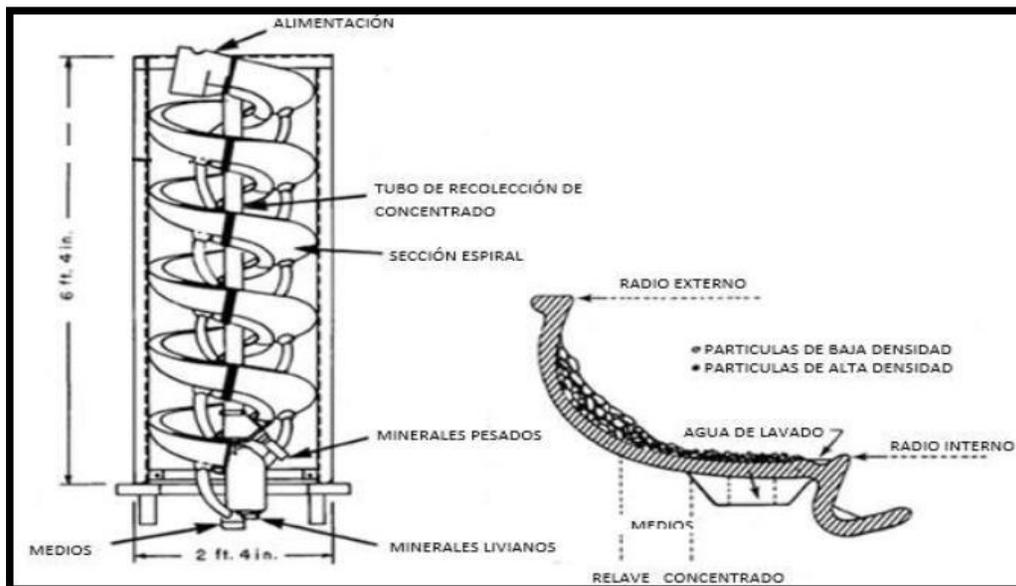
En resumen, el desplazamiento de las partículas pesadas hacia el centro del canal y de las más ligeras hacia el borde es el resultado de la interacción de las cuatro fuerzas mencionadas previamente. Entre los modelos de espirales destacan los diseños Humphrey y Reichert.

Las variables de operación son:

- Alimentación sobre 3 t/h de sólidos.
- Densidad de pulpa sobre 60% de sólidos en peso.
- Granulometría de alimentación: 0.030 – 2 mm.
- Volumen máximo de pulpa: 5 m<sup>3</sup>/h y Flujo de agua: 3.5 – 7.5 m<sup>3</sup>/h.

**Figura 3**

*Partes de un Concentrador Espiral Humphrey*



*Nota.* Partes de un concentrador Espiral Humphrey. (Morral & Jimeno, 1985)

### **2.5.5.6 Concentración Gravimétrica - Centrífuga**

#### **2.5.5.6.1 Generalidades**

A pesar de las ventajas que ofrece el enriquecimiento mediante fuerza gravitacional, uno de los principales desafíos es la falta de equipos específicos que sean eficaces en el tratamiento de un rango amplio de tamaños de partículas. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversos dispositivos y máquinas para abordar diferentes intervalos de tamaño.

Los métodos gravimétricos convencionales son relativamente efectivos para recuperar partículas mayores a 75  $\mu$ . Sin embargo, a medida que el tamaño de las partículas disminuye, las fuerzas de viscosidad y fluidez adquieren mayor relevancia en comparación con la densidad, lo que reduce significativamente la eficiencia del proceso de separación en partículas más finas.

En las últimas décadas, la investigación se ha centrado en optimizar la recuperación de partículas finas dentro del rango de 75 a 15  $\mu$ , desarrollando equipos mejorados como los conos Reichert, espirales Humphrey, el separador Bartles-Mosley, entre otros, que han mejorado la separación húmeda de partículas finas.

No obstante, ante la creciente necesidad de recuperar partículas aún más pequeñas, se ha explorado, en las últimas dos décadas, la sustitución de las fuerzas gravitacionales convencionales por fuerzas centrífugas, buscando tecnologías más eficientes para este propósito.

Como se recordará, todos los equipos de concentración por gravimetría como las canaletas, mesas vibrantes, máquinas pulsantes, etc., trabajan en campos de fuerza gravitacional. (Morrall & Jimeno, 1985)

#### **2.5.5.6.2 Equipos de Concentración Gravimétrica – Centrífuga**

Los equipos de concentración centrífuga, a diferencia de los convencionales, amplifican la fuerza gravitacional, logrando que la separación se realice bajo valores de aceleración equivalentes

a múltiples veces la gravedad ("G's"). Esto los hace más eficientes que los métodos tradicionales, permitiendo una separación más efectiva de las partículas con mayor peso específico.

El funcionamiento de estos equipos se basa en el principio de sedimentación obstaculizada forzada, donde la sedimentación se ve facilitada por la aplicación de una fuerza centrífuga. Esta fuerza aumenta el criterio de concentración mena-ganga al intensificar la diferencia de densidades entre los componentes, mejorando la eficacia del proceso.

Entre los equipos más utilizados que operan bajo este principio destacan los concentradores centrífugos "Falcon" y "Knelson" (Morrall & Jimeno, 1985).

### ***2.5.5.7 Concentradores Falcon***

#### ***2.5.5.7.1 Generalidades***

El concentrador Falcon, de origen canadiense al igual que el Knelson, presenta diferencias notables en comparación con este último, particularmente en cuanto a la velocidad de rotación. En el concentrador tipo Falcon, el sistema centrífugo generado se caracteriza por ser aproximadamente cinco veces más potente que el concentrador tipo Knelson. Además, las canaletas o rifles del concentrador Falcon se encuentran solo en la parte superior del cono, mientras que en el Knelson se extienden a lo largo de todo el cono, incluyendo ambas porciones superior e inferior.

Dentro del fundamento de separación del concentrador tipo Falcon se basa en la variación de densidades entre las partículas dentro de una carga mineral. Utilizando campos gravitacionales elevados, este concentrador es capaz de separar minerales liberados en una amplia gama de tamaños, desde partículas finas hasta ultrafinas, lo que mejora la disgregación en términos de eficiencia en comparación con otros tipos de concentradores gravimétricos presentes en el mercado.

El concentrador Falcon está principalmente fabricado en su función de recuperación de material oro libre, tanto de origen aluvial como de molienda. Este equipo puede someter el material de trabajo a un campo de hasta 300 veces la gravedad y cuenta con una caja reguladora que permite controlar la fuerza centrífuga aplicada. Además, tiene la capacidad de recuperar una mayor cantidad de partículas finas en comparación con otros métodos de concentración (Portilla, 2022).

#### **2.5.5.7.2 *Parámetros Operacionales de Diseño***

Desde el punto de vista de la presencia de parámetros operacionales, en el concentrador Falcon, los parámetros operativos clave comprenden el porcentaje de sólidos en la alimentación, la granulometría del mineral, la duración del proceso, la presión del agua, la velocidad de rotación del cono, el caudal de agua para fluidificación y la fuerza centrífuga.

La geometría del rotor es un factor crítico en el desempeño del equipamiento; dependiendo del tipo de mena (con mayor o menor densidad, por ejemplo), habría un rotor con geometría apropiada. (Portilla, 2022)

#### **2.5.5.7.3 *Características***

Sus principales características son:

- Amplio rango de aplicación en el procesamiento industrial de minerales.
- Alta eficiencia en la recuperación de partículas finas.
- Rotor fabricado con materiales resistentes al desgaste, como caucho, poliuretano, carburo y Nihard.
- Pocas piezas móviles, lo que reduce el mantenimiento.
- Gran confiabilidad en la obtención del concentrado.
- Modelos de laboratorio con alta capacidad de procesamiento.

- Disponibilidad de modelos diseñados para recuperar materiales de mayor peso o para alimentar con un amplio rango de tamaños de partículas.

#### **2.5.5.7.4**      *Ventajas*

Desde una perspectiva general, los principales beneficios que ofrecen estos equipos son:

- Alta capacidad de procesamiento.
- Bajo uso de agua, dado que únicamente se fluidifica la parte de la taza relacionado a la zona de concentración.
- Altas tasas de recuperación, especialmente en fracciones finas.
- Bajo costo tanto de inversión como de operación.
- Facilidad en la automatización.
- Capacidad para preconcentrar y concentrar minerales.

#### **2.5.5.7.5**      *Aplicaciones*

Algunas de sus aplicaciones incluyen:

- Recuperación de oro fino de yacimientos primarios.
- Recuperación de oro a partir de la alimentación del ciclón, ya sea en overflow o underflow dentro del circuito de molienda.
- Retratamiento de sulfuros.
- Recuperación de hierro y estaño fino.
- Eliminación de cenizas y sulfuros en el carbón.
- Recuperación de oro fino de relaves de flotación o cianuración.
- Preconcentración antes de la cianuración para optimizar el rendimiento.
- Retratamiento de relaves de tantalio y estaño fino.
- Retratamiento de hierro fino en relaves.

- Preconcentración de oro y plata de relaves antiguos.
- Preconcentración y deslamado de depósitos de minerales pesados.
- Preconcentración antes de la flotación o cianuración mediante la eliminación de partículas livianas no deseadas.
- Instalación en circuitos de molienda para la recuperación de valores liberados.

(VICTOR, 2022)

#### ***2.5.5.8 Modelos del Concentrador Falcon***

En la actualidad en el mercado existe una numerosa variedad de modelos del centrifugador Falcon, desde aquellos utilizados para escala laboratorio (semi-continuo), hasta los de uso industrial (continuo), cada uno con características y aplicaciones diferentes, además de los últimos modelos desarrollados para material ultra-fino.

##### ***2.5.5.8.1 Concentradores Falcon Semi Lote "SB"***

Los concentradores Falcon SB, denominados "semi batch", permiten una alimentación continua durante su operación, pero solo producen concentrado durante los ciclos periódicos de enjuague. Los tiempos de operación pueden variar desde cinco minutos hasta varias horas, dependiendo de la aplicación, mientras que los ciclos de enjuague suelen durar menos de un minuto. Esto es posible gracias a un sistema de frenado dinámico que reduce rápidamente la velocidad del recipiente, realiza el enjuague del concentrado y lo devuelve a su velocidad normal de operación. Equipados con un variador de frecuencia, estos concentradores gravimétricos pueden operar con fuerzas centrífugas entre 50 y 200 G.

La serie Falcon SB se caracteriza por un diseño sencillo que optimiza su eficiencia y rendimiento. Estos concentradores son especialmente útiles en situaciones donde otros métodos gravimétricos no funcionan adecuadamente, ya que son capaces de recuperar partículas ultrafinas liberadas y

lograr separaciones de alta precisión gracias a sus intensos movimientos centrífugos. En algunas aplicaciones, el circuito Falcon es capaz de tener un poder de recuperación de hasta un 80% de la producción global de la planta, dependiendo de la cantidad de metales nativos que se encuentren presentes.

#### ***2.5.5.9 Concentrador Centrifugo Falcon sb-40 (laboratorio)***

El concentrador Falcon está compuesto por un bolo de forma cilíndrico-cónica que rota a alta velocidad dentro de una camisa fija, cuyo papel funcional es recolectar el relave. La pulpa ingresa en la parte inferior del cono, donde se acelera y se estratifica a medida que sube a través del rotor en funcionamiento. Según el modelo específico del concentrador (Serie SB o Serie C), las partículas serán sometidas a fuerzas de 200 g o 300 g, y el proceso de concentración en el bolo se llevará a cabo de manera discontinua o continua, dependiendo del tipo de serie.

El concentrador se emplea en la separación de diversos materiales, como minerales de hierro, sulfuros, carbón, tantalio, y metales nativos como oro, plata, níquel, cobre, cinc, estaño, entre otros.

##### ***2.5.5.9.1 Parámetros Operacionales de Diseño***

- En el concentrador Falcon, los factores operativos más importantes están representados por el concentrado de sólidos en la alimentación, la granulometría de la muestra y la duración del proceso.

- La forma del rotor es un elemento crucial para el rendimiento del equipo, según el tipo de mena (dependiendo de su mayor o menor densidad), será necesario elegir un rotor con la configuración adecuada.

**Tabla 2***Tipos de Modelos Falcon SB*

Modelo	Capacidad de tratamiento de sólidos (t/h)	Motor (HP)	(HP) Agua de proceso (m <sup>3</sup> /h)
SB 40	0 – 0,25	0,5	0,24 – 1,2
SB 250	1 – 8	3	1,8 – 2,7
SB 750	5 – 47	10	6 – 9
SB 1350	23 – 114	20	8 – 15
SB 2500	42 – 206	40	15 – 24
SB 5200	105 – 392	100	30 - 42

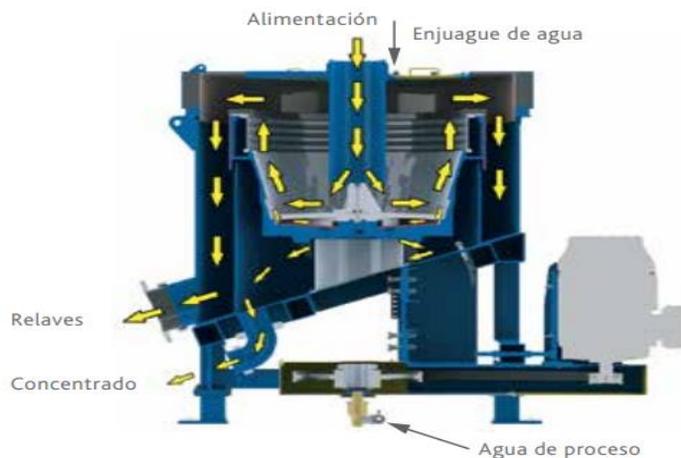
*Nota.* Clasificación de modelos de concentradores Gravimétricos falcon SB (SEPRO mineral systems, 2009)

**2.5.5.9.2 Diseño**

El Falcon SB es un concentrador de operación intermitente que emplea agua de fluidización para su funcionamiento. Este equipo permite obtener concentrados de alta pureza, con recuperaciones cercanas al 1% en peso. Las partículas alimentadas son sometidas a una fuerza centrífuga de 200 G, esto provoca que el material se desplace hacia arriba a lo largo de la pared interna del recipiente, como respuesta a las altas velocidades a la cual se encuentra girando. El concentrado queda atrapado en los rifles situados en la parte superior del recipiente, mientras que las colas se expulsan de forma continua durante el proceso. Al finalizar la alimentación, la velocidad del recipiente se reduce, permitiendo la descarga del concentrado.

**Figura 4**

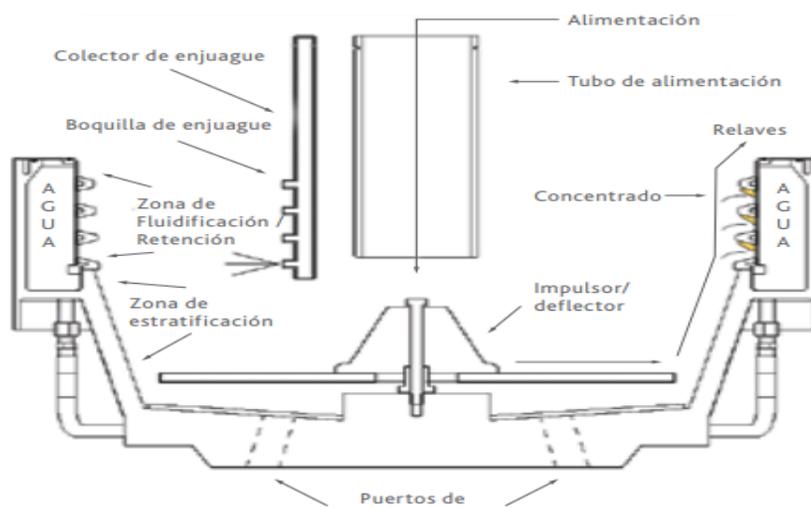
*Proceso de Funcionamiento del Concentrador gravimétrico Falcon SB*



*Nota.* El material asciende por la pared interna del bolo que ira a gran velocidad y el concentrado es retenido en los rifles de la parte superior del bolo y Las colas son eliminadas en forma continua durante el proceso. (SEPRO mineral systems, 2009)

**Figura 5**

*Partes del concentrador gravimétrico Falcon SB 40*



*Nota.* Partes principales del concentrador gravimétrico Falcon SB (SEPRO mineral systems, 2009)

### **2.5.5.9.3 Aplicaciones**

- Recuperación de oro, plata y metales del grupo del platino.
- Recuperación de oro proveniente de la alimentación del ciclón, ya sea en overflow o underflow dentro del circuito de molienda.
- Recuperación de oro en actividades relacionadas a minería aluvial.
- Recuperación de oro a partir de plantas de agregados.

### **2.5.5.9.4 Principales Ventajas**

- La unidad de frecuencia no constante y sistema de frenado dinámico, los cuales proporciona ventajas en minimizar preponderan el tiempo de desconexión durante el proceso de lavado del concentrado.
- El diseño modular con tapa plana prolonga la vida media útil, acorta los tiempos de inoperatividad y disminuye los costos de mantenimiento.
- El sistema mejorado de control de fluidización estándar optimiza el rendimiento de la máquina.
- Las altas fuerzas G (entre las más elevadas en la industria del procesamiento de minerales) incrementan la eficiencia y brinda la propiedad recuperativa de materiales finos.
- Reducción en el consumo de agua, ya que solo se fluidifica la parte de la taza destinada a la zona de concentración.
- Alta disponibilidad mecánica siendo este superior al 95% y costos operativos considerablemente bajos.

- Representa un procedimiento completamente automatizado con un sistema de "un toque", lo que minimiza el tiempo de inactividad y maximiza la seguridad en la recuperación de concentrados.

Los métodos de concentración Falcon se emplean para la disgregación de minerales con distintas densidades mediante el uso de la fuerza gravitacional. Para una separación efectiva en este tipo de concentración es fundamental exista una marcada diferencia entre las densidades del mineral y la ganga. (SEPRO mineral systems, 2009)

### ***2.5.6 Proceso de Flotación***

### ***2.5.7 Introducción***

Los procesos de concentración por flotación desempeñan un papel crucial en la recuperación de especies valiosas de sus menas respectivas. Existen diversas variables que influyen en los resultados metalúrgicos obtenidos al aplicar este proceso a un tipo de mineral determinado, lo que con frecuencia lo convierte en un proceso altamente demandante y complejo. La flotación por definición representa un proceso fisicoquímico que involucra tres estados moleculares de la materia como lo son el estado sólido, líquido y gaseoso, y tiene además como propósito separar especies minerales a través de la unión o propiedad de adhesión selectiva de las partículas minerales a las burbujas de aire. A continuación, describimos las características y propiedades de la flotación como principios básicos:

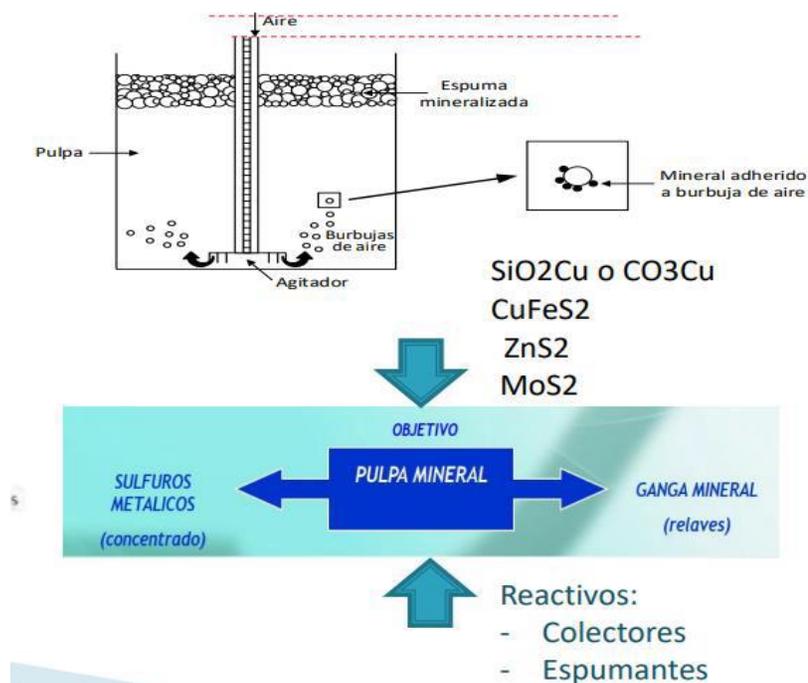
- La hidrofobicidad como propiedad inherente al mineral, que proporciona que las partículas sólidas mantengan características de adherencia a las burbujas de aire.
- La generación de una espuma con propiedades de persistencia y estabilidad en la superficie del agua, condición que termina facilitando que las partículas queden suspendidas en la capa superior.

### 2.5.8 *Flotación de Minerales*

El proceso de flotación de minerales, desde una perspectiva fisicoquímica, es un método hidrofóbico en el que el mineral de interés es repelido por el agua y atraído hacia las burbujas de aire, siendo posteriormente evacuado hacia la superficie en forma de espuma. Este proceso requiere la interacción de tres fases: sólido, líquido y gas (Astucuri, 1994). La flotación aprovecha las diferencias fisicoquímicas en las superficies de los minerales para concentrar partículas finamente molidas.

El proceso implica el tratamiento químico de una pulpa mineral para generar condiciones que faciliten la adhesión de determinadas partículas a las burbujas de aire. Su finalidad es separar los minerales valiosos de los no útiles en una pulpa acuosa, aprovechando su afinidad (hidrofílica) o repulsión (hidrofóbica) hacia el agua. Las partículas hidrofílicas se humedecen, permanecen suspendidas en la pulpa y eventualmente se hunden, mientras que las hidrofóbicas no se mojan, se adhieren a las burbujas y aumentan. Estas propiedades pueden ser inherentes a ciertos minerales o inducidas mediante el uso de reactivos de flotación.

En el caso del oro, la flotación puede realizarse tanto en su forma nativa como en minerales asociados, principalmente sulfuros de cobre, plomo y arsenopirita. Según su comportamiento en la flotación, los minerales auríferos pueden clasificarse en tres categorías principales (Wills & Napier-Munn, 2006).

**Figura 6***Celda de Flotación Convencional*

*Nota:* Mecanismo de una celda de flotación Convencional. (Astucuri, 1994)

### 2.5.9 Termodinámica de Flotación

Como se ha explicado, el fenómeno de la flotación se basa en las propiedades hidrofóbicas de las partículas, las cuales tienen la capacidad de unirse y formar interacciones estables con las burbujas de aire, que previamente han sido generadas con un espumante adecuado. La principal interrogante en este proceso es: ¿Qué fuerza permite la unión entre la burbuja y la partícula?

Durante la flotación, se genera un sistema relativamente inestable compuesto por burbujas independientes y partículas de mineral. Este sistema evoluciona hacia uno más estable, donde burbujas y partículas se unen formando un grupo conjunto. La probabilidad de que este fenómeno ocurra puede analizarse a través de la segunda ley de la termodinámica.

Esta ley establece que un proceso o reacción solo se produce de manera espontánea si disminuye la energía libre contenida en el sistema en un momento determinado. En tales circunstancias, se dice que el sistema logra alcanzar su mayor punto de estabilidad solo en condiciones en la cual la energía libre presente es considerada como mínima. Finalmente, el concepto de energía libre no hace sino alusión a la parte de la energía interna capaz de convertirse en trabajo a condiciones de temperatura y volumen constantes en el tiempo. Por lo tanto, desde una perspectiva termodinámica, es crucial analizar la energía libre antes y después del proceso (Astucuri, 1999, pág. 54).

Para evaluar la probabilidad de formar el grupo burbuja-mineral, se deben considerar las energías libres asociadas a las interfaces involucradas:

- Solido-gas (s-g)
- Solido-liquido (s-l)
- Liquido-gas (l-g)

El registro de cantidad de energía libre se determina sumando todas y cada una de las energías libres en las distintas áreas de las interfaces correspondientes.

La reserva de energía libre ( $G_1$ ) en el sistema, antes de que ocurra la adherencia o unión, se expresa de la siguiente manera:

$$G_1 = A_{lg}\gamma_{lg} + A_{sl}\gamma_{sl} \quad (1)$$

Donde:

$A_{lg}$  = Área de la interfase líquido - gas.

$\gamma_{lg}$  = Energía superficial (ergios por  $cm^2$ ) de la interface líquido-gas.

$A_{sl}$  = Área de la interfase sólido- líquido

$\gamma_{sl}$  = Energía superficial (ergios por  $cm^2$ ) de la interface sólido- líquido.

El balance de la energía libre ( $G_2$ ) en el sistema después de la adhesión, para un área de  $1\text{ cm}^2$  está dado por:

$$G_2 = (A_l g - 1) \gamma_{lg} + \gamma_{sg} * 1 + (A_{SL} - 1) \gamma_{SL} \quad (2)$$

Si  $G_1 > G_2$ , se concluye que se ha producido una reducción en energía libre, por unidad de área, correspondiente al proceso de adhesión partícula-burbuja, esta reducción de energía libre esta expresada por la ecuación de Dupre:

$$G_1 - G_2 = \Delta G = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} - \gamma_{lg} < 0 \quad (3)$$

En esta forma particular, no se puede utilizar para los cálculos, porque aún no se puede conocer los valores de la tensión superficial para la fase (sólido – líquido) y (sólido- gas). Sin embargo, es posible medir el ángulo de contacto  $\theta$ , utilizando la ecuación de Young.

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta \quad (4)$$

De donde Despejando  $\gamma_{lg} \cos \theta$  se obtiene la ecuación (5):

$$\gamma_{lg} \cos \theta = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad (5)$$

Al reemplazar los valores del lado izquierdo de la ecuación (5) en la ecuación (4), se obtiene una nueva ecuación (6).

$$\Delta G = (\cos \theta - 1) < 0 \quad (6)$$

En la ecuación (6) para:  $\theta = 0^\circ$ ,  $\Delta G = 0$  y para  $\theta > 0^\circ$ ,  $\Delta G < 0$ .

Por lo tanto, los minerales cuyo ángulo de contacto con el agua sea cero se consideran hidrofílicos y, termodinámicamente, no flotables. En cambio, los minerales con un ángulo de contacto mayor a cero tienen la capacidad de flotar. Es importante señalar que el ángulo de contacto descrito representa un requerimiento o principio termodinámico de equilibrio del sistema.

La ecuación (6), tener en cuenta que es aplicable para un área total de contacto de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>. Si se tiene en cuenta la deformidad que experimenta la burbuja y los cambios estructurales a nivel de su superficie, tenemos entonces:

$$AG = \left( \frac{G1-G21}{Asg} \right) = \gamma l g \left( \frac{Alg-Alg1}{Asg} - \text{COS}\theta \right) \quad (7)$$

Dónde:

$Alg1$  = Representa la superficie de agua que termina cubriendo la burbuja tras su adhesión.

$G21$  = Energía libre total del sistema después de la adhesión, tomando en cuenta la deformación de la burbuja.

Así entonces se extrapola, que las ecuaciones (6) y (7) detallan que la disminución de la energía libre contenido en el sistema está directamente relacionada con el ángulo de contacto. Esto implica que, cuanto más repelente al agua sea la superficie, mayor será la probabilidad de que ocurra la adhesión a la burbuja. Además, estas ecuaciones indican que la reducción de energía libre en el sistema depende de  $\gamma l g$ . (Astucuri, 1999, pág. 60)

### **2.5.10 Cinética de Flotación**

La cinética de flotación es el estudio de la variación de la cantidad de espumas producidas en el overflow en un tiempo de flotación y la identificación cuantitativa de todas las variables que controlan la velocidad de flotación.

La cinética de flotación de minerales se define por la variación, a lo largo del tiempo, de la cantidad de material transportado por las espumas. Este proceso permite correlacionar el tiempo de flotación con la cantidad de mineral que asciende a la espuma.

La ecuación que describe este comportamiento puede derivarse a partir de fundamentos teóricos, principios establecidos por el mecanismo de flotación, o principalmente, a partir de observaciones empíricas.

El propósito de estudiar la cinética de flotación es identificar la ecuación que describe la velocidad de flotación y analizar cómo las principales variables influyen cuantitativamente en los parámetros cinéticos.

Existen diversos métodos para determinar esta ecuación, de los cuales se destacan los más importantes a continuación:

1. El método empírico.
2. El método semi - empírico de García Zúñiga.
3. El método Analógico.
4. El método analítico.

De la totalidad de métodos mencionados para el cálculo de la ecuación, el presente trabajo de investigación se empleará el segundo método descrito anteriormente correspondiente al método semi-empírico, propuesto por García Zúñiga. Este método resulta ser uno de los más aplicados en la práctica. Consiste en emplear una ecuación diferencial, que, al integrarse dentro de ciertos límites, genera una ecuación que representa los resultados experimentales. Humberto García Zúñiga determinó que la recuperación en el proceso de flotación sigue una función exponencial respecto al tiempo.

Muchos investigadores definieron una constante de velocidad correspondiente a velocidad específica de una reacción de primer grado, partiendo de una ecuación general: (Astucuri, 1999, pág. 62)

$$\frac{dc}{dt} = -K_n C^n \quad (8)$$

Donde:

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

$C$  = Es la concentración de material flotable.

$K$  = Es la constante de velocidad de la ecuación.

Para  $n = 1$  la integración de la ecuación (8) resulta:

$$\frac{dc}{dt} = -K_n C^1$$

Sabiendo que:

$$C = C_0 \text{ cuando } t = 0$$

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

Integrando tenemos:

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{dc}{c} = K_1 \int_0^t dt \quad (9)$$

$$\log \frac{C_t}{C_0} = K_1 t \Rightarrow C_t = C_0 e^{(-k_1 t)} \quad (10)$$

Entonces resulta la siguiente ecuación:

$$C_t = C_0 e^{(-k_1 t)} \quad (11)$$

Donde:  $C_t$  = Concentración en un instante de tiempo.

$C_0$  = Concentración inicial de la especie que es flotable.

$t$  = tiempo de flotación.

Si el tiempo de flotación se prolonga indefinidamente, se encontrará que no flotará todo el material que debería flotar, en otras palabras, la recuperación en el proceso de flotación no será al 100%. Corrigiendo la ecuación (8), se tiene.

$$\frac{dc}{dt} = -k(c - c_\infty) \Rightarrow \int \frac{dc}{c - c_\infty} = -k \int dt \quad (12)$$

Donde:

$c_{\infty}$  = Representa la concentración del material que no flotará incluso después de un tiempo de flotación prolongado hasta el infinito.

Así entonces, aplicando principio de integrales sobre la ecuación (12), obtenemos:

$$\frac{C - c_{\infty}}{c_0 - c_{\infty}} = e^{-kt} \quad (13)$$

La recuperación de la especie valiosa en un momento específico se expresa de la siguiente manera:

$$R_t = \frac{c_0 - c}{c_0} \quad (14)$$

De la ecuación (14). se tiene

$$C = C_0(1 - R_t) \quad (15)$$

La recuperación en un tiempo de flotación que se extiende indefinidamente ( $R_{\infty}$ ) se expresa de la siguiente manera:

$$R_{\infty} = \frac{c_0 - c_{\infty}}{c_0} \quad (16)$$

De donde:

$$C_{\infty} = C_0(1 - R_{\infty}) \quad (17)$$

Finalmente reemplazando la ecuación (15) y (17) en la ecuación (13). Se tiene:

$$R_t = R_{\infty} = (1 - e^{-kt}) \quad (18)$$

Donde:

$R_t$  = Recuperación total en el tiempo "t"

$R_{\infty}$  = Recuperación que alcanza un valor asintótico (es decir, se acerca de manera infinita a una curva recta) cuando la variable tiempo "t" se aproxima al infinito.

$K$  = Constante de velocidad, que depende de los reactivos y otras variables.

$t$  = Tiempo total de flotación expresada en minutos (min).

La ecuación (18) corresponde, según Humberto García Zúñiga, al método de primer orden.

Modelo de primer orden de García Zúñiga, Permite ajustar la gran mayoría de los resultados experimentales y calcular la constante de velocidad de flotación. (Astucuri, 1999, pág. 63)

De la ecuación (18) se tiene:

$$\log \frac{C_0 - C_\infty}{C - C_\infty} = kt \rightarrow Rt = R_\infty (1 - e^{-kt})$$

Haciendo cambios:

$$\frac{R_t}{R_\infty} R_\infty = 1 - e^{-kt} \quad (19)$$

$$\frac{R_t}{R_\infty} - 1 = -e^{-kt} \quad (20)$$

$$1 - \frac{R_\infty}{R_t} = e^{-kt} \quad (21)$$

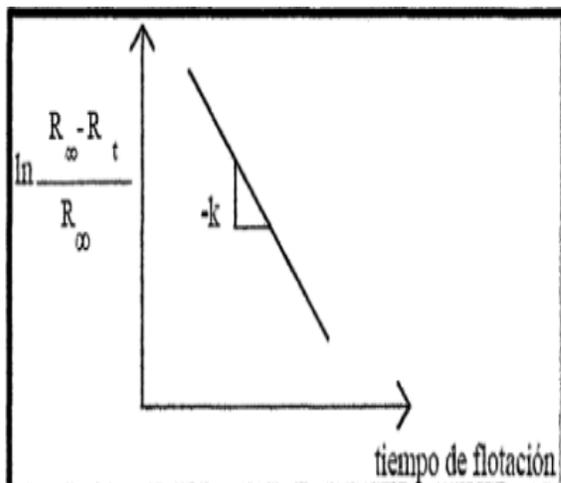
$$\frac{R_\infty - R_t}{R_\infty} = e^{-kt} \quad (22)$$

$$\ln\left(\frac{R_\infty - R_t}{R_\infty}\right) = -kt \quad (23)$$

A continuación, se presenta el gráfico utilizado para determinar el valor de "K". Ver figura 1.

### Figura 7

*Determinación del Valor de K*



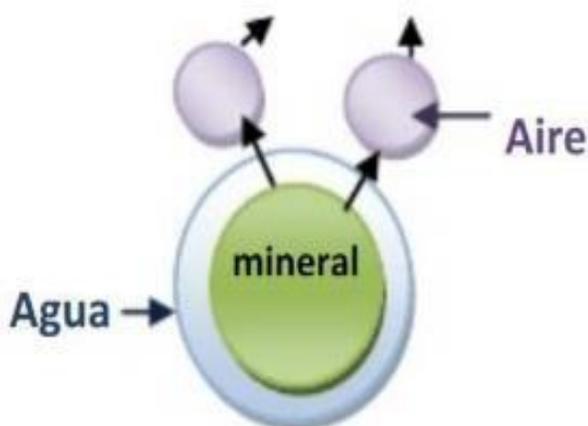
Nota: Adaptado de flotación (p,40) por García J. (2003)

### 2.5.10.1 *Minerales Hidrofílicos*

Son susceptibles de ser mojados por el agua, y están formados por óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros compuestos, que usualmente constituyen la mayor parte de los minerales estériles o ganga. Esto provoca que se mojen, permanezcan suspendidos en la pulpa y, finalmente, se hundan.

#### **Figura 8**

##### *Comportamiento Hidrofílico*



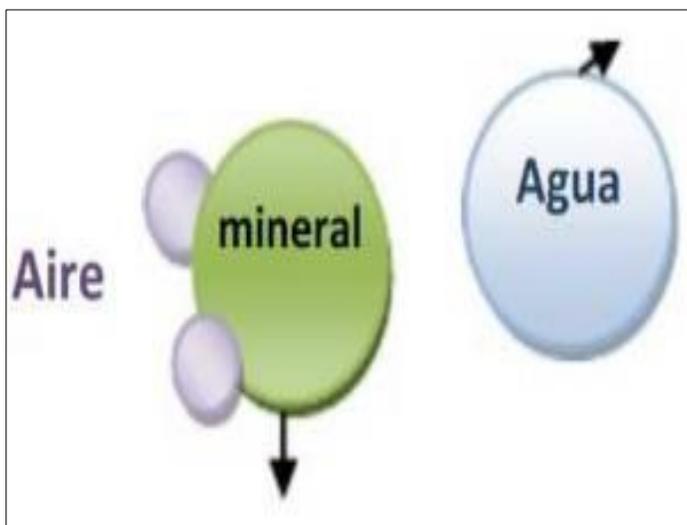
Nota: Adaptado de Manual de operaciones de planta concentradora, Antapacay (2019).

### 2.5.10.2 *Minerales Hidrofóbicos*

También conocido como comportamiento aerofílico o de repulsión, gracias a este comportamiento evita que las partículas minerales lleguen a mojarse, eso hace que las partículas se adhieran a las burbujas de aire y ascienda a la superficie de la pulpa o flotar. (Linares, 2014). En la figura se aprecia el comportamiento hidrofóbico.

**Figura 9**

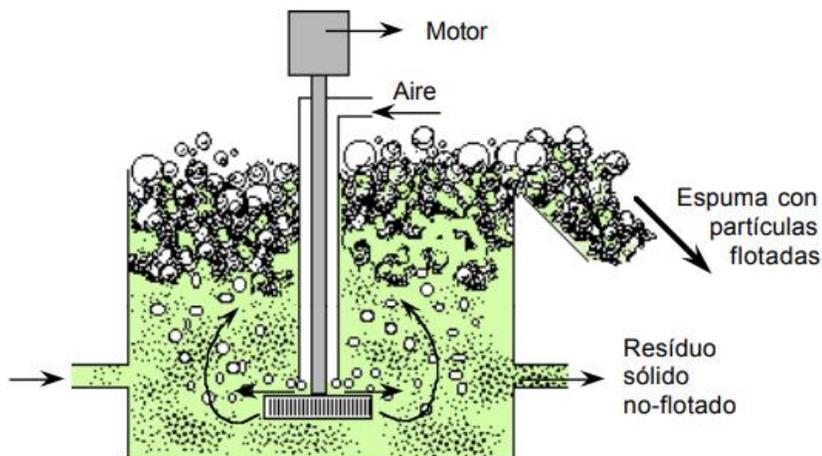
*Comportamiento Hidrofóbico*



Nota: Adaptado de Manual de operaciones de planta concentradora, Antapacay (2019).

### ***2.5.11 Celda por Dispersión de Aire***

Dentro de las celdas por dispersión de aire, el tipo de celda más comúnmente utilizado es el contenedor de forma cilíndrica, el cual está generalmente provisto de deflectores adjunto a sus paredes. En su parte central, se dispone de un sistema de turbulencia o de agitación provista de turbina destinado a crear una corriente o movimiento centrífugo en la mezcla sólido-líquido, generando una zona de baja presión cerca del eje. Se utiliza un tubo concéntrico u otro dispositivo para succionar aire próximo a la zona central del recipiente, el mismo que posteriormente es conducido a la zona de turbulencia y finalmente transformado en burbujas. Con frecuencia, el agitador cuenta con un sistema rotor-estator que funciona mediante impacto y cizallamiento para dividir el aire.

**Figura 10***Celda de Flotación por Dispersión de Aire*

*Nota.* En estos sistemas, se generan burbujas de tamaños que varían entre 0,5 y 2 mm. La altura de la zona de espuma puede ajustarse para permitir un drenaje significativo del líquido, el cual se retorna a la celda o, en el caso de un proceso multietapas, se dirige a la celda anterior. (Salager & Forgiarini, 2007)

**2.5.12 Tipos de Flotación**

Los tipos de flotación son:

- Flotación de espuma
- Flotación por película
- Flotación por aceite

La flotación por espuma actualmente es la más utilizada en nuestro país en el procesamiento de minerales, se puede clasificar en:

- **Flotación Directa:** Es cuando en la espuma se tiene partículas valiosas como concentrado y las partículas no valiosas se encuentran como pulpa en el relave o cola.

- **Flotación Reversa o Inversa:** Es cuando en la espuma se tiene partículas no valiosas como concentrado y las partículas valiosas se encuentra como pulpa en el relave o cola.

- **Flotación Bulk o Colectiva:** “Se produce la separación de varios componentes en dos grupos, de los cuales el concentrado contiene por lo menos dos a más componentes (Conejeros, 2003, p. 24)” cuando se obtiene todos los minerales valiosos en un mismo concentrado y el mineral no valioso se va en el relave o cola.

- **Flotación Diferencial o Selectiva:** Se refiere al proceso en el que se obtiene un solo mineral valioso en el concentrado, es decir, con una mayor concentración, considerando la selectividad como la adsorción del colector sobre la superficie del mineral.

A continuación, en la figura 4 se aprecia un Esquema de una Celda de Flotación Mecánica

#### **2.5.12.1 Fase de Flotación**

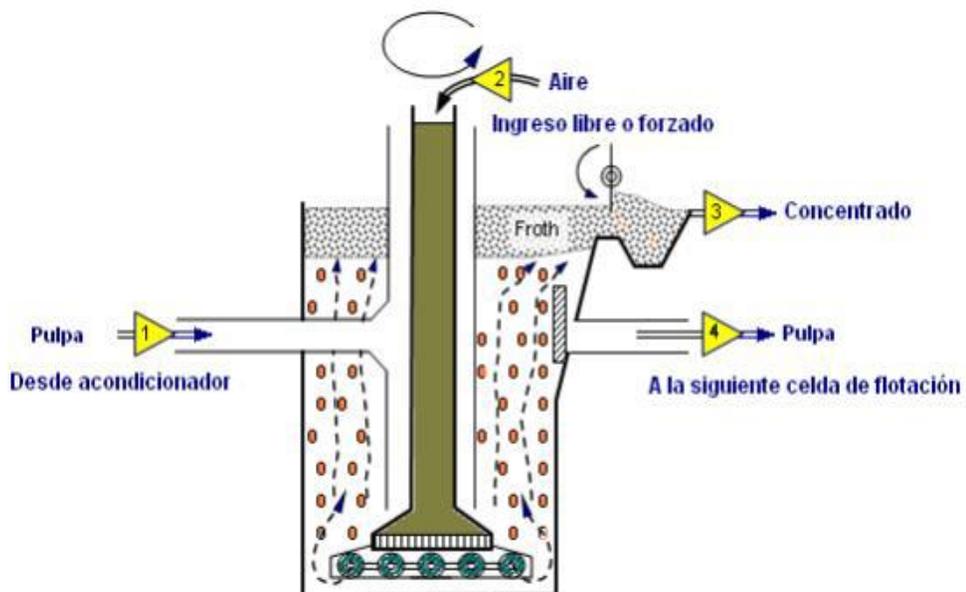
Las fases de la flotación son las siguientes:

- Fase solida: Está constituido por partículas de minerales finamente molido.
- Fase Liquida: Está constituido por agua con reactivos.
- Fase Gaseosa: El aire influye químicamente en el proceso de flotación.

Es el principal medio de transporte de las partículas de minerales hasta la superficie de la pulpa. (Sutulov, 1963)

**Figura 11**

*Esquema de una Celda de Flotación Mecánica*



Nota: Adaptado de Procesamiento de Minerales – Mineralogía II (p,7) por Linares, N. (2014)

### **2.5.13 Clasificación de los Colectores**

Los colectores se pueden clasificar según la capacidad que tienen para disociarse o separarse en condiciones de solución acuosa, así como también lo pueden hacer según la clase de ión que se produce como consecuencia de la reacción o propiedad repelente al agua.

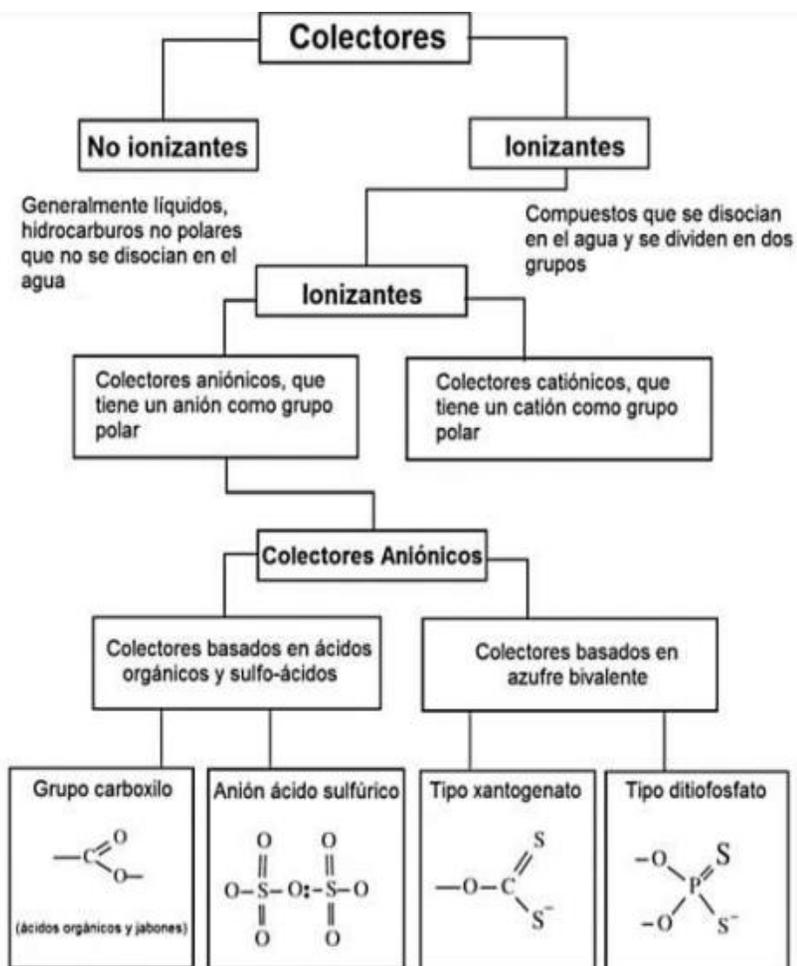
Por lo tanto, se clasifica en dos grupos.

- ✓ Colector ionizantes, caracterizados porque representan los que terminan disociándose en iones.
- ✓ Colectores no ionizantes que, a diferencia del anterior, éstos se caracterizan porque solamente son activos y útiles bajo su forma molecular o química.

A continuación (Ver figura 12), se puede apreciar la clasificación detallada de los tipos de colectores presentes:

Figura 12

## Clasificación de los Colectores



Nota: Adaptado de Procesamiento de Minerales – Mineralogía II (p,39) por Linares, N. (2014)

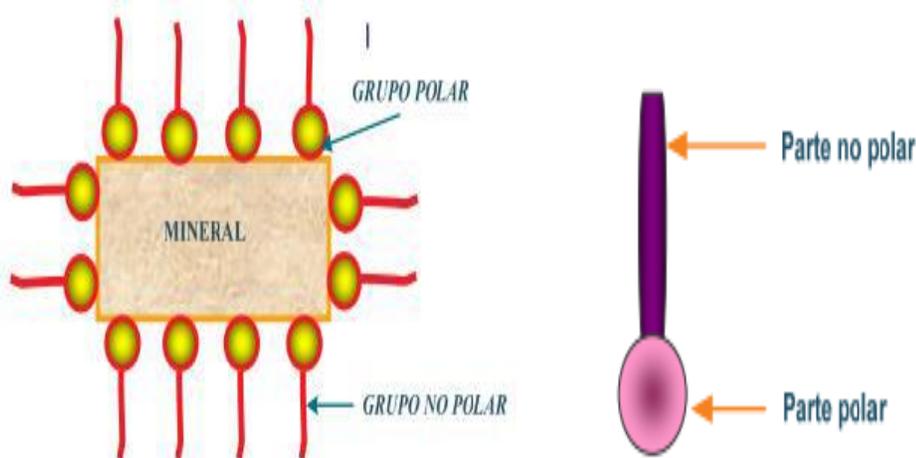
### 2.5.13.1 Colectores

Los colectores son reactivos orgánicos, ya están en forma de iones o moléculas, que se adhieren a la superficie del mineral. Esta adsorción provoca que las partículas se vuelvan hidrofóbicas, lo que favorece la adherencia entre la partícula y la burbuja, reduciendo el tiempo requerido y asegurando la adherencia durante la colisión entre ambas. Los colectores se clasifican en aniónicos y catiónicos (Kelly & Spottiswood, 1990).

La mayoría de los minerales se caracterizan por ser de naturaleza hidrofílica, lo que complica su separación en una celda de flotación. Para separarlos, es necesario modificar selectivamente su superficie, haciéndola hidrofóbica. Esto se consigue agregando reactivos colectores que transforman la superficie del mineral en hidrofóbica o que se adhieren al mineral a través de su parte polar, dejando la parte apolar expuesta para que pueda unirse a las burbujas de aire. Para que los minerales floten, es necesario impartirles cierta calidad de hidrofobicidad, lo que se consigue agregando surfactantes a la pulpa. Estos reactivos, conocidos como colectores, requieren un tiempo de adsorción durante la agitación, el cual se denomina periodo de acondicionamiento (Astucuri, 1994).

### Figura 13

#### *Hidrofobicidad de una Partícula*



Nota: Adaptado de Procesamiento de Minerales – Mineralogía II (p,38) por Linares, N. (2014)

#### **2.5.13.1.1 Colector Xantato Amilico de Potasio (z - 6)**

Este xantato es el colector más selectivo para minerales sulfurados con presencia de óxidos, por lo que se utiliza comúnmente en operaciones de flotación que requieren un alto poder colector. Es particularmente adecuado porque facilita el flote no solamente de material constituido en base a sulfuros de cobre oxidados o manchados, sino también de minerales de plomo (con NaS).

También juega un rol de mucha importancia en el tratamiento de otras sustancias como la arsenopirita, pirrotita, sulfuros de cobalto, níquel y sulfuros de hierro provistos de otros minerales como oro. También se emplea como promotor secundario en la flotación agotativa que sigue a una flotación "bulk", donde se utiliza un promotor más selectivo (Bravo, 2004).

#### **2.5.13.1.2    *Colector Ap -4037***

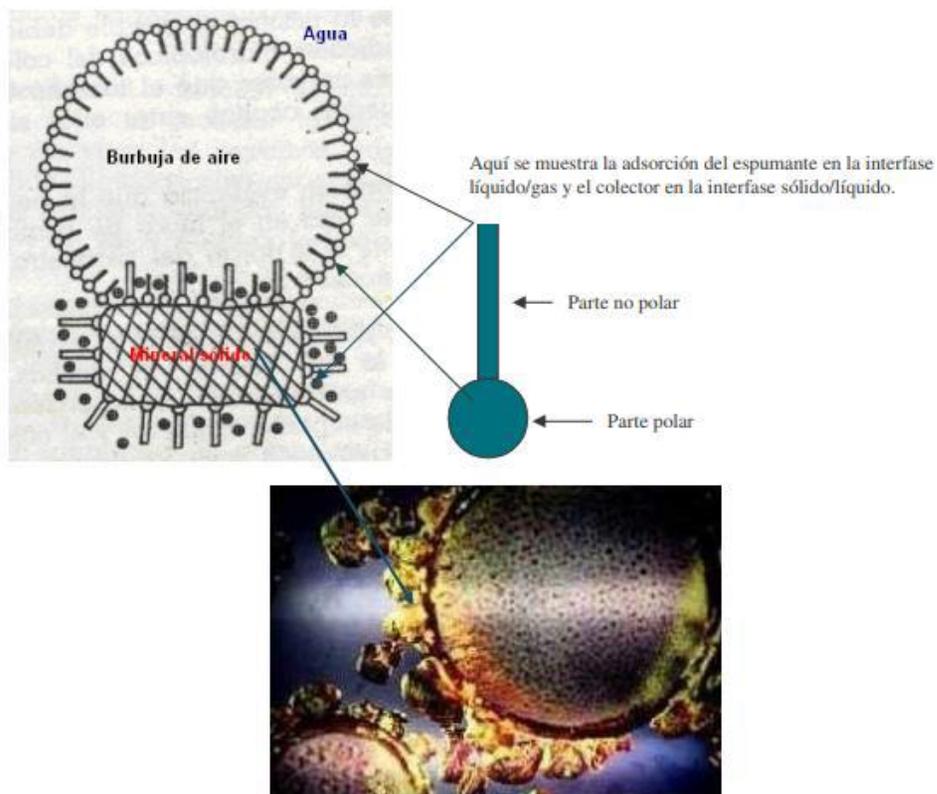
Es una sustancia orgánica de una mezcla muy especial de Tiofosfato Tionocarbonato modificado, hidróxido de sodio. Es un colector secundario aceitoso que ayuda a la activación y en el mejoramiento de su flotabilidad

#### **2.5.14 *Espumante***

Los espumantes son agentes tensoactivos o surfactantes que constan de una parte polar (hidrofílica) y una parte apolar (hidrofóbica). El comportamiento ideal de un espumante se da completamente en la fase líquida, sin llegar a tener compromiso de las características externas del mineral. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, por las propiedades del espumante se genera una asociación e interacción de éste con el mineral y/o presencia de otros reactivos. La elección de un espumante apropiado para una mena particular solo es posible después de llevar a cabo un exhaustivo proceso de pruebas. En la flotación de minerales sulfurados, es habitual utilizar al menos dos espumantes y varios colectores (Astucuri, 1994).

**Figura 14**

*Esquema de Adsorción de Espumante en una Burbuja de Aire*



Nota: Adaptado de Procesamiento de Minerales – Mineralogía II (p,51) por Linares, N. (2014)

### **2.5.14.1 Reguladores**

Los reguladores denominados también modificadores son compuestos que ayudan a mejorar la adhesión de los colectores en la superficie del mineral, ya sea aumentando o disminuyendo el efecto repelente al agua sobre dicha superficie, lo que permite hacer más selectiva la acción del colector hacia ciertos minerales. Los reguladores se pueden clasificar en activantes, depresores o modificadores del pH (Wills & Napier-Munn, 2006).

#### **2.5.14.1.1 Cal**

Desde el punto de vista práctico, es muy común el uso de las presentaciones químicas siguientes, cal cáustica (CaO) y cal hidratada (Ca (OH)<sub>2</sub>). El hidróxido de calcio (Ca (OH)<sub>2</sub>) por

otro lado a diferencia de los otros se clasifica como una base fuerte por su naturaleza química. Con la cal pueden ser obtenidas soluciones acuosas con una concentración del 0.17% en peso a 25° C. Las soluciones de cal generalmente se denominan agua de cal y las suspensiones acuosas, lechada de cal (Bravo, 2004)

#### **2.5.14.2      *Activadores.***

Los activadores son considerados reactivos con propiedades de alterar la composición química y propiedades físicas de los minerales, haciendo que adquieran características hidrofóbicas y favoreciendo así la acción de carácter colector. Estos reactivos generalmente suelen ser sales fácilmente solubles con propiedades de disociación en solución formando iones que interactúan directamente por sobre las propiedades físicas del mineral, es decir sobre superficie. La flotabilidad puede mejorarse utilizando grandes cantidades de xantatos de cadena larga, pero un enfoque más efectivo es el uso de sulfato de cobre como activador, que se disuelve rápidamente y se disocia en iones de cobre en la solución (Bravo, 2004).

##### **2.5.14.2.1      *Sulfato de Cobre $CuSO_4$***

El  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ , denominado según su nomenclatura química como sulfato de cobre pentahidratado, toma importancia porque forma cristales azules brillantes, morfológicamente asimétricos del sistema triclinico, se estima que su densidad oscila entre 2.28 g/ml. Es un activador eficaz para minerales como la esfalerita, pirita, calcopirita, pirotita, arsenopirita y cuarzo. La materia prima utilizada para la fabricación de sulfato de cobre incluye ácido sulfúrico y cobre en forma de chatarra y desechos provenientes de la industria metalúrgica o de productos metalúrgicos semielaborados (Bravo, 2004).

### 2.5.14.3 *Depresores*

Los depresores juegan un rol muy importante porque se emplean para mejorar la selectividad en la flotación al convertir ciertos minerales en hidrofílicos (con afinidad por el agua), lo que impide su flotación. Estos reactivos tienen un efecto contrario al de los colectores, ya que se usan para evitar la adhesión de minerales no deseados, como la pirita, que es común en los minerales metálicos, o de otros metales que no se desean recuperar.

Existen diversos tipos de depresores con acciones complejas y variadas, las cuales en muchos casos son poco comprendidas, lo que dificulta su control en comparación con otros reactivos.

Reguladores o modificadores de pH:

Que alteran la alcalinidad del medio (Bravo, 2004)

### 2.5.15 *Circuitos de Flotación y Equipos*

En el circuito de flotación existen tres tipos de máquinas:

- Rougher (Desbastadora)
- Cleaner (Limpiadora)
- Scavenger (Agitador)

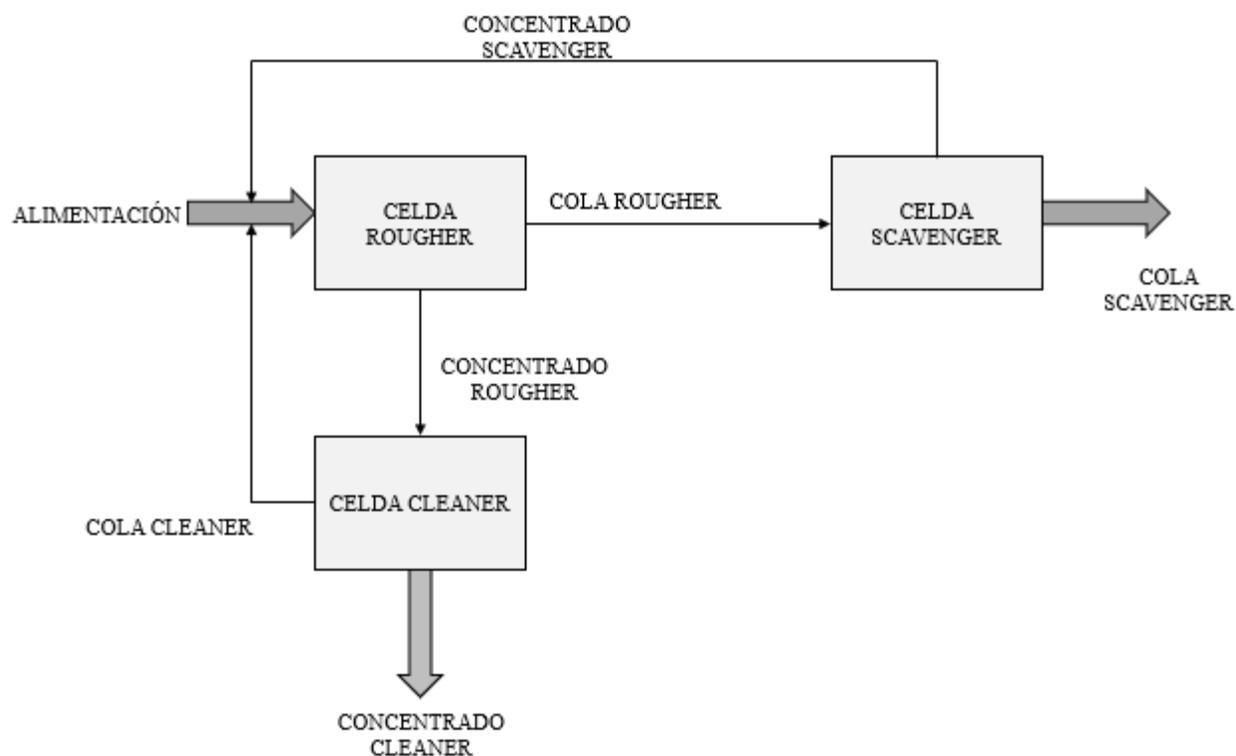
• **Circuito de Flotación Rougher:** La flotación rougher es la etapa inicial del proceso, donde la celda recibe la pulpa que proviene del acondicionador o molino, y en la cual la mayoría de los sulfuros valiosos flotan. En este circuito se obtienen concentrados y relaves "provisionales". Los relaves generados en esta fase se envían al circuito de flotación scavenger, mientras que las espumas producidas en la flotación rougher son dirigidas al circuito de cleaner.

- **Circuito de Flotación Cleaner:** Este circuito es empleado para depurar lo máximo posible de impurezas presentes en las espumas que provienen de la flotación rougher, y que al final produce un concentrado limpio.

- **Circuito de Flotación Scavenger (Agitador):** Esta celda recupera partes valiosas que celda Rougher no han recuperado. Este circuito recibe como carga el relave de la Rougher, en esta etapa se extrae el resto de los sulfuros que no llegaron a flotar en la Rougher, debido a la falta de tiempo, deficiencia de reactivos o por efectos mecánicos. Las espumas obtenidas en este circuito retornan nuevamente a la primera etapa de Rougher. (Bravo, 2010, pág. 21)

**Figura 15**

*Representación del Circuito de Flotación*



Nota: Circuito de flotación de las celdas de Rougher, Scavenger y Cleaner. (Astucuri, 1994)

## CAPÍTULO III

### HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1 Hipótesis

##### 3.1.1 *Hipótesis General*

Al realizar una caracterización Geoquímica, fisicoquímica y metalúrgica de la zona Constanza nos ayuda a predecir el comportamiento metalúrgico con respecto a las operaciones unitarias de gravimetría y flotación obteniendo una mayor recuperación.

##### 3.1.2 *Hipótesis Específico*

- Se logra conocer las características microscópicas, Geoquímicas y fisicoquímicas a detalle del mineral de la zona Constanza
- Al incrementar el % de liberación del mineral durante el proceso metalúrgico de gravimetría se logrará recuperar oro en primera instancia a partir del mineral.
- Al incrementar la dosificación de sulfato de cobre y aumentar el % liberación del mineral en el proceso metalúrgico de flotación permitirá recuperar oro a partir del relave gravimétrico.

#### 3.2 Variables

##### 3.2.1 *Identificación de Variables*

###### 3.2.1.1 *Variable Dependiente (YI)*

Las variables a considerarse en la primera etapa, que es la gravimetría:

Recuperación de oro

###### 3.2.1.2 *Variables Independientes(XI)*

- Presión de agua (psi)
- Frecuencia (Hz)

- Granulometría (um)

### ***3.2.1.3 Variables Intervinientes Controladas***

- Características mineralógicas
- GE

### ***3.2.1.4 Variable Dependiente (Y2)***

- Las variables a considerarse en la segunda etapa, que es la flotación:  
Recuperación de oro

### ***3.2.1.5 Variables Independientes(X2)***

- Dosificación de reactivos:
  - ✓ Sulfato de Cobre
  - ✓ Z-6
  - ✓ AP-4037
  - ✓ Granulometría

### ***3.2.1.6 Variables Intervinientes Controladas***

- Características mineralógicas
- GE
- Temperatura

### 3.2.2 Operacionalización de Variables e Indicadores

**Tabla 3**  
*Operacionalización de Variables e Indicadores*

VARIABLES		DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSION	RANG O	UNID ADES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOD E MEDICION
DEPENDIENTE N°1	RECUPERACION GRAVIMETRICO	Es la cantidad de oro obtenida en el concentrado respecto a la cantidad de oro presente en el mineral de cabeza, expresada en porcentaje.	Realizar los ensayos controlando las variables mediante el proceso de concentrador gravimétrico Falcon SB-40 a través de pruebas experimentales a nivel de laboratorio para recuperar de oro.	Porcentaje (%)	25-30	%	Calculo por balance metalúrgico (LEYES)
INDEPENDIENTES	PRESION DE AGUA	Es la fuerza por unidad de área con que ingresa el agua por los agujeros del anillo hacia la parte interior del cono de concentración.	La presión del agua ayuda en la separación de las partículas más densos realizando un lecho fluidizante y haciendo que rebose las partículas no valiosas, esta medición se realiza en el manómetro	presión	3-5	psi	manómetro
	FRECUENCIA	Frecuencia de rotación del cono concentrador son las revoluciones por minuto con las que gira el cono concentrador.	las partículas comienzan a estratificarse de acuerdo a la gravedad específica, bajo la influencia de un inmenso campo de gravedad centrípeta, la medición se realiza en el tablero de control	Hertz	70-80	Hz	Tablero digital de la falcon sb40
	GRANULOMETRIA	Es la distribución por tamaños de las partículas de un mineral que pasa por una serie de tamices	adquiere gran importancia dado que el concentrador falcon sb40 requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado para su concentración. Se determina mediante el juego de mallas se realiza el análisis granulométrico para determinar el P80	Distribución de tamaño	50% - 60% - m200	um	Tamices o mallas sistema Tyler
DEPENDIENTE N°2	RECUPERACION EN FLOTACION	Es la cantidad de oro obtenida en el concentrado respecto a la cantidad de oro presente en el mineral de cabeza, expresada en porcentaje.	Es la cantidad del mineral valioso presentes en el concentrado de flotación obteniéndose mediante el proceso fisicoquímico de flotación por espumas.	Porcentaje (%)	60-65	%	Calculo por balance metalúrgico(LEYES)
INDEPENDIENTES	GRANULOMETRIA	Es la distribución por tamaños de las partículas de un mineral que pasa por una serie de tamices	adquiere gran importancia dado que el proceso de flotación requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado para su concentración. Se determina mediante el juego de mallas se realiza el análisis granulométrico para determinar el P80	Distribución de tamaño	80% - 90% - m200	um	Tamices o mallas sistema Tyler
	Sulfato de Cobre	Es un sólido cristalino, un compuesto inorgánico con la fórmula química $CuSO_4(H_2O)_x$	Mediante esta sustancia el mineral de oro es activado. El sulfato de cobre ayuda la recuperación de oro libre, particularmente de oro empañado o fino. se establece la cantidad adecuada de reactivos en gramos por tonelada. Y se dosifica.	concentración	35-40	gr/tn	micropipeta
	Colector Z-6	Xantato Amilico de Potasio es una sustancia química que se usa como reactivo de flotación en la industria de minería para la extracción de minerales de gran valor	Es un colector primario que colecta a minerales auríferos y que ayuda en su flotabilidad. se establece la cantidad adecuada de reactivos en gramos por tonelada. Y se dosifica.	concentración	18-24	gr/tn	micropipeta
	Colector AP-4037	Sustancia química organica de una mezcla especial de tiosofato, Tionocarbamato modificado, Hidróxido de sodio	Es un colector secundario aceitoso que ayuda la activación y mejorando su flotabilidad. se establece la cantidad adecuada de reactivos en gramos por tonelada. la dosificación es por número de gotas para el poseso de flotación	concentración	71-76	gr/tn	micropipeta

## CAPÍTULO IV

### METODOLOGÍA

#### **4.1 Diseño de Investigación**

En la presente tesis la investigación realizada es experimental, porque utiliza los experimentos y los principios encontrados en el método científico, es decir aplican los conocimientos existentes de la caracterización del mineral, procesos de gravimetría y flotación, y estos son aplicados para solucionar los problemas en la recuperación de oro en minerales auríferos. La investigación también es cuantitativa y deductiva, porque se realizaron la manipulación, análisis e interpretación de las variables independientes y dependientes en cada prueba, tomando como base las teorías basadas en la problemática de la presente investigación.

##### **4.1.1 Método**

El método es experimental-analítico porque implica controlar las condiciones bajo las cuales ocurre un determinado fenómeno o proceso por los efectos producidos de la manipulación de sus variables independientes, en el proceso de gravimetría y flotación para la recuperación de oro

##### **4.1.2 Tipo**

El estudio corresponde al tipo de investigación correlativa-experimental aplicada de carácter tecnológico, en razón de que esta puede partir de conocimiento teórico para transformarlo en conocimientos prácticos para analizar la caracterización del mineral aurífero y las pruebas unitarias de gravimetría y flotación. (Hernandez Sampiere, 2014)

### **4.1.3 Alcance**

#### **4.1.3.1 Descriptivo**

Esta investigación describe la recuperación de oro en secuencias partiendo de una caracterización minuciosa del mineral aurífero y su preconcentración mediante el proceso de gravimetría y finalizando mediante un proceso de flotación.

#### **4.1.3.2 Analítico**

Porque se analizará la recuperación de oro en los procesos unitarios de gravimetría y flotación independientemente

#### **4.1.3.3 Explicativo**

La investigación intenta explicar el comportamiento del mineral mediante los procesos de gravimetría y flotación en la recuperación de oro.

## **4.2 Población de Estudio**

### **4.2.1 Unidad de Análisis**

En la presente investigación la unidad de análisis se efectuará en la zona Constanza en el distrito de Untuca, Provincia de Sandia, Departamento de Puno, donde se desarrolla y recopila toda la información utilizada para la presente investigación de gravimetría y posteriormente en el laboratorio de concentración de minerales en la escuela profesional de Ing. Metalúrgica UNSAAC. El relave gravimétrico para el proceso final de flotación.

#### **4.2.1.1 Población**

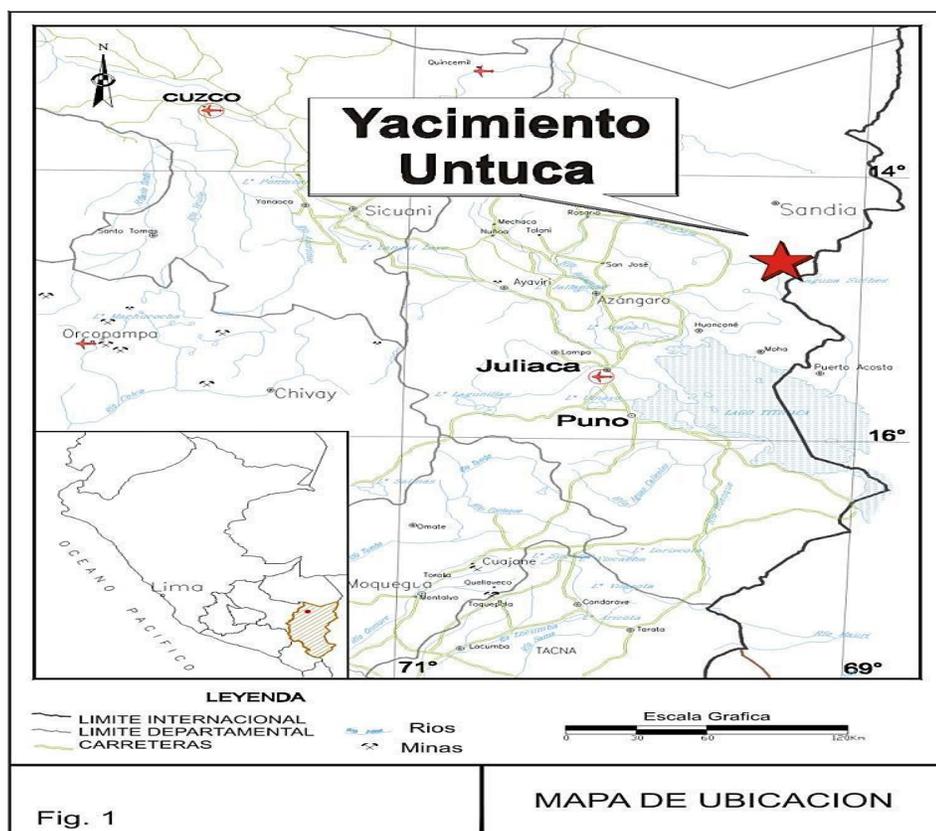
Durante el cartografiado geológico a escala 1:100,000 de las hojas de Sandia y La Rinconada realizadas por INGEMMET en 1996, donde se efectuaron trabajos de estratigrafía, geología estructural y sus relaciones con los yacimientos orogénicos de la región, y asimismo

prospecciones de tipo Brownfield de la mina Untuca por parte de Consorcio Minero Horizonte S.A (CMH) se presenta esta contribución teniendo como objetivo conocer con más detalle los aspectos estratigráficos y estructurales de la mina Untuca.

El yacimiento Untuca se encuentra en la Cordillera Oriental del sur de Perú compuesta por secuencias de cuarcitas y pizarras del Paleozoico inferior (Fig. 16). El Grupo San José fue definido por Laubacher, G. (1978), en la localidad de San José en Sandia.

**Figura 16**

*Mapa del yacimiento Untuca- sandia*



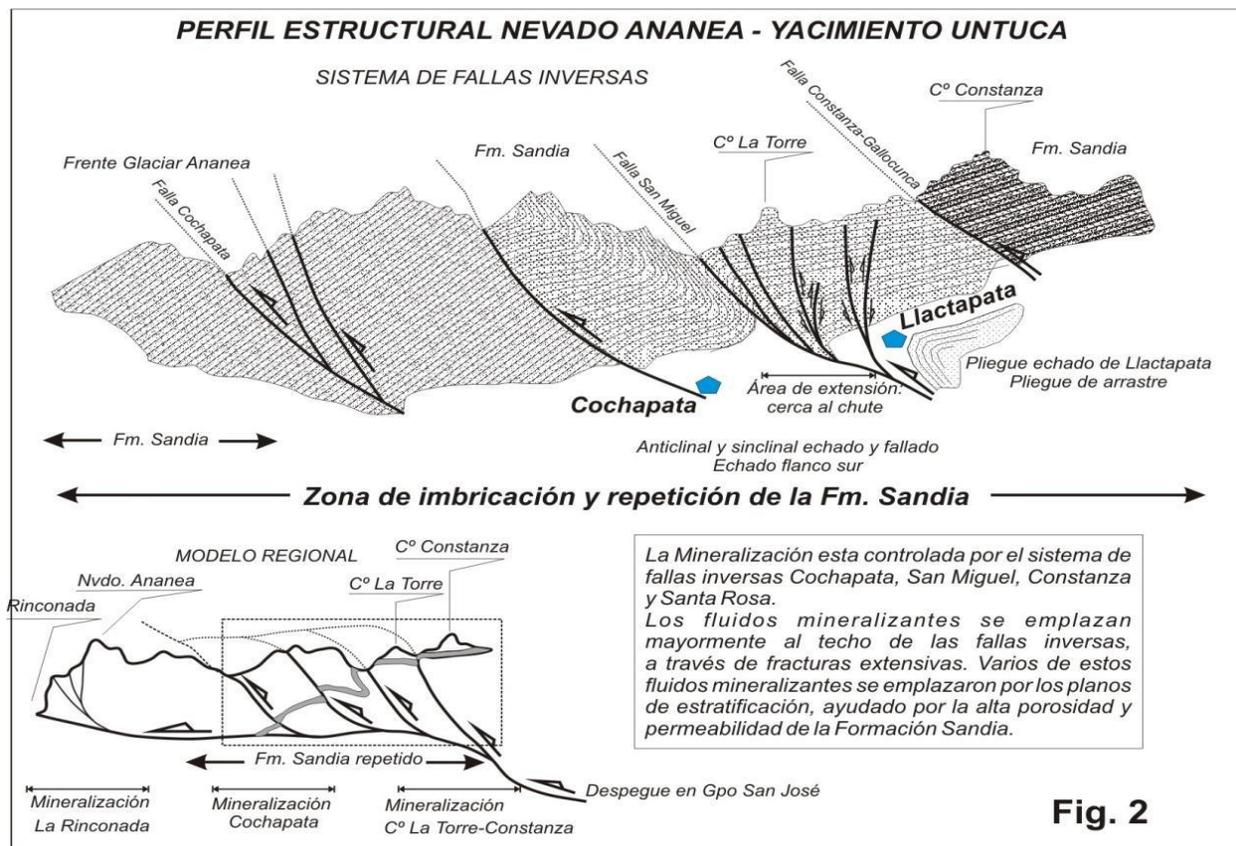
*Nota:* Los yacimientos de la zona estudiada en especial Untuca están caracterizados por vetas con cuarzo y sulfuros que se encuentran asociadas a fallas inversas y normales en cuyas ramificaciones laterales se encuentran los mayores valores auríferos.

#### **4.2.1.1.1** Falla Constanza

Esta falla se ubica en el cerro Constanza, es una falla inversa longitudinal de primer orden. Tiene un rumbo promedio de N10°O/40°NE. Muestra planos de falla y estructuras sigmoides típicas de una falla inversa, el grosor de la estructura varía de 1 a 1.5 m, presenta mineralización de cuarzo lechoso y sulfuros de hierro, generalmente pirita y arsenopirita. La mineralización asociada contiene valores auríferos.

Figura 17

Perfil estructural nevado Ananea- yacimiento Untuca



*Nota:* La población de estudio de la presente investigación es el mineral de cabeza, extraído de la corteza terrestre y proporcionado por área de geología de la zona de Constanza queda en el Distrito de Untuca, Provincia de Sandia, Departamento de Puno. Los estudios de la investigación, ensayos químicos y pruebas metalúrgicas se realizarán en el área de laboratorio metalúrgico en la empresa CORI PUNO SAC y el laboratorio de concentración de minerales en la escuela profesional de Ing. Metalúrgica UNSAAC.

#### ***4.2.1.2 Tamaño de Muestra***

En la presente investigación, la cantidad estimada de las muestras para los estudios correspondientes fue de 150 kg, ya que se utilizará para la caracterización mineralógica mediante los ensayos mineralógicos por microscopia óptica de luz reflejada y ensayo por microscopia electrónica de barrido, caracterización geoquímica donde se determinaron los tenores de oro de cada una de las muestras, esto se realizó por las técnicas de ensayo al fuego convencional, caracterización fisicoquímica debido a que los procesos metalúrgicos extractivos requieren del manejo de pulpas, es necesario determinar algunas características fisicoquímicas del mineral tales como: Densidad, nivel de acidez, dureza del mineral, gravedad específica, y caracterización metalúrgica con el fin de predecir el comportamiento metalúrgico del mineral frente a los procesos de beneficio y extracción, se realizaron los siguientes ensayos: distribución de oro por fracciones granulométricas (análisis granulométrico), determinación del Work index, determinación de la curva de moliendabilidad, realización de la prueba de gravimetría, determinación de cinética de flotación, prueba de flotación.

#### ***4.2.1.3 Validez y Confiabilidad de Instrumentos.***

Para la recolección de datos se usarán los instrumentos y equipos que se ajustan a la necesidad de la investigación. El trabajo de investigación realizado es validado y es altamente confiable porque trabajamos con la muestra extraído y proporcionada por parte del área de geología de UMU e investigada en el laboratorio metalúrgico de la unidad minera cori puno SAC. Y también en laboratorio de concentración de minerales en la escuela profesional de Ing. Metalúrgica UNSAAC 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.

#### ***4.2.1.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos***

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

#### ***4.2.2 Equipos e Instrumentos***

##### ***4.2.2.1 Equipos Usados***

Los equipos utilizados para la preparación mecánica del mineral sulfurado, hasta tener una granulometría y liberación requerido para la caracterización y evaluación en los procesos de gravimetría y flotación:

- Chancadora de quijada

La chancadora de mandíbulas o JAW CRUSHER, con tamaño de 8"x10" (pulgadas) sirve como la primera etapa de reducir tamaños hasta de 3", donde se alimenta mineral de tamaños hasta de 3" donde se obtiene productos del tamaño promedio de ½" a 3/8" como alimentación a la siguiente operación.

- Chancadora de rodillos

La chancadora de rodillos de laboratorio de 8", usado para reducir el tamaño como chancado secundario del mineral, dimensiones del Rodillo (Diam x Largo) 200 x 150, Superficie del Rodillo es Lisa, Máximo tamaño alimentado 30 mm, Producto final <1 mm Razón de reducción 4 a 1, Velocidad del Rodillo 380 rpm, Potencia 1.1 kw (3x400V/50Hz)

- Molino de bolas

El Molino de Bolas Estándar es un cilindro de acero ASTM A36 o Inoxidable con tapa superior con sistema de tranca, con sello de anillo de goma para evitar filtraciones. El molino de bolas utilizado para la reducción de tamaños en la etapa final, con medidas en el orden de pulgadas de 8" x 10" (diámetro x longitud)

- Máquina de Flotación de Laboratorio Denver Modelo D12

Tiene un mecanismo de flotación de tipo suspendido para subir y bajar, incluye tubo vertical de acero inoxidable con válvula de control de aire, una variedad de tanques de diferentes tamaños, impulsores y difusores, es una unidad completa de laboratorio para pruebas de flotación y desbaste por burbujeo.

La máquina accionada a motor incluye un motor monofásico de 1/2 HP que funciona tanto con corriente de 110 V como de 220 V, 50 Hz o 60 Hz, una transmisión con correa en V con inversor de frecuencia digital, cable y enchufe, interruptor de palanca, pantalla digital de RPM, y

protección del motor. El D12 ahora lleva la marca CE. Incluye tanques para realizar pruebas de flotación con 2,000 gramos.

- Concentrador gravimétrico FALCON modelo ICON LB-40

El concentrador Falcon LB-40 está diseñado para recuperar partículas muy finas (hasta 50 micrones), esto puede ser posible únicamente con el uso de baja presión de agua de fluidización del concentrado y con una alta fuerza de gravedad hacia el exterior.

- Pulverizador

De Marca y serie B160 PULVERIZER MFD BY BICO INC, empleado para reducir a tamaños requeridos para la operación siguiente, tamaños que oscilan a  $<75\mu$ .

- TAMIZADORA WS TYLER ROTAP RX-29-16

Es un equipo de agitador de tamices rotap (agitador de tamices de 8 pulgadas 230V/60HZ).

Marca: Tyler, Modelo: RX29 Digital. Se utiliza para usarse con tamices de 8 "(200 mm). Para mallas de acero inoxidable y laton.

- Tamices

De serie Ws TYLER, Denominado como tamices desde malla N°10 hasta la malla N°400, utilizado para un análisis de la distribución granulométrico del mineral, con fines de investigación

- Horno de secado

Horno de secado de laboratorio de marca LM-HAD 5000, también denominada como desecadora, empleado para extraer la humedad de distintas muestras de minerales se caracteriza por su rango de temperatura de trabajo de 20 a 250°C.

- pH metro

METTLER TOLEDO, se empleó este pH metro en la cuantificación de acides o alcalinidad en las soluciones, antes, durante y después del proceso, garantizando gran precisión en cada etapa.

- Cuarteador

Marca JONES, fabricado de acero inoxidable de 24 canales de dos niveles con una abertura ½” utilizado para realizar un muestreo de minerales y obtener una muestra representativa y homogénea posteriormente para realizar el proceso de conminución.

- Balanza

BALANZA MARCY de Marca Metso, instrumento de medición para determinar la densidad y la gravedad específica de pulpas, líquidos y sólidos secos. Esta balanza está estructurada por un reloj, seguida de un contenedor con capacidad de 1000 ml y 715 CC. y con una precisión de 0.01 ml.

#### ***4.2.2.2 Instrumentos de Laboratorio***

- Vasos precipitados (25, 100, 250 mL)
- Fiola (25, 100, 200 mL)
- Pizeta (1L)
- Bagueta
- Probetas (50 mL 1000mL.)
- 16 bandejas grandes.
- 24 baldes de plástico de 20 litros.
- Espátulas
- 100 bolsas 11x23cm

#### ***4.2.2.3 Reactivos***

- Reactivos para el desarrollo experimental
  - Sulfato de Cobre
  - Xantato Amílico de Potasio Z-6
  - Colector AP-4037
  - Agua destilada

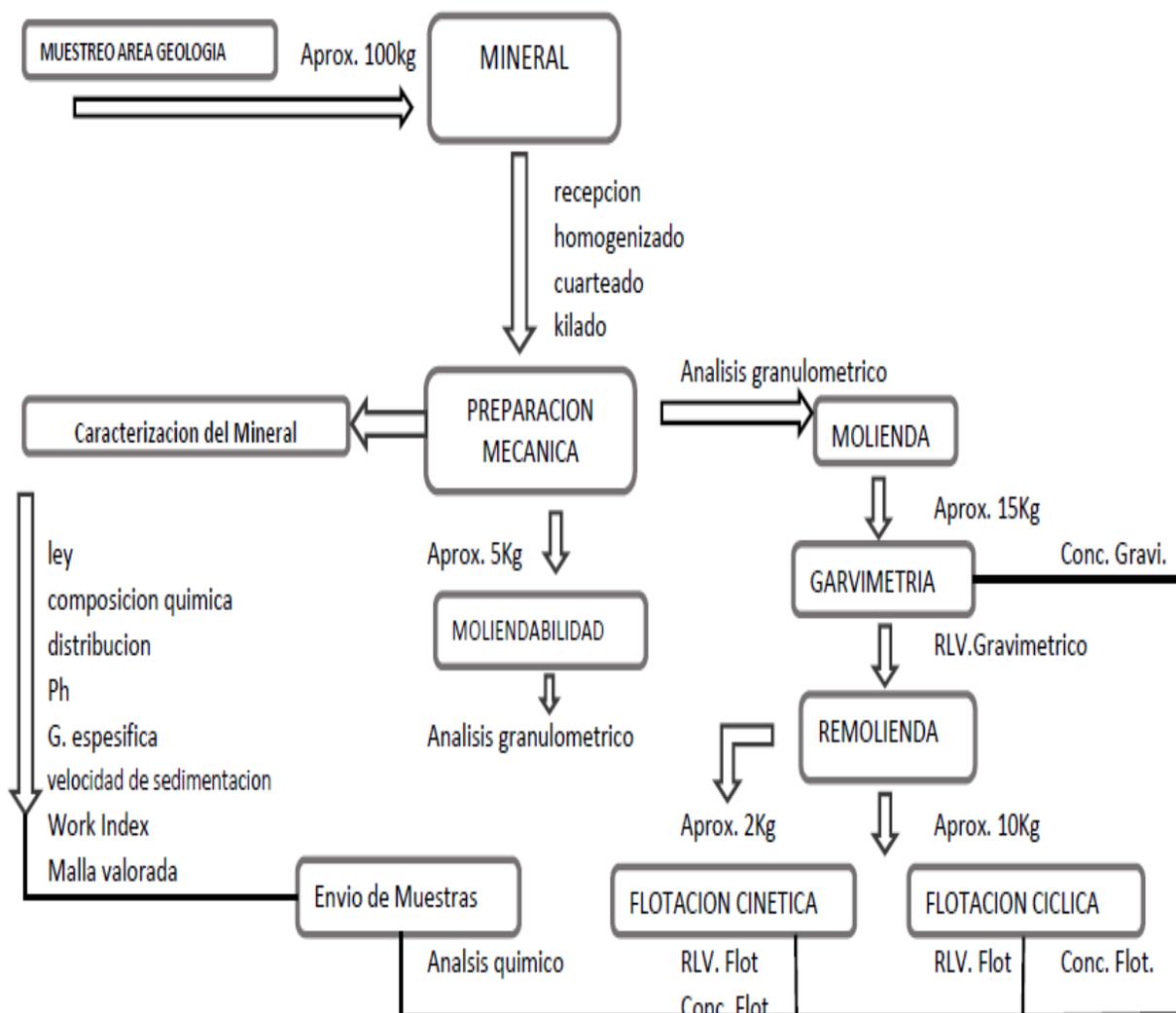
## CAPÍTULO V

## DESARROLLO EXPERIMENTAL I

## 5.1 Diagrama de Flujo del Procedimiento Experimental

Figura 18

Diagrama de Flujo del Procedimiento Experimental



Nota: Elaboración propia

## **5.2 Preparación Mecánica de Muestra**

### **5.2.1 Operación de Chancado Primario (*chancadora de quijadas*)**

El mineral proporcionada aproximadamente de 150 kg, con tamaño inicial entre de 2" a 3" , fue sometido a la reducción de tamaño hasta el orden de 1/2" a 3/8" como producto saliente.

### **5.2.2 Operación de Chancado Secundario (*Chancadora de rodillos*)**

El mineral ya fracturado como producto del chancado primario, fue sometido a una chancadora de rodillos para ser la reducción más diminuta por acción continua, obteniéndose productos de descarga posterior a eso fue tamizado a 100% malla -10. El mineral producto de esta operación fue homogenizado, cuarteado en un cuarteador de Rifles y quildeado en bolas de 1kg.

## **5.3 Operación de Molienda**

El mineral ya con tratamiento mecánico previo, fue sometido a la operación molienda en húmedo, con el propósito de determinar la curva de moliendabilidad para conocer los tiempos de molienda para las pruebas unitarias de gravimetría y posterior a la prueba de flotación.

## **5.4 Caracterización Mineralógica**

### **5.4.1 Tipo de Yacimiento**

Los yacimientos de la zona estudiada en especial Untuca están caracterizados por vetas con cuarzo y sulfuros que se encuentran asociadas a fallas inversas y normales en cuyas ramificaciones laterales se encuentran los mayores valores auríferos. El yacimiento es de características orogénicas siendo producto de la tectónica herciniana que permitió el emplazamiento de niveles auríferos en fallas de compresión regional. Estas fallas normales

fueron el conducto regular por donde se emplazó los sistemas sulfurados, posteriormente estas fallas normales (con mineralización aurífera) se comportaron como inversas producto de la tectónica compresiva hercínica, aprovechando los planos de debilidad heredados de la tectónica extensiva. (Martinez & Vera, 2016)

#### **5.4.2 Ensayo Mineralógico por Microscopía Óptica y Barrido de Electrones**

Se seleccionaron muestras para preparar secciones delgadas pulidas, las cuales fueron analizadas por medio de microscopía óptica de luz reflejada y microscopía electrónica de barrido (MEB). Cada una de las secciones delgadas pulidas fue observada de forma detallada de modo que se recorrió cada muestra con el objeto de identificar las fases minerales presentes y contabilizar cada grano con contenidos de metales preciosos.

Las muestras fueron enviadas y codificadas con LB-21-001 a 100% malla -10ty y LB-21-002 a 80% malla 200ty, se sometieron a los ensayos por microscopía óptica de luz reflejada, preparando la muestra de acuerdo al tamaño. La muestra gruesa, se preparó en una sección delgada pulida, permitiendo realizar visualizaciones tanto en luz transmitida como en luz reflejada (sección con dimensiones de 20mmx30mm). La muestra fina se preparó en una sección pulida, briqueta de 25mm de diámetro, para visualizaciones en luz reflejada. La preparación de la briqueta fue con resina en caliente y a presión que determinaron los porcentajes estimados de los granos, tanto libres como intercrecidos de manera dimensional (estado de liberación y asociaciones de los minerales de oro), (Bizalab, 2021). Los ensayos mencionados, fueron realizados en Bizalab S.A.C. con RUC: 20600667280, ubicado en la Victoria – Lima.

### 5.4.3 Composición Mineralógica del Mineral de Cabeza

En los ensayos mineralógicos por microscopía óptica de luz reflejada se determinan los porcentajes estimados de los granos, tanto libres como intercrecidos de manera dimensional. Además, se identificaron las especies de minerales presentes y se caracterizaron las texturas de sus intercrecimientos. Al ser una microscopía de luz reflejada para una sección pulida, los minerales no metálicos se catalogarán como gangas (GGs). La catalogación “traza” alude a aquellos minerales libres o intercrecimientos identificados por debajo del 1% dimensional en la sección pulida de ensayo. El objetivo del informe preliminar es concluir respecto al estado de liberación y asociaciones de los minerales de auríferos.

**Tabla 4**

#### *Simbología*

NOMBRE	ABREVIATURA	FORMULA
Oro nativo	Au	(Au,Ag)
Esfalerita	ef	ZnS
Gangas	GGs	Composición variada
Lollingita	lol	FeAs <sub>2</sub>
Galena	gn	PbS
Goethita	goe	Composición variada
Pirita	py	FeS <sub>2</sub>
Pirrotita	po	Fe(1-x)S
Producto intermedio	PI	FeS <sub>2</sub> *Fe(1-x)S
Sulfosal de plomo y antimonio	SFSs_Pb-Sb	Composición variada

*Fuente:* (Bizalab, 2021)

El oro nativo se encuentra asociado a arsenopirita, presentando una liberación del 0%. Las asociaciones del oro nativo son de tipo incluidos/ocuidos, seguido de tipo lateral. Los tamaños del oro nativo en los Inter crecimientos son inferiores a los 13 micrones (Tabla 5).

- Los sulfuros primarios presentes son Pirrotita, lollinguita y Arsenopirita
- La ocurrencia del oro se encuentra en la estructura cristalina de la Arsenopirita y pirita.
- El tamaño partícula del oro electrum se encuentran menores a 13 Micras en la

Arsenopirita y cuarzo, mientras que el Oro también se encuentra presente estibina (AuSb) no mayor a 13 micras en la Arsenopirita, En la Arsenopirita el porcentaje de peso atómico es de 0.44 Wt % de oro.

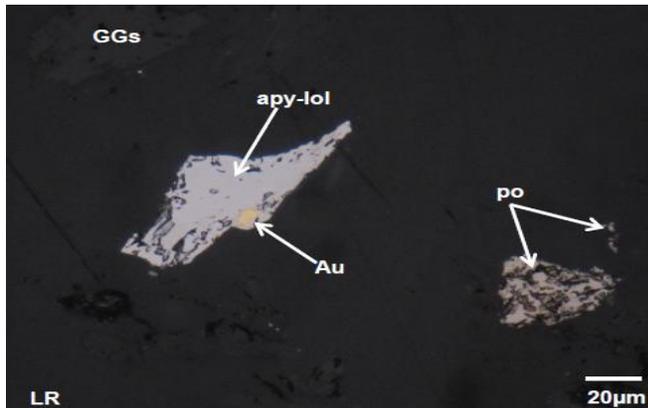
### **Tabla 5**

*Análisis de liberación y asociaciones con énfasis en oro nativo.*

Análisis de liberación y asociaciones: énfasis de oro nativo (Au)	
Distribución global de oro nativo (Au) %	
Au	0
Au-apy - lol	100
total	100
Asociaciones oro nativo (Au)	
asociación	%
Au – apy - lol	100

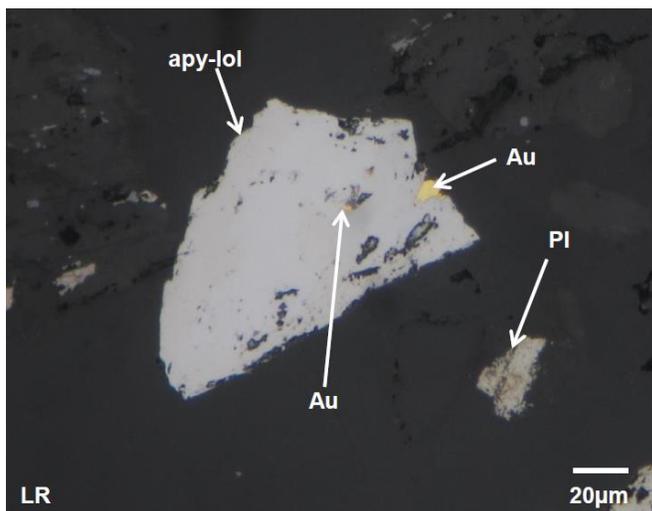
*Nota:* Distribución global de oro nativo, (Bizalab, 2021)

A continuación, se presentan las fotomicrografías más representativas a diferentes escalas.

**Figura 19***Fotomicrografía Aumento 968x*

*Nota:* Aumento 968x. Inter crecimiento de oro nativo (Au), arsenopirita (apy) y lollingita (lol).

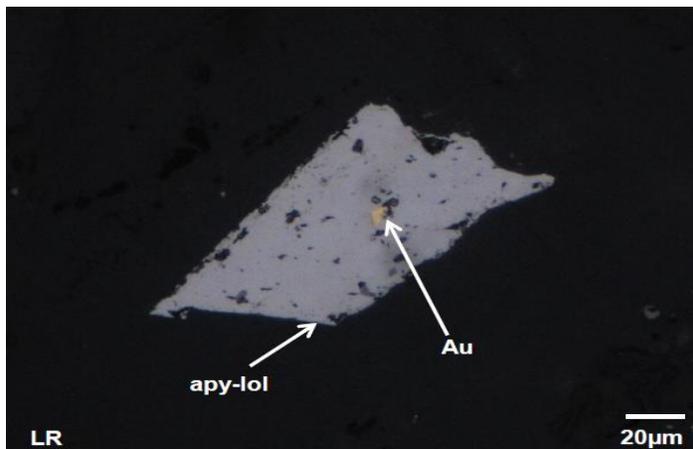
Partículas libres de pirrotita (po). (Bizalab, 2021)

**Figura 20***Fotomicrografía Aumento 866x*

*NOTA:* Aumento 866x. Inter crecimiento lateral de oro nativo (Au), arsenopirita (apy) y lollingita (lol). Partícula libre de producto intermedio (PI). (Bizalab, 2021)

## Figura 21

*Fotomicrografía Aumento 1030x*



*Nota:* Aumento 1030x. Inter crecimiento de oro nativo (Au) incluido en matriz de arsenopirita (apy) y lollingita (lol). (Bizalab, 2021)

En los estudios por microscopía electrónica de barrido (MEB) se reportan y corroboraron mediante análisis puntual químico de las fases presentes. Dichos análisis comprendieron la determinación de los elementos entre berilio y uranio, reportándose los valores en porcentaje en peso de cada elemento (Wt%) normalizado. Cada análisis se presenta con las imágenes de las regiones estudiadas en el microscopio electrónico de barrido. El límite de detección del análisis por rayos X puntual en el microscopio electrónico de barrido es de 0.1% para los elementos que se presenten señales en el espectro evaluado. El ensayo se enfocará en la búsqueda de minerales portadores de plata y oro. Para el caso del oro, éste se encuentra generalmente asociado químicamente con plata, formando una solución sólida. Por tanto, en función a su composición química, se le denominará oro nativo cuya composición en plata sea de inferior al 20% y electrum por sobre o igual al 20% (Marsden).

Se resume las composiciones de los minerales evaluados (Tabla 6):

**Tabla 6**

*Distribución elemental de los minerales portadores identificados en la muestra de cabeza*

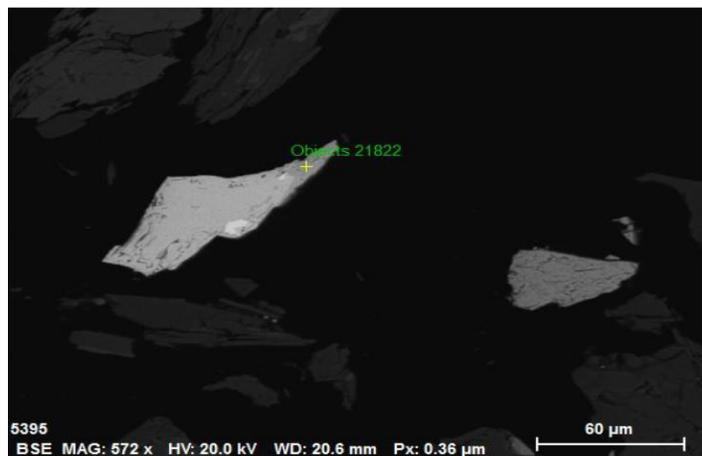
Minerales	Fe	Sb	As	Ag	Au	Ni	Co	Bi	S	total
Arsenopirita	30.4		47.3		0.44		2.98		18.9	100
Pirrotita	62.3								37.7	100
lollinguita	22.8		72.7				4.5			100
oro nativo				4.55	95.5					100
Aleacion de Au-Sb					49.8		50.3			100
Aleacion Au-Bi-Sb		28			56		16			100

*Nota:* composición en %W de la muestra de Constanza

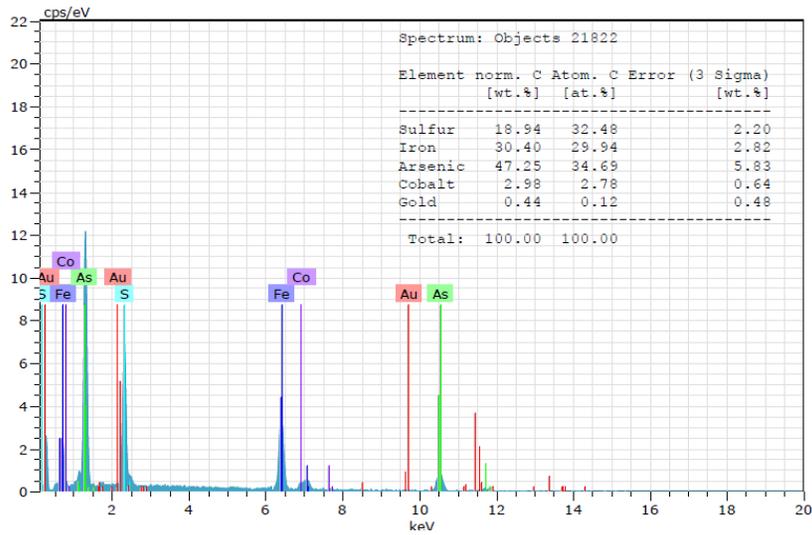
#### **5.4.4 Imagen, Composición y Espectro de Muestra “Mineral de cabeza”.**

**Figura 22**

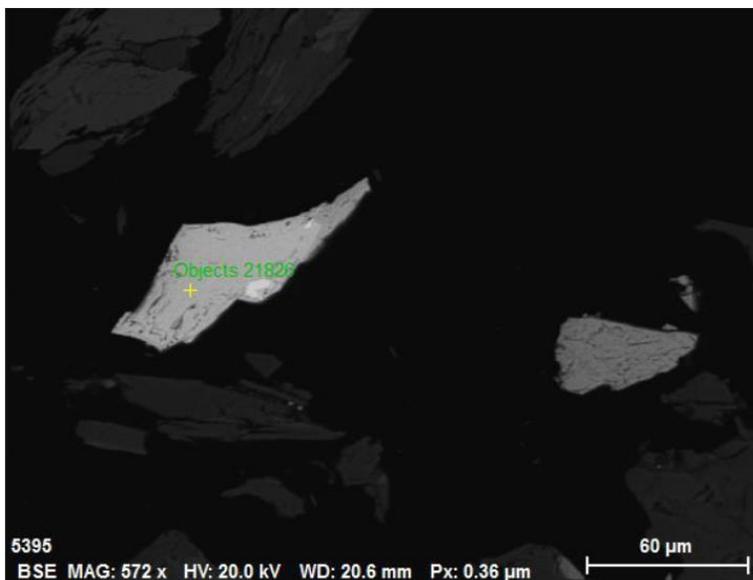
*fotomicrografía de arsenopirita a 572x*



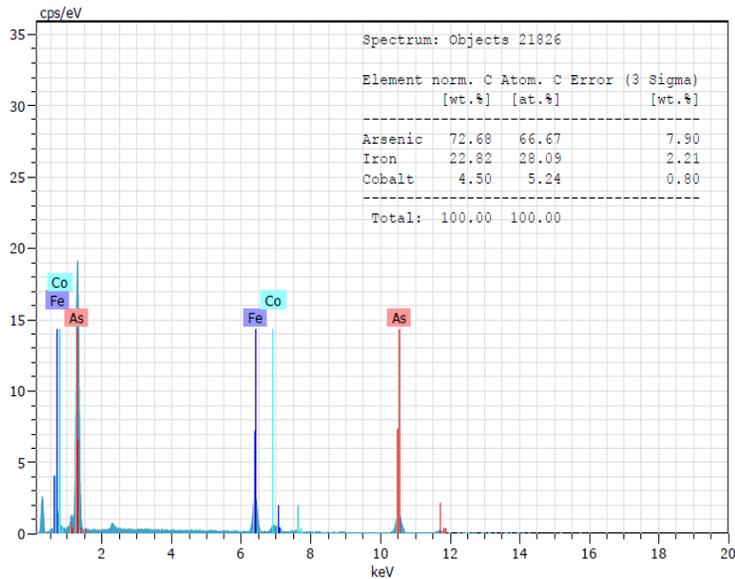
*Nota:* el ensayo se muestra a un aumento 572x. donde se aprecia el Inter crecimiento arsenopirita, (Bizalab, 2021).

**Figura 23***composición y espectro de arsenopirita*

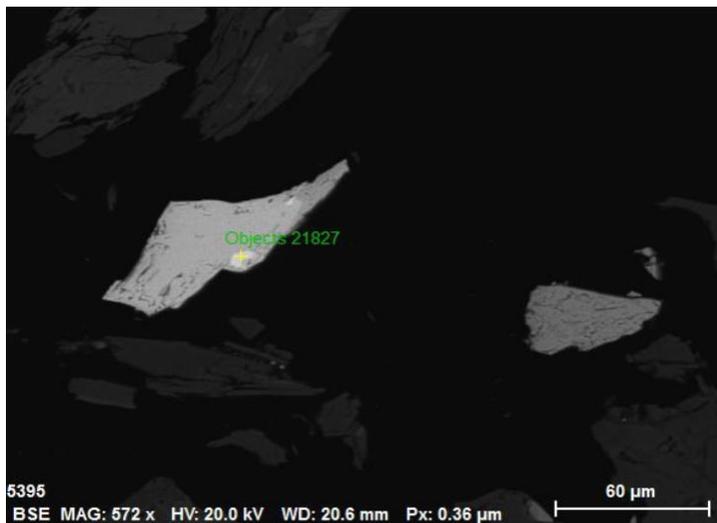
*Nota:* En el grafico se aprecian la composición y espectro de la arsenopirita, (Bizalab, 2021).

**Figura 24***fotomicrografía de lollinguita a 572x*

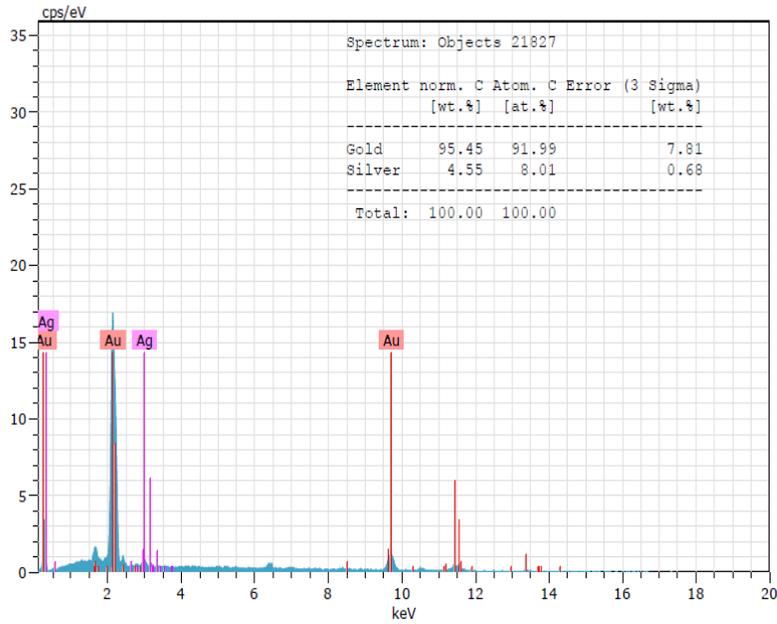
*Nota:* el ensayo se muestra a un aumento 572x. donde se aprecia el Inter crecimiento lollinguita, (Bizalab, 2021)

**Figura 25***Composición y espectro de lollinguita*

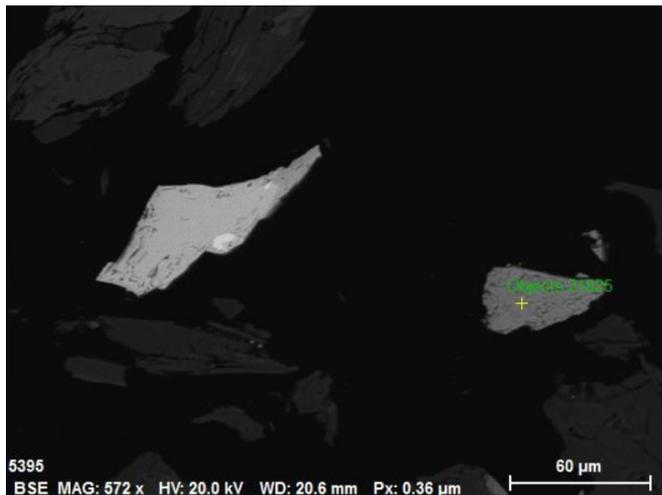
*Nota:* En el grafico se aprecian la composición y espectro de la lollinguita, (Bizalab, 2021)

**Figura 26***Fotomicrografía de oro nativo a 572x*

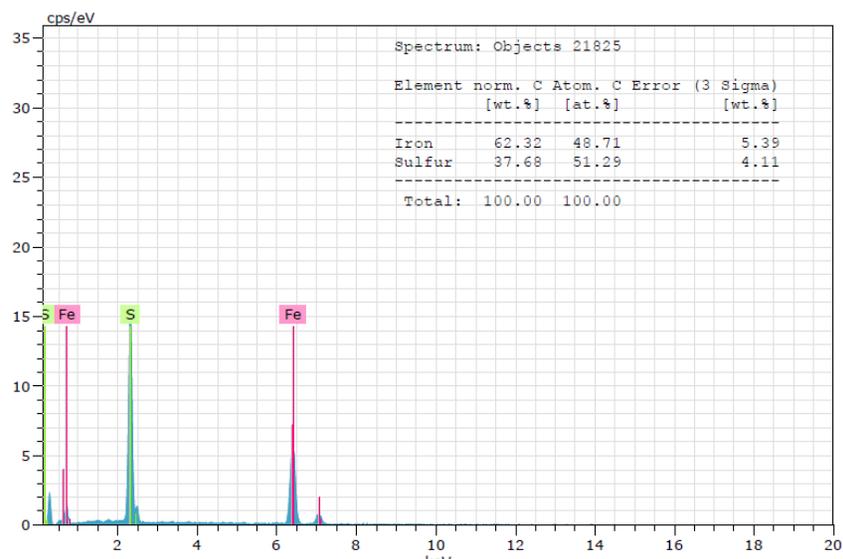
*Nota:* el ensayo se muestra a un aumento 572x. donde se aprecia el Inter crecimiento de oro nativo, (Bizalab, 2021)

**Figura 27***Composición y espectro de oro nativo*

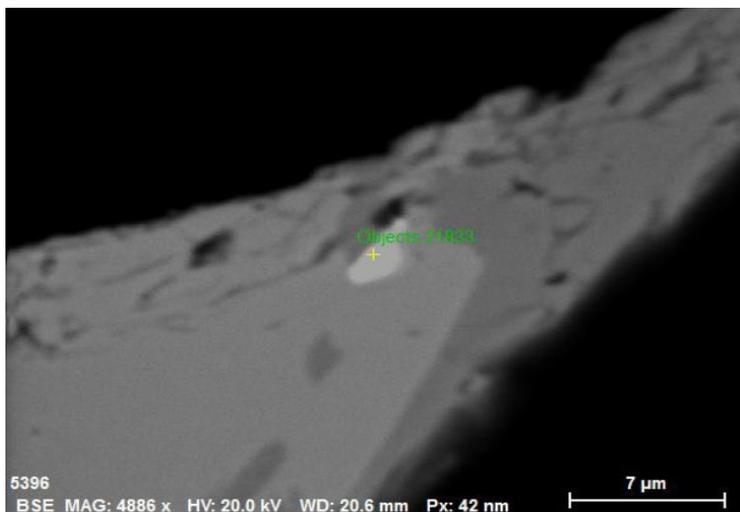
*Nota:* En el grafico se aprecian la composición y espectro de oro nativo, (Bizalab, 2021)

**Figura 28***Fotomicrografía de la Pirrotita a 572x*

*Nota:* el ensayo se muestra a un aumento 572x. donde se aprecia el Inter crecimiento pirrotita, (Bizalab, 2021)

**Figura 29***Composición y espectro de la pirrotita*

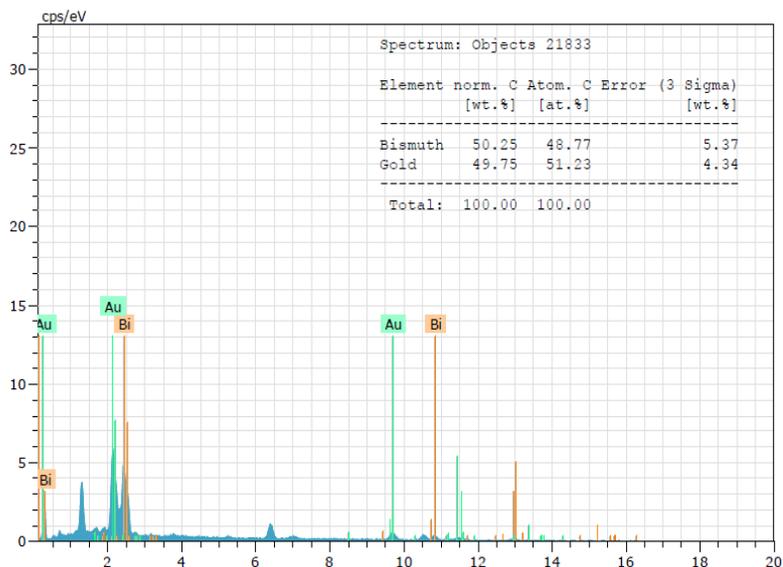
*Nota:* En el grafico se aprecian la composición y espectro de la pirrotita, (Bizalab, 2021).

**Figura 30***Fotomicrografía de aleación Oro- Bismuto a 4886x*

*Nota:* el ensayo se muestra a un aumento 4886x. donde se aprecia el Inter crecimiento de la aleación oro- bismuto, (Bizalab, 2021).

**Figura 31**

*Composición y espectro de aleación oro- bismuto*



Nota: En el grafico se aprecian la composición y espectro de la aleación oro- bismuto, (Bizalab, 2021)

### 5.5 Caracterización Geoquímica

El método para analizar oro se denomina ensayo de fuego, donde se requieren de 100 a 150 gramos de muestra. Se envió las muestras para su análisis al laboratorio químico de la unidad minera cori puno SAC con la codificación LM-21-001 ley de cabeza, El análisis se realiza a través de un recipiente cerámico llamado crisol, en el cual se funde la muestra. Debido a que los minerales que contienen oro presentan puntos de fusión muy elevados, es necesario utilizar fundentes para que las temperaturas de los hornos logren fundir todo el material el cual logra fundir los elementos a temperaturas entre 900°C y 1000°C

Análisis químico del mineral

**Tabla 7***Análisis químico del mineral*

Detalle	Valor
Ley g.Au/t	2.23

Fuente: Laboratorio químico (LQ.minera koripuno sac.)

## 5.6 Caracterización Físicoquímica

Durante la caracterización físicoquímica se determinaron algunos parámetros importantes para la selección de los procesos y diseño de los equipos de la planta de procesamiento.

### 5.6.1 Determinación de Densidades.

Se determinaron tres tipos de densidades: densidad aparente aireada, densidad real por desplazamiento de volumen y densidad por picnometría. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8***Densidad del mineral*

DENSIDAD	Mineral Constanza		
	60 Tyler (75 um)	100 Tyler (75 um)	200 Tyler (75 um)
Densidad aparente	1.142	1.048	0.853
Densidad real por desplazamiento de volumen	2.864	2.857	2.841
Densidad real picnometría	.....	.....	2.83

Fuente: elaboración propia

Las diferencias notables de densidades reales por desplazamiento del mineral pasante malla 200 Ty, fue debido a la presencia de arcillas, que al estar a una granulometría fina y en contacto con agua, se hinchan al atrapar parte del líquido en su estructura cristalina

### 5.6.2 *Determinación del Grado de Acidez.*

La determinación del pH es un parámetro necesario para evaluar el consumo de reactivos, teniendo en cuenta que el proceso de flotación se realiza en un rango de pH de 6 a 9. El pH fue estimado con agua destilada, siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM D 4972-89. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9**

#### *Determinación del pH*

Determinación de pH	
pH	6.5

Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados de pH las pruebas de flotación se realizaron a pH natural sin uso de cal, lo cual se observa una mejora en la recuperación, debido principalmente a que la cal pasiva la superficie de los sulfuros evitando que los reactivos colectores hagan contacto con la superficie de mineral.

## 5.7 **Caracterización Metalúrgica**

### 5.7.1 *Determinación del Índice de Bond.*

Este parámetro se determinó con el fin de estimar el consumo energético y posteriormente emplearlo en el dimensionamiento de los equipos de conminución necesarios para el montaje de la planta. Por otra parte, mediante este parámetro es posible estimar el mineral predominante en la mena, basándose en las referencias de los índices de bond para minerales puros.

El método utilizado para el presente estudio fue el Método comparativo de Bond.

**Tabla 10***Granulometría del alimento y producto del mineral Constanza*

Malla	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Alimento Constanza				Producto Constanza			
		Peso (g)	%Peso	Ac. Pass (%)	F80 ( $\mu\text{m}$ )	Peso (g)	%Peso	Ac. Pass (%)	F80 ( $\mu\text{m}$ )
10	2	0	0	100	1.368.0	0	0	100	0
16	1.189	263.2	26.32	73.68	0	0	0	100	0
18	1	78.6	7.86	65.82	0	0	0	100	0
20	841	60.1	6.01	59.81	0	0	0	100	0
30	595	92.7	9.27	50.54	0	0	0	100	0
40	420	75.4	7.54	43	0	0	0	100	0
50	297	66.5	6.65	36.35	0	0	0	100	0
70	210	49.3	4.93	31.42	0	8.7	0.87	99.13	0
100	149	41.9	4.19	27.23	0	28	2.8	96.33	0
140	105	31.3	3.13	24.1	0	67.4	6.74	89.59	75
200	74	26.4	2.64	21.46	0	98.4	9.84	79.76	0
270	53	26.1	2.61	18.85	0	118.7	11.87	67.89	0
325	44	11.1	1.11	17.74	0	44.2	4.42	63.47	0
400	37	12.8	1.28	16.46	0	56	5.6	57.88	0
-400		164.6	16.46	0	0	579	57.88	0	0
		1,000	100		1,368	1,000	100		75

Fuente: Elaboracion Propia

**Tabla 11***Granulometría del alimento y producto del mineral Cuarzo*

Malla	Aber- tura ( $\mu\text{m}$ )	Alimento Cuarzo				Producto Cuarzo			
		Peso (g)	%Peso	Ac. Pass (%)	F80 ( $\mu\text{m}$ )	Peso (g)	%Peso	Ac. Pass (%)	F80 ( $\mu\text{m}$ )
10	2	0	0	100	1.585.92	0	0	100	0
16	1.189	393.5	39.35	60.7	0	0	0	100	0
18	1	94.3	9.43	51.2	0	0	0	100	0
20	841	66.4	6.64	44.6	0	0	0	100	0
30	595	111.1	11.11	33.5	0	0	0	100	0
40	420	87.7	8.77	24.7	0	0	0	100	0
50	297	72	7.2	17.5	0	0	0	100	0
70	210	47.9	4.79	12.7	0	0.4	0.04	99.96	0
100	149	37.8	3.78	8.9	0	3.2	0.32	99.64	0
140	105	24.9	2.49	6.4	0	63.8	6.38	93.26	80.2
200	74	17.8	1.78	4.7	0	166.5	16.65	76.61	0
270	53	14	1.4	3.3	0	207.7	20.77	55.84	0
325	44	4.7	0.47	2.8	0	46.7	4.67	51.17	0
400	37	4.8	0.48	2.3	0	88.5	8.85	42.32	0
-400		23.1	2.31	0	0	423.2	42.32	0	0
		1,000	100		1585.92	1,000	100		80

Fuente: Elaboracion Propia

**Tabla 12***Comparativo de Índice de trabajo Constanza-Cuarzo*

Mineral	F <sub>80</sub> $\mu\text{m}$	P <sub>80</sub> $\mu\text{m}$	Wi kw-h/tc
Constanza	1,368	75	14.04
Cuarzo	1,586	80.2	14.95

Fuente: Elaboracion Propia

El Work Índice del mineral de constanza es de 14.04 kw-h/tc, representa un mineral de menor competencia para el proceso de trituración y molienda en comparación del Work Índice del cuarzo que es de 14.95 kw-h/tc, es decir el consumo energético del procesamiento de mineral

será mayor. El mineral de constanza al tener una mayor dureza producirá efectos principalmente en las etapas de chancado con mayores horas de operación y aumento de la carga circulante en el circuito de Molienda.

## **5.8 Prueba Experimental Proceso de Gravimetría**

### **5.8.1 Trabajos Preliminares**

#### **5.8.1.1 Determinación de curva de Moliendabilidad para la Prueba de Gravimetría**

Para la determinación del tiempo de moliendabilidad se realiza la molienda del mineral de 1000gr con un % de solido de 66.7 al 100% malla -10 en el molino de Bolas Estándar a distintos tiempos (0, 10, 20, 30, 40, 50) min y posterior análisis granulométrico con una serie de tamices desde la malla N° 10 hasta la malla N° 200 esto permite tener el tiempo requerido de molienda para lograr la granulometría deseada en laboratorio. Para nuestro estudio la granulometría requerida es de 50%-200m, 55%-200m y 60%-200m para las pruebas de gravimetría. Analisis granulometrico (0, 10, 20, 30, 40, 50)min para la determinacion de la curva de moliendabilidad como se muestrarn en las siguientes tablas.

**Tabla 13***Analisis Granulometrico para tiempo 0min y 10min*

	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	T. min: 0 min				T. min: 10 min			
		Peso (g)	Peso (%)	Ac. Ret. (%)	Ac. Pass (%)	Peso (g)	Peso (%)	Ac. Ret. (%)	Ac. Pass (%)
10	2000	3,10	0,31	0,31	99,69	1,90	0,19	0,19	99,81
16	1180	270,90	27,09	27,40	72,60	78,30	7,83	8,02	91,98
18	1000	68,80	6,88	34,28	65,72	32,80	3,28	11,30	88,70
20	850	53,10	5,31	39,59	60,41	28,30	2,83	14,13	85,87
30	600	88,70	8,87	48,46	51,54	56,00	5,60	19,73	80,27
40	425	80,90	8,09	56,55	43,45	66,90	6,69	26,42	73,58
50	300	57,60	5,76	62,31	37,69	61,30	6,13	32,55	67,45
70	212	51,90	5,19	67,50	32,50	70,30	7,03	39,58	60,42
100	150	43,50	4,35	71,85	28,15	68,90	6,89	46,47	53,53
140	106	34,50	3,45	75,30	24,70	63,00	6,30	52,77	47,23
200	28	27,40	2,74	78,04	21,96	54,70	5,47	58,24	41,76
-200		219,60				417,60			
		<b>1000,00</b>	<b>100,00</b>			<b>1000,00</b>	<b>100,00</b>		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14***Analisis Granulometrico para tiempo 20min y 30min*

Malla	Abertura (u)	T. min: 20 min				T. min: 30 min			
		Peso (g)	Peso (%)	Ac. Ret. (%)	Ac. Pass (%)	Peso (g)	Peso (%)	Ac. Ret. (%)	Ac. Pass (%)
10	2000	1,00	0,10	0,10	99,90		0,00	0,00	100,00
16	1180	18,10	1,81	1,91	98,09		0,00	0,00	100,00
18	1000	7,50	0,75	2,66	97,34		0,00	0,00	100,00
20	850	6,70	0,67	3,33	96,67		0,00	0,00	100,00
30	600	14,80	1,48	4,81	95,19	3,20	0,32	0,32	99,68
40	425	20,70	2,07	6,88	93,12	1,50	0,15	0,47	99,53
50	300	29,50	2,95	9,83	90,17	2,40	0,24	0,71	99,29
70	212	57,30	5,73	15,56	84,44	10,10	1,01	1,72	98,28
100	150	81,30	8,13	23,69	76,31	37,50	3,75	5,47	94,53
140	106	88,50	8,85	32,54	67,46	79,40	7,94	13,41	86,59
200	75	82,60	8,26	40,80	59,20	98,20	9,82	23,23	76,77
-200		592,00				767,70			
		1000,00	100,00			1000,00	100,00		

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 15***Analisis Granulometrico para tiempo 40min y 50min*

Malla	Abertura	T. min: 40 min				T. min: 50 min			
		Peso (g)	Peso (%)	Ac. Ret. (%)	Ac. Pass (%)	Peso (g)	Peso (%)	Ac. Ret. (%)	Ac. Pass (%)
10	2000	-	0,00	0,00	100,00	-	0,00	0,00	100,00
16	1180	-	0,00	0,00	100,00	-	0,00	0,00	100,00
18	1000	-	0,00	0,00	100,00	-	0,00	0,00	100,00
20	850	-	0,00	0,00	100,00	-	0,00	0,00	100,00
30	600	-	0,00	0,00	100,00	-	0,00	0,00	100,00
40	425	-	0,00	0,00	100,00	-	0,00	0,00	100,00
50	300	0,20	0,02	0,02	99,98	-	0,00	0,00	100,00
70	212	0,80	0,08	0,10	99,90	0,21	0,02	0,02	99,98
100	150	7,20	0,72	0,82	99,18	1,50	0,15	0,17	99,83
140	106	36,20	3,62	4,44	95,56	14,30	1,43	1,60	98,40
200	75	78,30	7,83	12,27	87,73	51,80	5,18	6,78	93,22
-200		877,30				932,19			
		1000,00	100,00			1000,00	100,00		

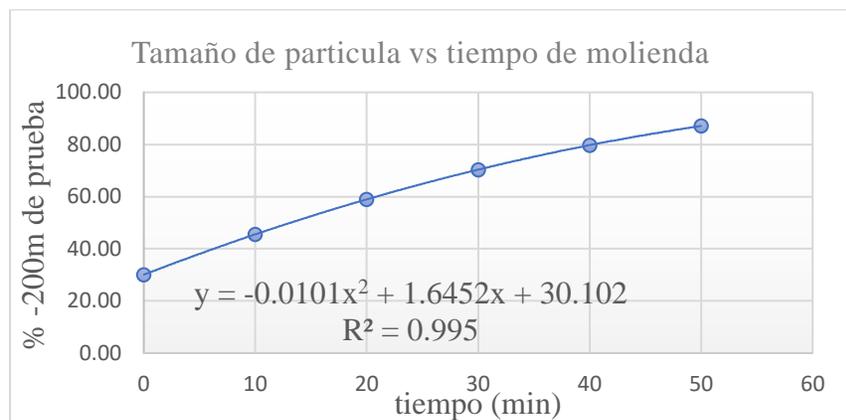
Fuente: Elaboración propia

- Modelo matematico para el calculo de estudio la granulometría requerida es de 50%-200m, 55%-200m y 60%-200m para las pruebas de gravimetría.

**Tabla 16***Modelo matematico %-m200*

Tiempo de molienda					
Tiempo (min)	Peso g +200m	Peso g - 200m	Total, g	% -200m de Prueba	% -200m de modelo
0	681.5	318.50	1000.00	31.85	30.10
10	568.9	431.10	1000.00	43.11	45.54
20	431.8	568.20	1000.00	56.82	58.97
30	261.9	738.10	1000.00	73.81	70.37
40	199.2	800.80	1000.00	80.08	79.75
50	140.7	859.30	1000.00	85.93	87.11

Fuente: Elaboración propia

**Figura 32***Grafica de tamaño de particula vs Tiempo de molienda*

Nota: Grafica de tamaño de partícula vs tiempo de molienda para obtener el modelo matemático.

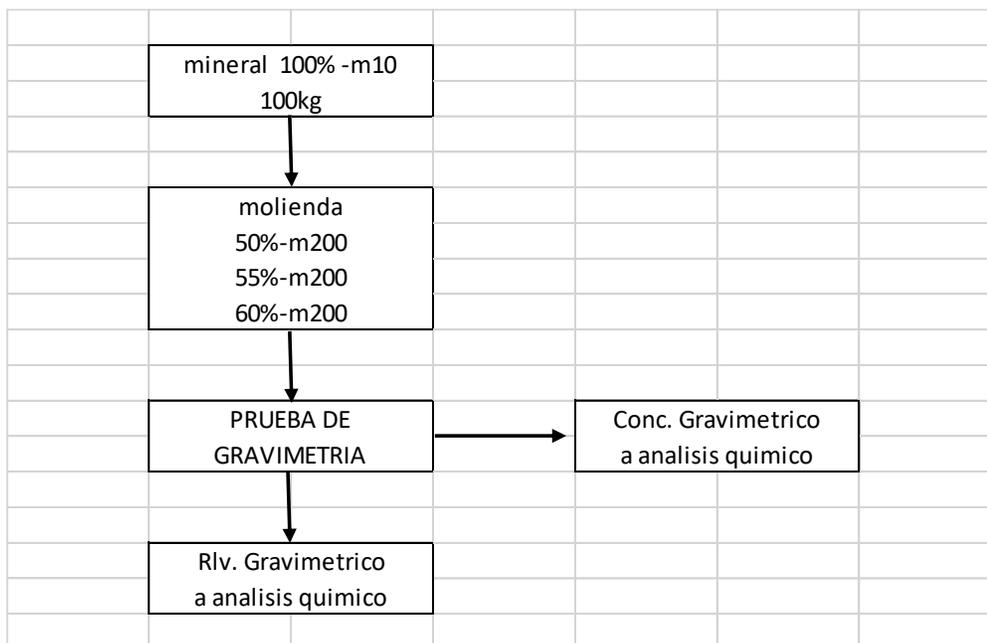
**Figura 33***Determinación de tiempos de molienda*

Malla	% -200m	Tiempo (seg)
50 % -200m	50	13min 18 seg
55 % -200m	55	16min 54seg
60 % -200m	60	20min 48seg

Fuente: Elaboración propia

**5.8.2 Molienda para el Ensayo Gravimétrico**

Luego de realizar las moliendas de 100kg respectivas para obtener 50%, 55% y 60% - m200 este producto obtenido lo pasaremos por el concentrador centrífugo Falcon LB-40 de acuerdo las variables definidas para cada prueba dentro del diseño factorial.

**Figura 34***Diagrama de flujo para el proceso de gravimetría*

Fuente: Elaboración propia

### 5.8.3 Matriz del Diseño

Las pruebas de gravimetría se realizarán mediante un diseño factorial de 2 niveles y 3 factores  $2^3$  teniendo como mínimo de 10 pruebas, con un solo bloque sin repetición y 2 puntos centrales. Las variables a tomar en este proceso son como se muestran en la tabla N°17

Antes de realizar las pruebas vamos a elegir las variables que más influirán en estas pruebas:

**Tabla 17**

*Variables y su codificación*

FACTOR	NOMBRE	TIPO	BAJO	ALTO
A	presión (Psi)	Numérico	-1	1
B	Frecuencia (Hz)	Numérico	-1	1
C	%-m200	Numérico	-1	1

*Nota:* En la tabla se muestra el Factor y variable con valores codificados.

**Tabla 18**

*Variables reales*

FACTOR	NOMBRE	TIPO	BAJO	ALTO
A	presión (Psi)	Numérico	3	5
B	Frecuencia (Hz)	Numérico	70	80
C	%-m200	Numérico	50	60

*Nota:* En la tabla se muestra el Factor y variable con valores reales.

**Tabla 19***Condiciones para cada prueba*

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Presion(Psi)	Frecuencia(Hz)	%-m200
1	1	1	1	3	60	50
2	2	1	1	5	60	50
3	3	1	1	3	80	50
4	4	1	1	5	80	50
5	5	1	1	3	60	60
6	6	1	1	5	60	60
7	7	1	1	3	80	60
8	8	1	1	5	80	60
9	9	0	1	4	70	55
10	10	0	1	4	70	55

*Nota:* En la tabla se muestra se muestra el orden de las corridas y las condiciones para cada prueba.

#### **5.8.4 Pruebas Perentorias**

El desarrollo de las pruebas de gravimetría, se realizó en el laboratorio metalúrgico de la minera cori Puno SAC., evaluando 10 pruebas experimentales con dos puntos centrales, de acuerdo al diseño experimental establecido DF (Diseño Factorial). Pevio a la prueba de gravimetría, se pesó en la 2 veces de 5kg de mineral para tener una cantidad suficiente de muestra a una granulometría de 50, 55, 60% a malla -200 obtenidas mediante los tiempos de molienda 13.18min, 16.54min y 20.48 min respectivamente, a porcentaje de solidos de 50% calculadas mediante  $W_s$  (peso del solido) entre el  $W_p$  (peso de la pulpa) este último calculada con las variables de la GE (gravedad especifica del mineral) que es 2.83 a una densidad de pulpa de 1.5 Kg/lit.

En esta etapa de preconcentración se configura el equipo de concentración falcon LB 40 mediante el tablero de control así como la presión del agua (PSI) que varía 3,4 y 5 psi , la velocidad de rotación del cono( Hz) para alcanzar la fuerza G que varía 60,70 y 80 Hz con un tiempo que varía entre 2-3 minutos tiempo necesario para terminar el proceso.

El proceso comienza con parametrizar cada prueba a diferentes parámetros en el tablero del concentrador Falcon LB-40, posterior a eso la pulpa es vertida a un pequeño tanque de capacidad de 20 Lt que tiene una agitación constante con la cual evita el asentamiento de las partículas es alimentada con un caudal de 2.3 m<sup>3</sup>/hr de pulpa al concentrador. Esto es muy importante porque el equipo Falcón requiere una alimentación de pulpa constante para una buena operación, pasado aproximadamente los 2-3 minutos se se obtiene un concentrado y relave.

### Prueba de gravimetría 01

**Tabla 20**

*Condiciones para el proceso 01*

<b>Operación</b>	<b>Und.</b>	<b>Valor</b>
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	kg	10
gravedad específica		2.83
% Sólidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	50
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	3
Frecuencia	Hz	60
Caudal	m <sup>3</sup> /hr	2.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 21***Balance metalúrgico de Gravimetría 01*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	398.43	4.0	16.14	0.006	22.40
Rve Final	9562.37	96.0	2.97	0.022	77.60
Cabeza calc	9960.8	100.0	2.21	0.029	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 02****Tabla 22***Condiciones para el proceso 02*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	kg	10
gravedad espesifica		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	50
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	5
Frecuencia	Hz	60
Caudal	m3/hr	2.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 23***Balance metalúrgico de Gravimetría 02*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	194.00	1.9	36.44	0.007	23.68
Rve Final	9777.90	98.1	2.11	0.023	76.32
Cabeza calc	9971.9	100.0	2.31	0.030	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 03****Tabla 24***Condiciones para el proceso 03*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	kg	10
gravedad espezifca		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	50
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	3
Frecuencia	Hz	80
Caudal	m3/hr	2.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 25***Balance metalúrgico de Gravimetría 03*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	159.00	1.6	36.76	0.006	20.36
Rve Final	9811.80	98.4	2.76	0.023	79.64
Cabeza calc	9970.8	100.0	2.33	0.029	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 04****Tabla 26***Condiciones para el proceso 04*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	kg	10
gravedad espesifica		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	50
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	5
Frecuencia	Hz	80
Caudal	m3/hr	2.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 27***Balance metalúrgico de Gravimetría 04*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	95.90	1.0	74.05	0.007	23.56
Rve Final	9888.60	99.0	2.66	0.023	76.44
Cabeza calc	9984.5	100.0	2.43	0.030	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 05****Tabla 28***Condiciones para el proceso 05*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	kg	10
gravedad espezifca		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	60
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	3
Frecuencia	Hz	60
Caudal	m3/hr	2.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 29***Balance metalúrgico de Gravimetría 05*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	328.20	3.3	31.14	0.010	31.26
Rve Final	9644.90	96.7	2.78	0.022	68.74
Cabeza calc	9973.1	100.0	2.28	0.033	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 06****Tabla 30***Condiciones para el proceso 06*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	Kg	10
gravedad espezifca		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	60
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	Kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	5
Frecuencia	Hz	60
Caudal	m3/hr	2.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 31***Balance metalúrgico de Gravimetría 06*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	194.00	1.9	36.30	0.007	23.61
Rve Final	9777.90	98.1	2.33	0.023	76.39
Cabeza calc	9971.9	100.0	2.26	0.030	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 07****Tabla 32***Condiciones para el proceso 07*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	Kg	10
gravedad espezifca		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	60
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	Kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	3
Frecuencia	Hz	80
Caudal	m3/hr	2.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 33***Balance metalúrgico de Gravimetría 07*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	337.80	3.4	27.69	0.009	29.41
Rve Final	9634.20	96.6	3.01	0.022	70.59
Cabeza calc	9972	100.0	2.24	0.032	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 08****Tabla 34***Condiciones para el proceso 08*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	Kg	10
gravedad espesifica		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	60
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	Kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	5
Frecuencia	Hz	80
Caudal	m3/hr	2.3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 35***Balance metalúrgico de Gravimetría 08*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	123.30	1.2	73.49	0.009	28.51
Rve Final	9752.00	98.8	2.24	0.023	71.49
Cabeza calc	9875.3	100.0	2.26	0.032	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 09****Tabla 36***Condiciones para el proceso 09*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	kg	10
gravedad espezifca		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	55
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	4
Frecuencia	Hz	70
Caudal	m3/hr	2.3

NOTA: Elaboración propia

**Tabla 37***Balance metalúrgico de Gravimetría*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	114.60	1.1	71.20	0.008	24.68
Rve Final	9882.30	98.9	2.52	0.025	75.32
Cabeza calc	9996.9	100.0	2.39	0.033	100.00

NOTA: Elaboración propia

**Prueba de gravimetría 10****Tabla 38***Condiciones para el proceso 10*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	kg	10
gravedad específica		2.83
% Sólidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	55
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	20,0
Presión	PSI	4
Frecuencia	Hz	70
Caudal	m3/hr	2.3

Nota: Elaboración propia

**Tabla 39***Balance metalúrgico de Gravimetría 10*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recuperación
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	150.70	1.5	54.75	0.008	25.10
Rve Final	9849.30	98.5	2.5	0.025	74.90
Cabeza calc	10000	100.0	2.41	0.033	100.00

NOTA: Elaboración propia

## CAPITULO IV

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS I

## 6.1 Evaluación Estadística

Tabla 40

*Resultados obtenidos para cada prueba*

Orden Corrida	Pt. Central	Bloques	presión (Psi)	Frecuencia (Hz)	%-m200	% Rec. Au
1	1	1	3	60	50	22.4
2	1	1	5	60	50	23.68
3	1	1	3	80	50	20.36
4	1	1	5	80	50	23.56
5	1	1	3	60	60	31.26
6	1	1	5	60	60	23.61
7	1	1	3	80	60	29.41
8	1	1	5	80	60	28.51
9	0	1	4	70	55	24.68
10	0	1	4	70	55	25.1

Elaboración Propia

6.1.1 *Análisis de Datos*

Mediante los resultados obtenidos realizamos el análisis estadístico para hallar las significancias de las variables involucradas, usaremos la regresión factorial en minitab:

Regresión factorial: %Re vs. Presion PSI; Frecuencia Hz; % de solidos; %-200; PtCentral

**Tabla 41***Coefficientes codificados*

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		25.349	0.433	58.50	0.000	
presión (Psi)	-1.017	-0.509	0.433	-1.17	0.361	1.00
Frecuencia (Hz)	0.223	0.111	0.433	0.26	0.821	1.00
%-m200	5.698	2.849	0.433	6.57	0.022	1.00
presión (Psi)*Frecuencia (Hz)	2.168	1.084	0.433	2.50	0.130	1.00
presión (Psi)*%-m200	-3.257	-1.629	0.433	-3.76	0.064	1.00
Frecuencia (Hz)*%-m200	1.303	0.651	0.433	1.50	0.272	1.00
Pt Ctral		-0.459	0.969	-0.47	0.683	1.00

NOTA. (EE: Error estándar del coeficiente, FIV: Factor de inflación varianza). Data del

Software MINITAB

En la tabla N° 41 podemos ver que la variable % -m200 tiene un valor p de 0.022, lo que sugiere que es estadísticamente significativo e indica que un aumento en esta variable está asociado con un aumento en la variable dependiente. Mientras que las variables presión (Psi) y Frecuencia (Hz) Tienen un coeficiente negativo, ya que el valor p es 0.225 y 0.088 respectivamente, lo que indica que no es estadísticamente significativo.

**Tabla 42***Análisis de Varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	101.441	14.4916	9.65	0.097
Lineal	3	67.093	22.3642	14.89	0.064
presión (Psi)	1	2.071	2.0706	1.38	0.361
Frecuencia (Hz)	1	0.099	0.0990	0.07	0.821
%-m200	1	64.923	64.9230	43.22	0.022
Interacciones de 2 términos	3	34.012	11.3372	7.55	0.119
Presión (Psi)*Frecuencia (Hz)	1	9.396	9.3961	6.26	0.130
Presión (Psi)*%-m200	1	21.223	21.2226	14.13	0.064
Frecuencia (Hz)*%-m200	1	3.393	3.3930	2.26	0.272
Curvatura	1	0.337	0.3367	0.22	0.683
Error	2	3.004	1.5022		
Falta de ajuste	1	2.916	2.9161	33.06	0.110
Error puro	1	0.088	0.0882		
Total	9	104.445			

*Nota:* (GL: Grados Libertad, SC Ajust: Suma cuadrados, MC Ajust: Cuadrado medio, F:

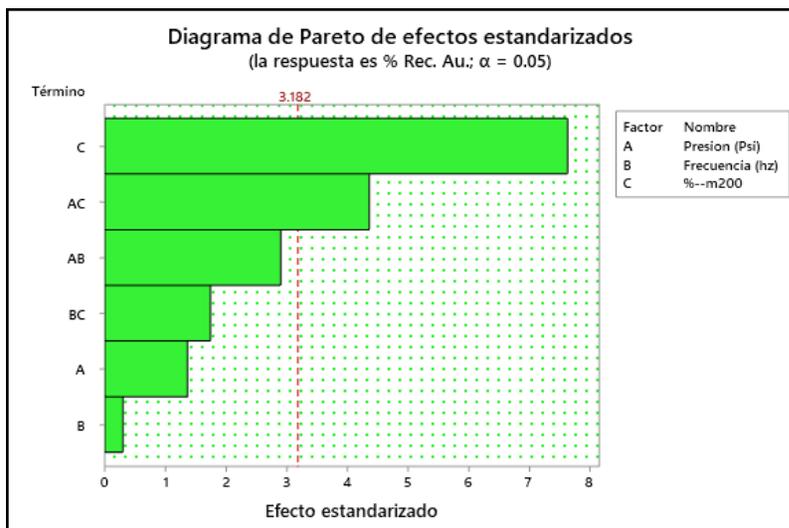
Distribución de probabilidad p: probabilidad). Dato del Software MINITAB 20

El modelo muestra que **%-m200** es el factor clave en la recuperación de oro. El modelo general tiene un ajuste aceptable, las interacciones entre las variables no son significativas, aunque la interacción Presión \* %-m200 se acerca a la significancia (valor p = 0.064).

### 6.1.1.1 Diagrama de Pareto

**Figura 35**

*Diagrama de Pareto de los efectos*



*Nota:* (A: Presión (Psi), B: Frecuencia (Hz) C: Granulometría (%-m200). 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 (presión Psi) por sí solo no alcanza el umbral de significancia.
- B (Frecuencia Hz) por sí solo no alcanza el umbral de significancia.
- C (Granulometría %-m200). tiene el mayor efecto, seguido por AC (Granulometría \*

Presión). (Salazar & Del Castillo, 2018)

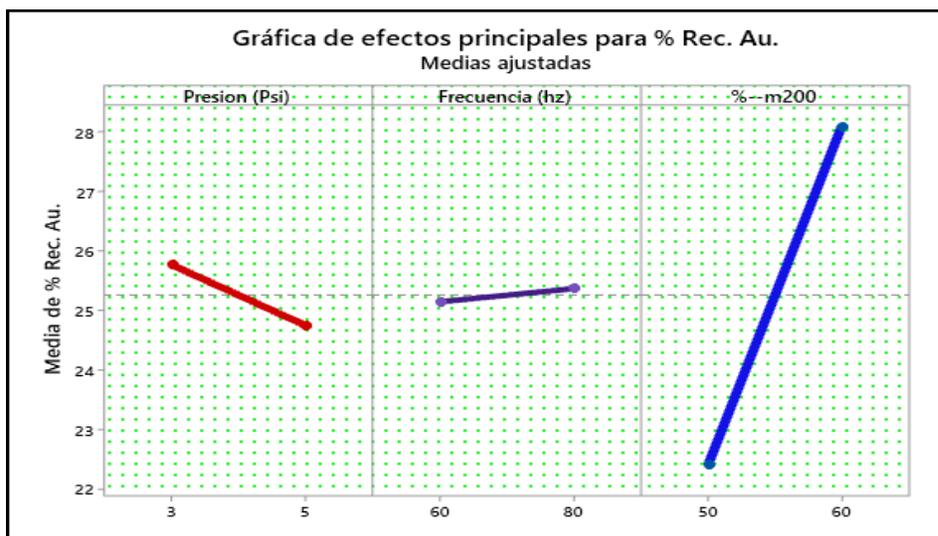
- AB, BC y punto central no son estadísticamente significativos.

### 6.1.1.2 Análisis de los Efectos Principales de cada Variable en la Recuperación

En la Figura 36 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 (%-m200) es más significativo que la Frecuencia Hz y Presión Psi.

#### Figura 36

Gráfica de efectos principales para recuperación de Au



Nota: (A: Presión (Psi), B: Frecuencia (Hz) C: Granulometría (%-m200). Elaborado en Minitab 20

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 la variable %-m200 tiene una pendiente positiva, lo cual nos dice que este interviene de forma directamente proporcional a nuestro factor de respuesta, podemos ver que el factor que tiene mayor incidencia es la granulometría, la frecuencia tiene una mínima pendiente positiva pero no es significativa, el factor Presión es evidentemente negativa por lo que esta variable no es significativa en el proceso para la obtención de oro por el proceso de gravimetría.

### 6.1.2 Efecto de Variables Individuales

**Tabla 43**

*Análisis de varianza de Presión (Psi)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia (Hz)	2	0.436	0.2179	0.01	0.985
Error	7	104.010	14.8585		
Total	9	104.445			

Nota. Data del Software MINITAB 20

**Tabla 44**

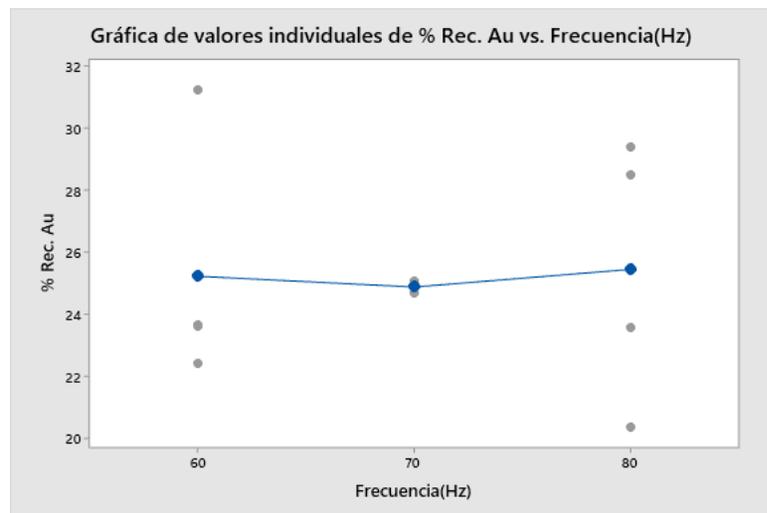
*Resumen del modelo*

Frecuencia (Hz)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60	4	25.24	4.06	(20.68; 29.79)
70	2	24.890	0.297	(18.445; 31.335)
80	4	25.46	4.26	(20.90; 30.02)

Nota. Data del Software MINITAB 20(Desv.Est. agrupada = 3.85468)

**Figura 37**

*Valores individuales de recuperación vs Frecuencia (Hz)*

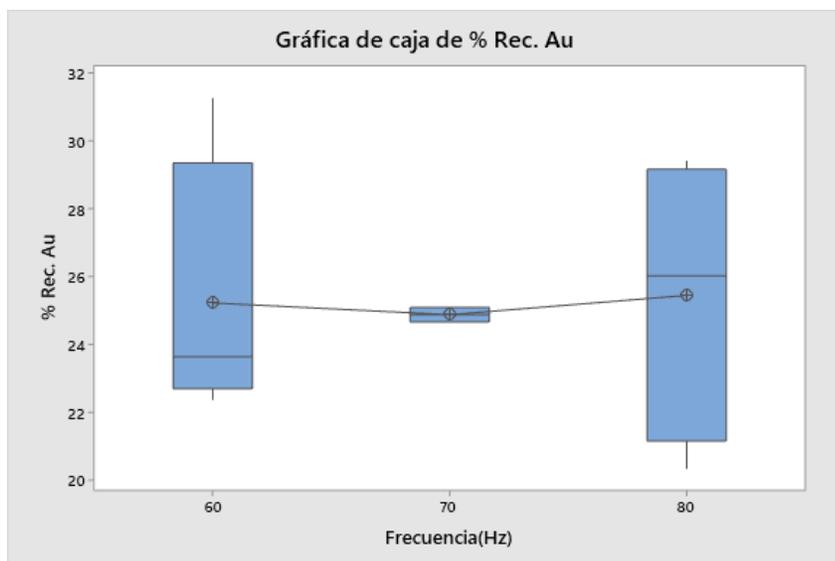


Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de valores individuales revela una mayor dispersión en los datos la frecuencia de 80 Hz, mientras que 60 Hz muestra menor variabilidad.

### Figura 38

*Gráfica de cajas de recuperación vs Frecuencia (Hz)*



Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de caja confirma la tendencia mínimamente ascendente y muestra algunas asimetrías en la distribución de los datos, especialmente para la Frecuencia de 80 Hz lo que implica no tener significancia respecto a la recuperación.

### Tabla 45

*Análisis de varianza de %-m200*

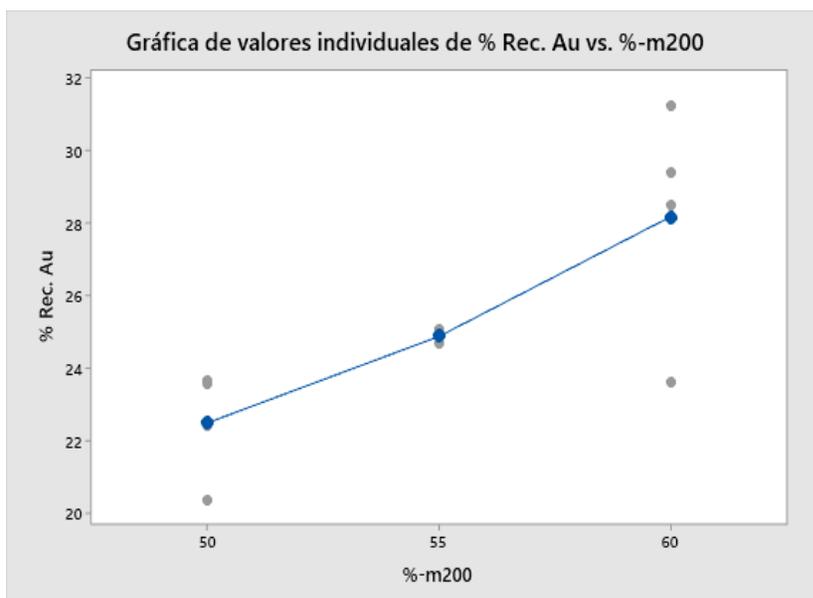
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
%-m200	2	65.26	32.630	5.83	0.032
Error	7	39.19	5.598		
Total	9	104.45			

NOTA. Data del Software MINITAB 20

**Tabla 46***Resumen del modelo*

%-m200	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
50	4	22.500	1.539	(19.703; 25.297)
55	2	24.890	0.297	(20.934; 28.846)
60	4	28.20	3.27	(25.40; 30.99)

NOTA: Data del Software MINITAB 20 (Desv.Est. agrupada = 2.36600)

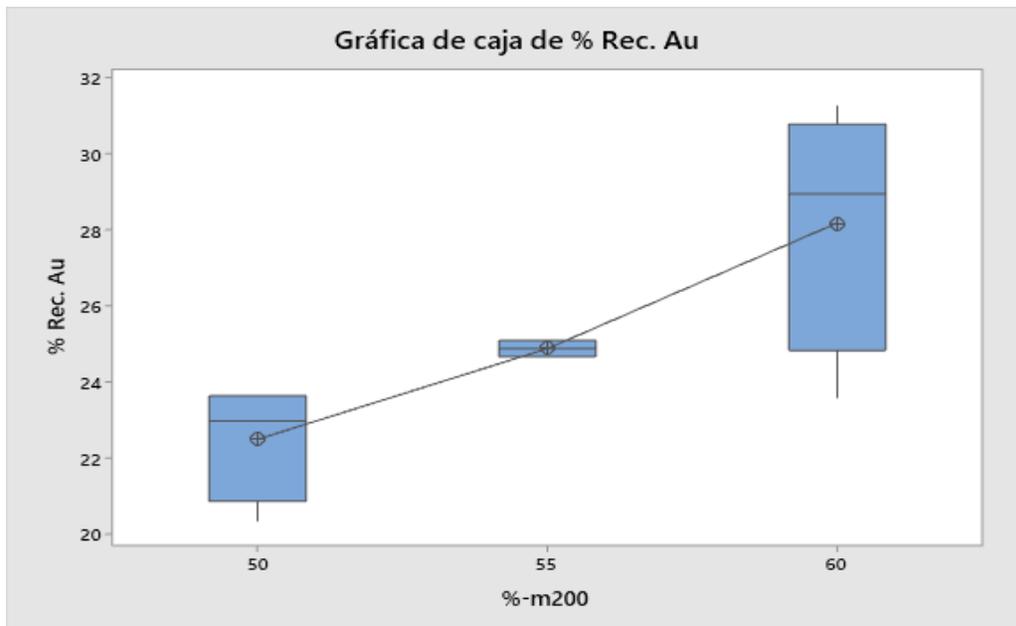
**Figura 39***Valores individuales de recuperación vs %-m200*

Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de valores individuales revela una mediana dispersión en los datos en %-m200 60% mientras que 50% muestra menor variabilidad.

**Figura 40**

*Gráfica de cajas de recuperación vs %-m200*



NOTA: Data del Software MINITAB 20

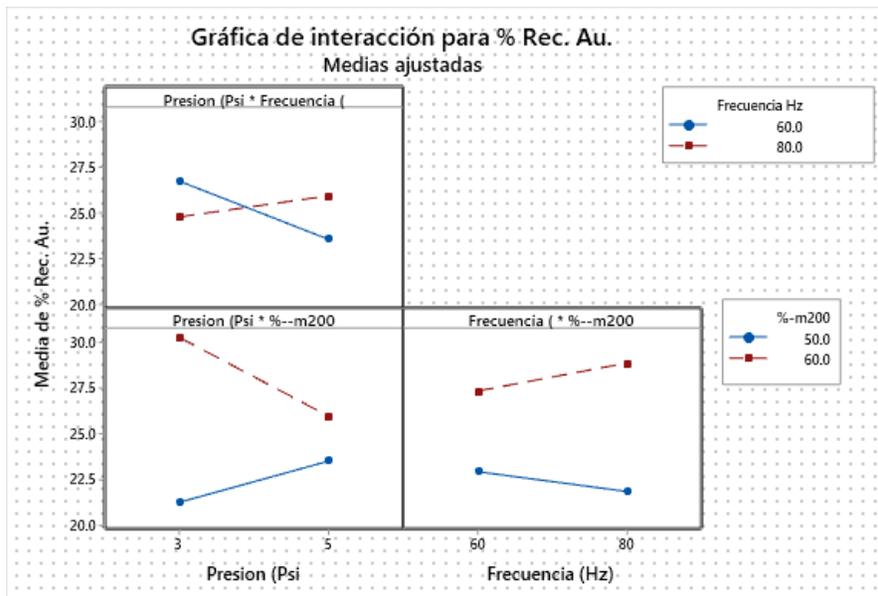
Esta gráfica de caja confirma la tendencia máxima ascendente lo cual indica que esta variable es más significativa para la recuperación de oro

### ***6.1.3 Análisis de los Efectos de las Interacciones en la Recuperación***

La Figura 41 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 41.

**Figura 41**

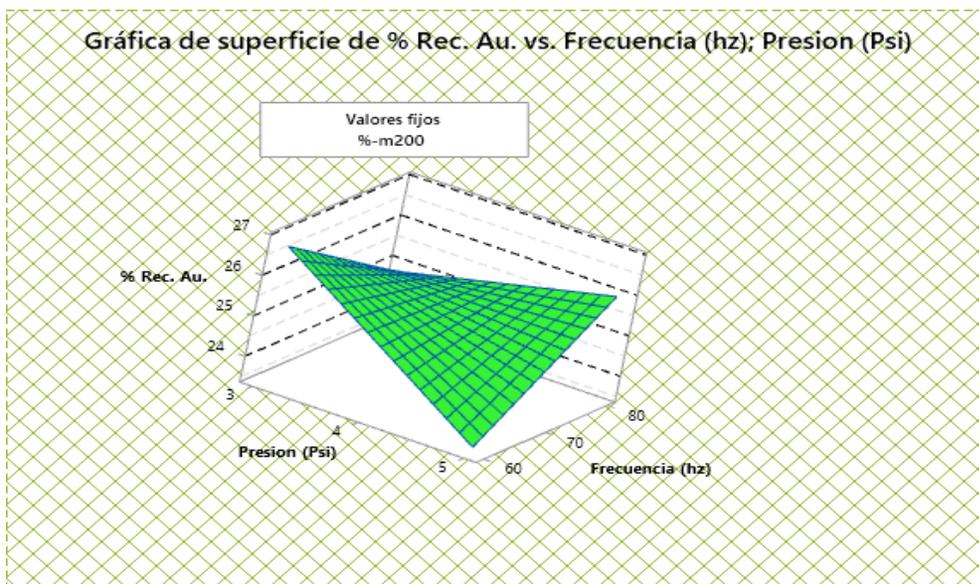
Gráfica de interacción para recuperación de Au



Nota: A: Presión (Psi), B: Frecuencia (Hz) C: Granulometría (%-m200). Elaborado en Minitab 20

**Figura 42**

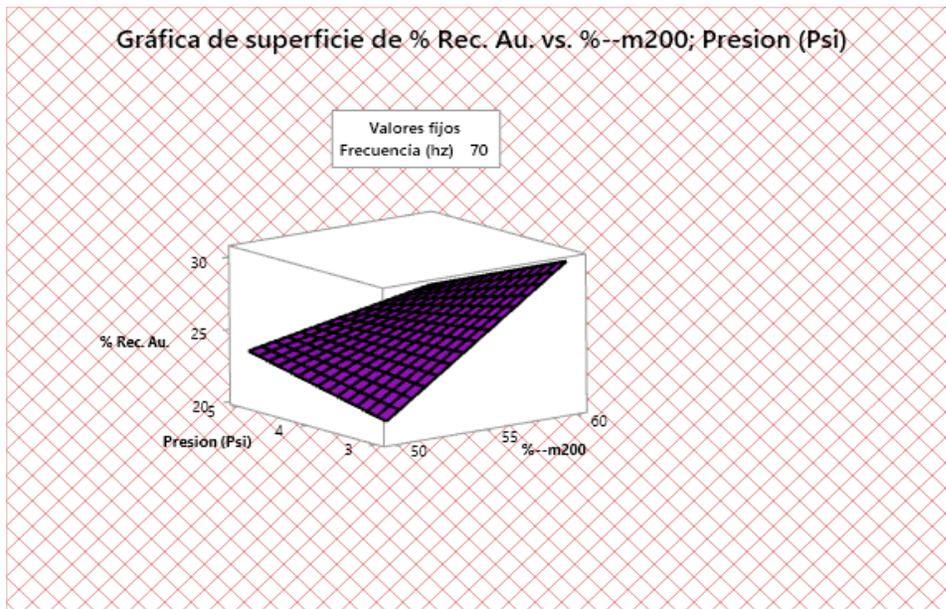
Gráfica de superficie de recuperación vs A: Presión (Psi), B: Frecuencia (Hz)



Nota: A: Presión (Psi), B: Frecuencia (Hz). Elaborado en Minitab 20

**Figura 43**

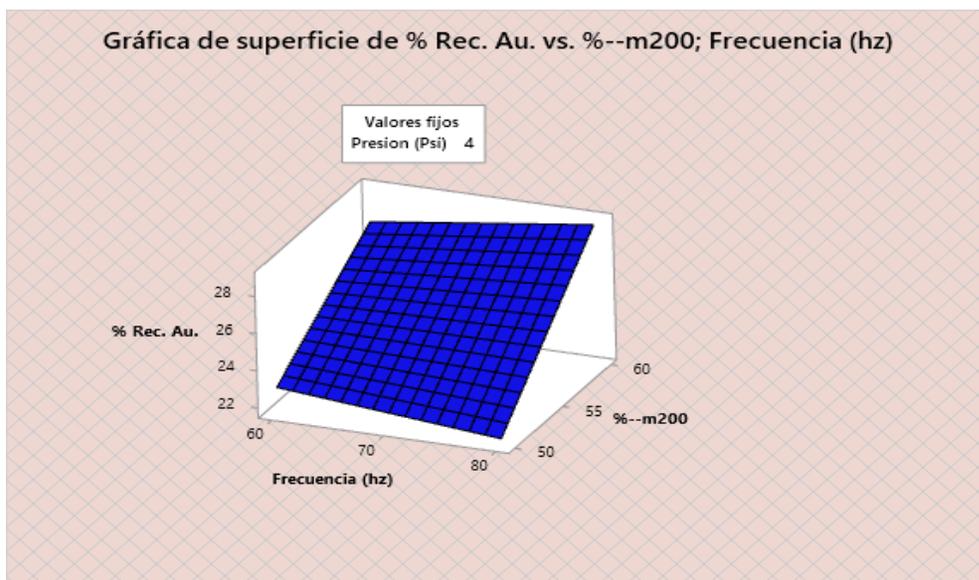
Gráfica de superficie de recuperación vs A: Presión (Psi), C: Granulometría (%-m200)



Nota: A: Presión (Psi), C: Granulometría (%-m200). Elaborado en Minitab 20

**Figura 44**

Gráfica de superficie de recuperación vs B: Frecuencia (Hz) C: Granulometría (%-m200)

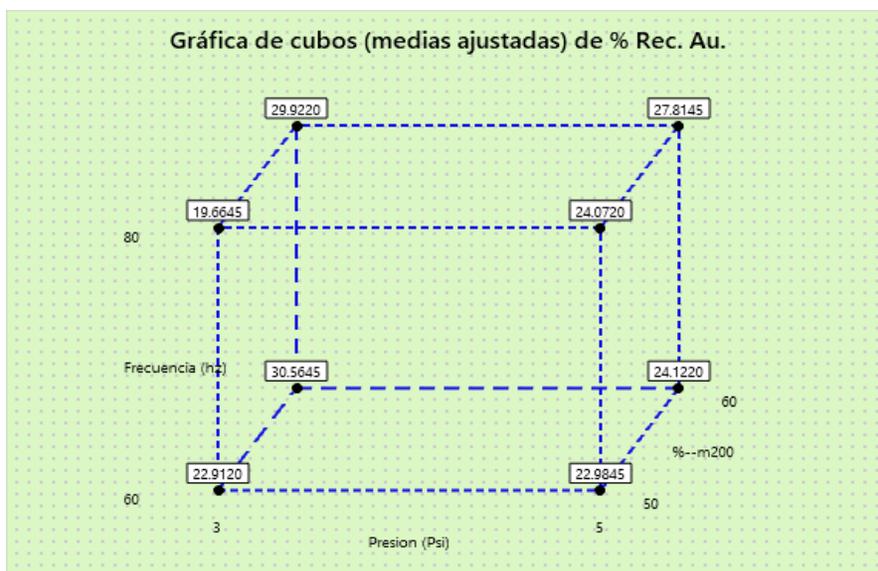


Nota: B: Frecuencia (Hz) C: Granulometría (%-m200). Elaborado en Minitab 20

La grafica 42, 43 y 44 se muestra el contorno que 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, morado y azul 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 45

*Gráfica de cubos (medias ajustadas) de recuperación de Au*



Nota. Data de Software MINITAB 20

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

La mayor recuperación (29.9220%) se obtiene bajo condiciones de: Presión 3Psi, Frecuencia 80Hz y con una granulometría 60 %-m200.

#### 6.1.4 Optimización de Respuesta: %Re

Sólo se consideran los puntos axiales y centrales al optimizar un modelo que incluye un término de punto central. Se realiza la prueba de optimización del proceso ya teniendo los parámetros más adecuados Presion de agua ejercida 3 Psi, la velocidad de rotación del cono 80 Hz, porcentaje de solido más optimo es de 50% y la granulometría adecuada para tener mayor recuperación es 60% -malla 200 siendo esta la variable con más significancia. Se pesa aproximadamente 15kg de mineral con los parámetros ya establecidos y se lleva a realizar la prueba de gravimetría en el concentrador falcon LB-40 donde se obtiene un concentrado y relave, este último se lleva a una prueba final de flotación para aumentar el porcentaje de recuperación.

#### Tabla 47

*Ecuación de regresión en unidades no codificadas*

$$\begin{aligned} \% \text{ Rec. Au} = & 4.1 + 9.82 \text{ Presion(Psi)} - 1.139 \text{ Frecuencia(Hz)} + 0.961 \% \text{-m200} \\ & + 0.1084 \text{ Presion(Psi)*Frecuencia(Hz)} - 0.3257 \text{ Presion(Psi)*\% -m200} \\ & + 0.01303 \text{ Frecuencia(Hz)*\% -m200} - 0.459 \text{ Pt Ctral} \end{aligned}$$

#### Tabla 48

*Parámetros*

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
% Rec. Au	Objetivo	20.36	30	31.26	1	1

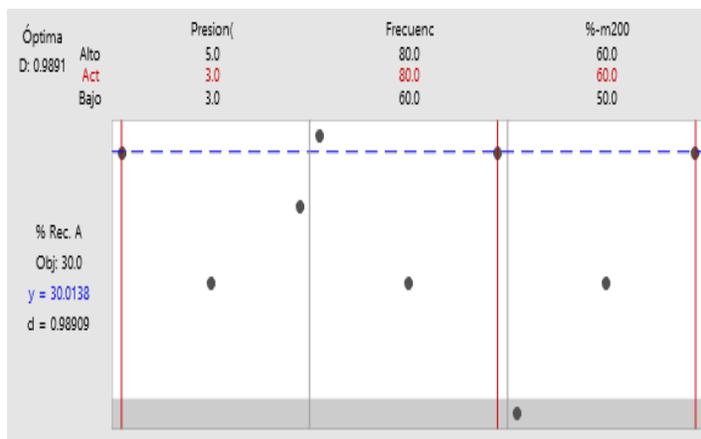
*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 49***Solución*

Solución	presión (Psi)	Frecuencia (Hz)	%-m200	% Rec. Au	Deseabilidad compuesta
1	3	80	60	30.0138	0.989087

*Nota:* Data de Software MINITAB 20**Tabla 50***Predicción de respuesta múltiple*

Variable	Valor de configuración			
Presión (Psi)	3			
Frecuencia (Hz)	80			
%-m200	60			
Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
% Rec. Au	30.01	1.15	(25.08; 34.95)	(22.79; 37.23)

*Nota:* Data de Software MINITAB 20**Figura 46***Gráfica de optimización de recuperación , según el modelo matemático**Nota:* Data de Software MINITAB 20

### 6.1.4.1 Prueba de Final de Proceso Gravimetría

**Tabla 51**

*Condiciones para el proceso*

Operación	Und.	Valor
<b>Molienda</b>		
Peso de la muestra	Kg	15
gravedad espezifca		2.83
% Solidos	%	50
Pass m -200 Ty	%	60
<b>Gravimetría</b>		
Peso de la muestra	Kg	10
Peso de la Pulpa	Kg	30,0
Presión	PSI	3
Frecuencia	Hz	80
Caudal	m3/hr	2.3

Elaboración propia

**Tabla 52**

*Balance metalúrgico proceso de gravimetría*

Producto	Peso (gr)	Peso (%)	Ley gr/t Au	Ley Fino Au	%Recupera- ción
Cabeza ens.			2.24		
Conc. Gravimétrico	708.50	4.7	15.31	0.011	29.85
Rve Final	14238.00	95.3	1.81	0.025	70.15
Cabeza calc	14946.5	100.0	2.25	0.036	100.00

*Nota:* Elaboración propia

## CAPÍTULO VII

### DESARROLLO EXPERIMENTAL II

#### 7.1 Prueba Experimental Proceso de Flotación

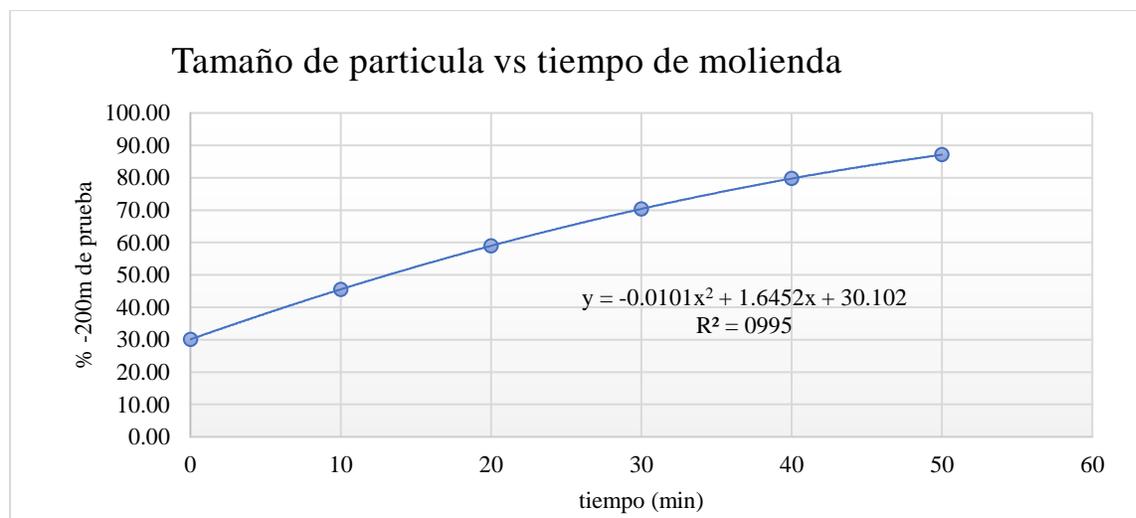
##### 7.1.1 Trabajos Preliminares

##### 7.1.1.1 Determinación de Curva de Moliendabilidad para la Prueba de Flotación

Para la prueba de flotación se requiere según las variables reales tener una granulometría de 80% -200m, 85% -200m y 90% -200m esta granulometría se determinará según la ecuación ya obtenida en la siguiente gráfica:

**Figura 47**

*Tamaño de partícula vs tiempo de molienda*



NOTA: Grafica de tamaño de partícula vs tiempo de molienda para obtener el modelo matemático

**Tabla 53***Determinación de tiempo faltante para la prueba de flotación*

Malla	% -200m	Tiempo flotacion (seg)	Tiempo Rlv grav. (seg)	Tiempo Faltante (seg)
80 % -200m	50	40min 18 seg	20 min 48 seg	19 min 30 seg
85 % -200m	55	66min 48seg	20 min 48 seg	26 min 00 seg
90 % -200m	60	54min 54seg	20 min 48 seg	34 min 06 seg

NOTA: Elaboración propia

**7.1.1.2 Molienda para la Prueba de Flotación**

Luego de realizar las moliendas de 20kg respectivas para obtener 80%, 85% y 90% - m200 este producto se realizó una flotación ROUGHER- SCAVENGER de acuerdo las variables definidas para cada prueba dentro del diseño factorial.

**7.1.2 Matriz del Diseño**

Las pruebas de flotación se realizarán mediante un diseño factorial fraccionado  $\frac{1}{2}$  de 2 niveles y 4 factores  $2^4$  teniendo como mínimo de 8 pruebas, con un solo bloque sin repetición y 2 puntos centrales. Las variables a tomar en este proceso son como se muestran en la tabla N°

Antes de realizar las pruebas vamos a elegir las variables que más influirán en estas pruebas:

**Tabla 54***Variables y su codificación*

FACTOR	NOMBRE	TIPO	BAJO	ALTO
A	Sulfato de cobre	Numerico	-1	1
B	Z-6	Numerico	-1	1
C	AP-4037	Numerico	-1	1
D	%-m200	Numerico	-1	1

NOTA: En la tabla se muestra el Factor y variable con valores codificados.

**Tabla 55***Variables reales*

FACTOR	NOMBRE	TIPO	BAJO	ALTO
A	Sulfato de cobre	Numerico	35	40
B	Z-6	Numerico	18	24
C	AP-4037	Numerico	71	76
D	%-m200	Numerico	80	90

*NOTA:* En la tabla se muestra el Factor y variable con valores reales.

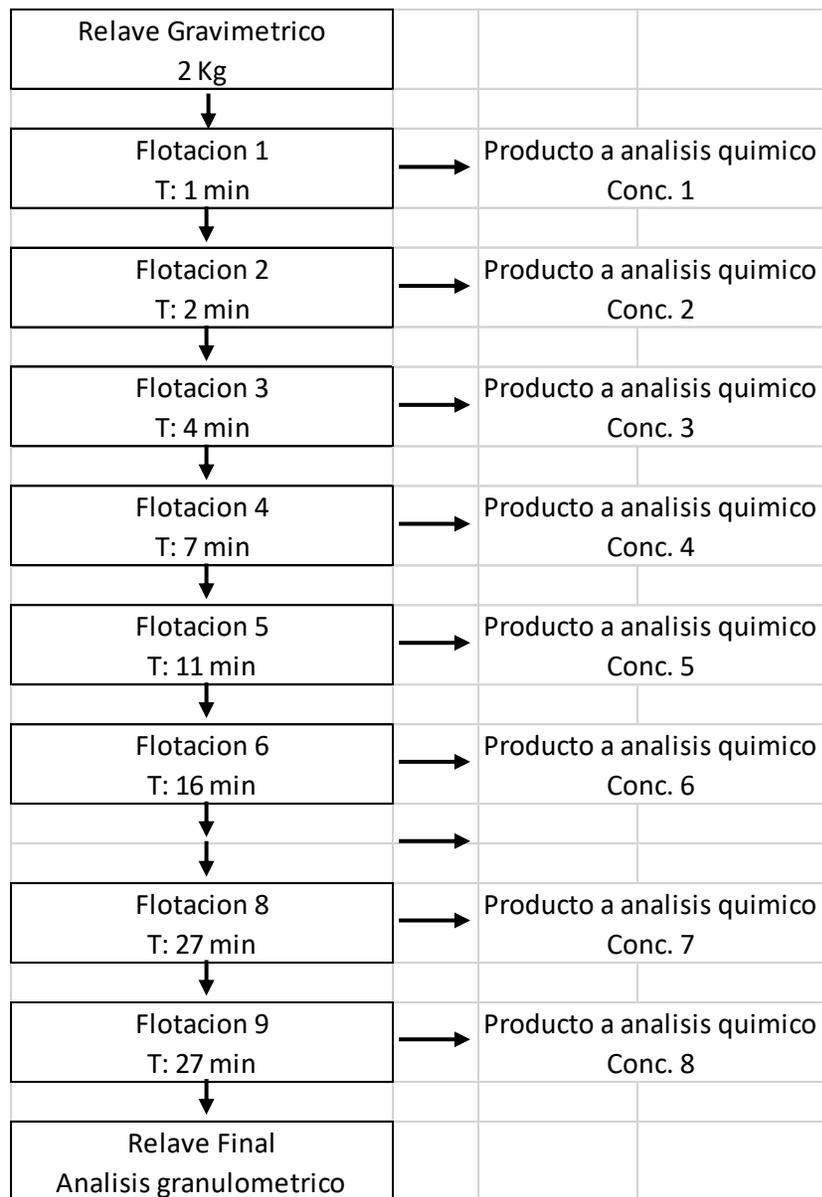
**Tabla 56***Condiciones para cada prueba*

Orden	Corrida	Pt. Central	Bloques	Sulfato de cobre	Z-6	AP-4037	%-m200
1		1	1	35	18	71	80
2		1	1	40	18	71	90
3		1	1	35	24	71	90
4		1	1	40	24	71	80
5		1	1	35	18	76	90
6		1	1	40	18	76	80
7		1	1	35	24	76	80
8		1	1	40	24	76	90
9		0	1	37.5	21	73.5	85
10		0	1	37.5	21	73.5	85

*NOTA:* En la tabla se muestra se muestra el orden de las corridas y las condiciones para cada prueba.

### **7.1.3 Pruebas de cinética de flotación**

La siguiente prueba se realizaron con la finalidad de establecer el tiempo para una óptima recuperación, lo cual fue remontado por medio de un factor que oscila entre 2 a 4 a nivel industrial. El resultado del tiempo óptimo fue cerca de 14.9 minutos.

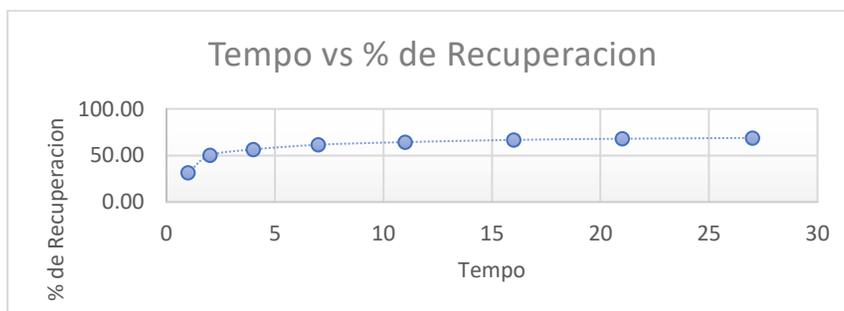
**Figura 48***Pruebas de Cinética de Flotación*

Nota: Esquema de flotación cinetica

**Tabla 57***Recuperación en función del tiempo*

Tiempo		30									
% Rec. Producto	Tiempo	69.08		Peso (g)		% Ley g Au/t		Contenido Metalico (g)		% Recupera- ción	
	Par- cial	T. Acum.	Parcial	Acum.		Parcial	Acum.	Parc.	Acum.	Par- cial	Acum.
Conc. 1	1	1	15.6	15.6	0.78	75.2	75.20	0.00	0.00	31.42	31.42
Conc. 2	1	2	29.6	45.2	1.48	23.66	41.45	0.00	0.00	18.76	50.18
Conc. 3	2	4	22.1	67.3	1.105	10.59	31.31	0.00	0.00	6.27	56.45
Conc. 4	3	7	27.4	94.7	1.37	6.91	24.25	0.00	0.00	5.07	61.52
Conc. 5	4	11	31.2	125.9	1.56	3.39	19.08	0.00	0.00	2.83	64.36
Conc. 6	5	16	32.9	158.8	1.645	2.69	15.69	0.00	0.00	2.37	66.73
Conc. 7	5	21	28.2	187	1.41	1.65	13.57	0.00	0.00	1.25	67.98
Conc. 8	6	27	22.8	209.8	1.14	1.4	12.25	0.00	0.00	0.86	68.83
Relave	-	-	1790.2	2000	89.51	0.65	1.87	0.00	0.00	31.17	100.00
Total			2000		100	1.87		0.00			

NOTA: Elaboración propia

**Figura 49***Tiempo vs % de Recuperación*

Nota: Grafica % de recuperación en función de tiempo Según el modelo de García Zúñiga.

**Tabla 58**

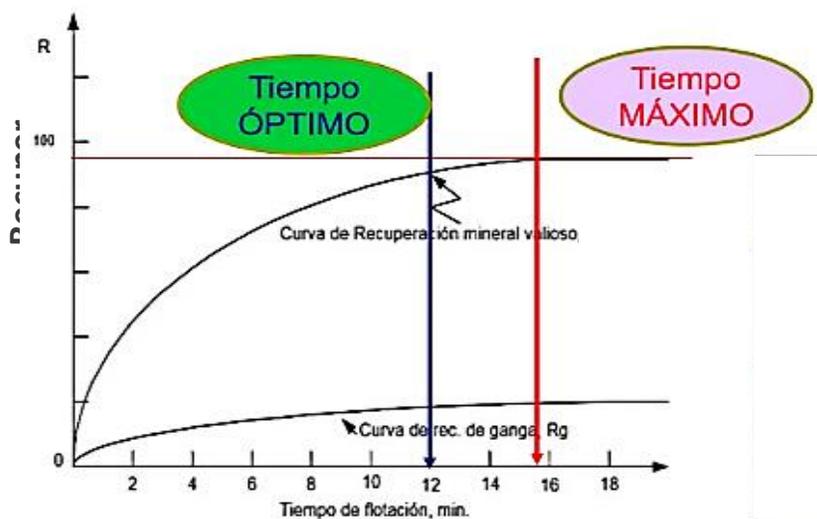
Constante para el modelo de Garcia zuñiga

K	0.51
Rmax	65.78
R2	0.95

NOTA: Elaboración propia

**Figura 50**

Curva de recuperacion



Fuente: Elaboración propia

**Figura 51**

Modelo cinetico Garcia Zuñiga

% Rec	Error
0.330780983	0.00027355
0.471137708	0.00094260
0.577426696	0.00016630
0.627909754	0.00016033
0.652545665	0.00008039
0.66601971	0.00000160
0.67809645	0.00010412
total	0.00177341

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 59***Tiempo Optimo para el Proceso de Flotacion*

Tiempo	14min. 54seg
% Rec.	81.25

NOTA: Elaboración propia

**7.1.4 Proceso de Flotación**

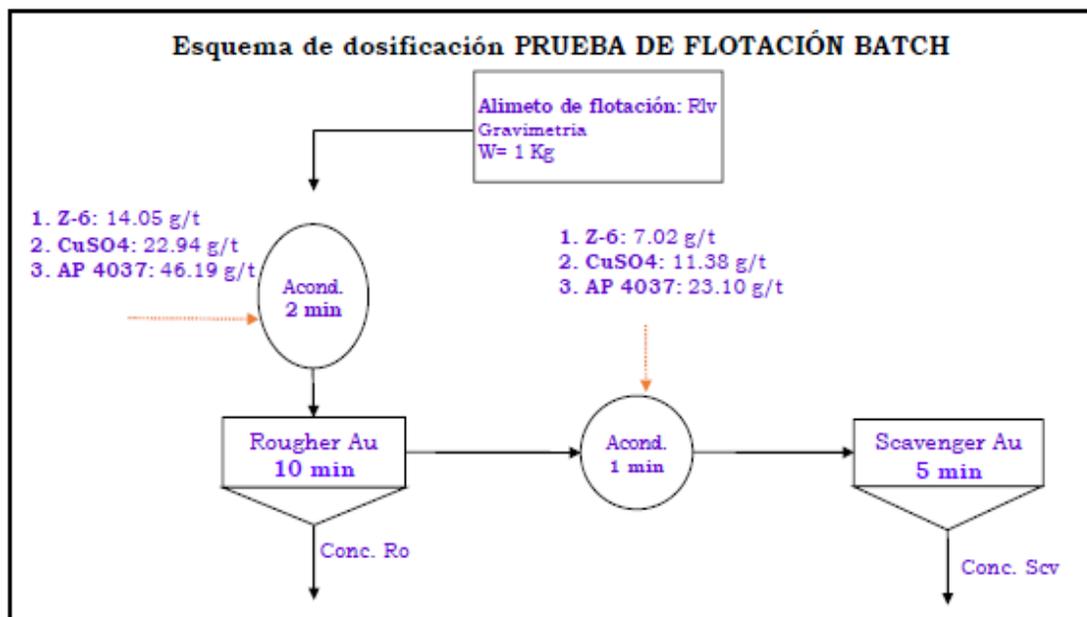
El desarrollo de la prueba de flotación ROUGHER- SCAVENGUER se realizó en el laboratorio de concentración de minerales en la escuela profesional de Ing. Metalúrgico de la UNSAAC.

evaluando 10 pruebas experimentales con dos puntos centrales, de acuerdo al diseño experimental establecido DFF (Diseño Factorial Fraccionado). Previo a la prueba de flotación se realizó la preparación de pulpa pesando 1 kg de mineral seco y un peso de agua de 2030 gr a un porcentaje de solido de 33% con una densidad de pulpa de 1260kg/lt colocamos la pulpa en el recipiente de la celda de flotación del Laboratorio Metalúrgico según el volumen requerido (2.5 L.) posterior a esto ubicamos el recipiente en el árbol de la celda de flotación, ajustando la altura del difusor a 2 cm de la base del recipiente.

Encendemos el variador de velocidad a 1050 rpm aproximadamente durante el tiempo de Acondicionamiento 0 minutos para el sulfato de cobre, 1 minuto para el zantato Z-6 y 4 minutos para la dosificación del AP-4037, Finalizado el tiempo de acondicionamiento, aumentar la velocidad a 1200 rpm durante el tiempo de flotación definido durante 10 minutos en la primera etapa de rougher y 5 minutos en la flotacion scavenger con 30 paletadas por minuto

Figura 52

Esquema de dosificación de prueba de flotación Batch



Fuente: Elaboración propia

### Prueba de flotación N° 01

**Tabla 60**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°01*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	80-90
pH		6.5

Nota: Elaboración propia

**Tabla 61***Condiciones operativas y dosificación N°01*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	min	0	23.33		
	min	1		12	
	min	2			47.33
Flotación	min	10			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	min	0	11.67		
	min	0.5		6	
	min	1			23.67
Flotación	min	5			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Nota: Elaboración propia

**Tabla 62***Balance metalúrgico N°01*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	G	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	41.3	4.15	16.47	0.0007	49.51	49.51
Conc. Scavenger	20.4	2.05	4.28	0.0001	6.36	55.87
Relave	932.8	93.80	0.65	0.0006	44.13	100.00
Cabeza Calculada	994.5	100.00	1.83	0.0014	100.00	

Fuente: Elaboración propia

**Prueba de flotación N° 02****Tabla 63**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N° 02*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	90
pH		6.5

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 64**

*Condiciones operativas y dosificación N°02*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	min	0	26.67		
	min	1		12	
	min	2			47.33
Flotación	min	10			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	min	0	13.33		
	min	0.5		6	
	min	1			23.67
Flotación	min	5			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

NOTA: Elaboración propia

**Tabla 65***Balance metalúrgico N°02*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	g	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	37.2	3.72	25.32	0.0009	55.16	55.16
Conc. Scavenger	19.3	1.93	10.88	0.0002	12.29	67.45
Relave	942.3	94.34	0.59	0.0006	32.55	100.00
Cabeza Calculada	998.8	100.00	1.85	0.0017	100.00	

NOTA: Elaboración propia

**Prueba de flotación N° 03****Tabla 66***Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°03*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	90
pH		6.5

Nota: Elaboración propia

**Tabla 67***Operación con reactivos N°03*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	min	0	23.33		
	min	1		16	
	min	2			47.33
Flotación	min	10			
Velocidad de agitación	Rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	min	0	11.67		
	min	0.5		8	
	min	1			23.67
Flotación	min	5			
Velocidad de agitación	Rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Nota: Elaboración propia

**Tabla 68***Balance metalúrgico N°03*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	G	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	58.3	5.85	11.92	0.0007	53.04	53.04
Conc. Scavenger	41.1	4.12	2.08	0.0001	6.54	59.58
Relave	897.7	90.03	0.59	0.0005	40.42	100.00
Cabeza Calculada	997.1	100.00	1.79	0.0013	100.00	

Nota: Elaboración propia

### Prueba de flotación N° 04

**Tabla 69**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°04*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	80
pH		6.5

Fuente: elaboración propia

**Tabla 70**

*Condiciones operativas y dosificación N°04*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	Min	0	26.67		
	Min	1		16	
	Min	2			47.33
Flotación	Min	10			
Velocidad de agitación	Rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	min	0	13.33		
	min	0.5		8	
	min	1			23.67
Flotación	min	5			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Fuente: elaboración propia

**Tabla 71***Balance metalúrgico N°04*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	G	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	71.4	7.16	4.53	0.0003	43.20	43.20
Conc. Scavenger	56	5.61	2.01	0.0001	15.01	58.21
Relave	870.1	87.23	0.36	0.0003	41.79	100.00
Cabeza Calculada	997.5	100.00	1.85	0.0007	100.00	

Nota: Elaboración propia

**Prueba de flotación N° 05****Tabla 72**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°05*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	90
pH		6.5

Fuente: elaboración propia

**Tabla 73***Condiciones operativas y dosificación N°05*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	Min	0	23.33		
	Min	1		12	
	Min	2			50.67
Flotación	Min	10			
Velocidad de agitación	Rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	Min	0	11.67		
	Min	0.5		6	
	Min	1			25.33
Flotación	Min	5			
Velocidad de agitación	Rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Fuente: elaboración propia

**Tabla 74***Balance metalúrgico N°05*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	G	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	76.1	7.62	7.44	0.0006	49.95	49.95
Conc. Scavenger	41.9	4.20	3.66	0.0002	13.53	63.48
Relave	880.3	88.18	0.47	0.0004	36.52	100.00
Cabeza Calculada	998.3	100.00	1.86	0.0011	100.00	

Fuente: elaboración propia

**Prueba de flotación N° 06****Tabla 75**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°06*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	80
Ph		6.5

Nota: elaboración propia

**Tabla 76**

*Condiciones operativas y dosificación N°06*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	Min	0	26.67		
	Min	1		12	
	Min	2			50.67
Flotación	Min	10			
Velocidad de agitación	Rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	Min	0	13.33		
	Min	0.5		6	
	Min	1			25.33
Flotación	Min	5			
Velocidad de agitación	Rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Nota: Elaboración propia

**Tabla 77***Balance metalúrgico N°06*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	g	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	75.4	7.57	5.95	0.0004	47.51	47.51
Conc. Scavenger	47.8	4.80	2.51	0.0001	12.72	60.23
Relave	872.6	87.63	0.43	0.0004	39.77	100.00
Cabeza Calculada	995.8	100.00	1.82	0.0009	100.00	

Nota: Elaboración propia

**Prueba de flotación N° 07****Tabla 78**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°07*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	80
pH		6.5

Nota: Elaboración propia

**Tabla 79***Condiciones operativas y dosificación N°07*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	min	0	23.33		
	min	1		16	
	min	2			50.67
Flotación	min	10			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	min	0	11.67		
	min	0.5		8	
	min	1			25.33
Flotación	min	5			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Nota: Elaboración propia

**Tabla 80***Balance metalúrgico N°07*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	G	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	67	6.71	9.00	0.0006	49.73	49.73
Conc. Scavenger	20.9	2.09	3.87	0.0001	6.68	56.41
Relave	910.9	91.20	0.58	0.0005	43.59	100.00
Cabeza Calculada	998.8	100.00	1.79	0.0012	100.00	

Nota: Elaboración propia

**Prueba de flotación N° 08****Tabla 81**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°08*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	90
pH		6.5

Nota: Elaboración propia

**Tabla 82**

*Condiciones operativas y dosificación N°08*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	min	0	26.67		
	min	1		16	
	min	2			50.67
Flotación	min	10			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	min	0	13.33		
	min	0.5		8	
	min	1			25.33
Flotación	min	5			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Nota: Elaboración propia

**Tabla 83***Balance metalúrgico N°08*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	G	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	47.4	4.75	22.27	0.0011	59.94	59.94
Conc. Scavenger	43.1	4.32	3.94	0.0002	9.63	69.57
Relave	908.3	90.94	0.59	0.0005	30.43	100.00
Cabeza Calculada	998.8	100.00	1.8	0.0018	100.00	

Nota: Elaboración propia

**Prueba de flotación N° 09****Tabla 84***Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°09*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	85
pH		6.5

Nota: Elaboración propia

**Tabla 85***Condiciones operativas y dosificación N°09*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	min	0	25.00		
	min	1		12	
	min	2			49
Flotación	min	10			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	min	0	12.5		
	min	0.5		6	
	min	1			24.5
Flotación	min	5			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Nota: Elaboración propia

**Tabla 86***Balance metalúrgico N°09*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	G	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	63.4	6.34	8.12	0.0005	54.13	54.13
Conc. Scavenger	92.6	9.26	0.79	0.0001	7.72	61.85
Relave	843.9	84.40	0.43	0.0004	38.15	100.00
Cabeza Calculada	999.9	100.00	1.81	0.0010	100.00	

Nota: Elaboración propia

**Prueba de flotación N° 10****Tabla 87**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°10*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lt	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	85
pH		6.5

Nota: Elaboración propia

**Tabla 88**

*Condiciones operativas y dosificación N°10*

Operación	Und.	Valor	Reactivos g/t		
			CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>					
Acondicionamiento 1	min	0	25.00		
	min	1		14	
	min	2			49
Flotación	min	10			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			
<i>Scavenger</i>					
Acondicionamiento	min	0	12.5		
	min	0.5		7	
	min	1			24.5
Flotación	min	5			
Velocidad de agitación	rpm	1200			
# Paletas	cant.	30			

Nota: Elaboración propia

**Tabla 89***Balance metalúrgico N°10*

Producto	Peso g		Contenido Metalico (g)		% Recuperación	
	G	%	Ley (g/t)	Parcial (g)	Parcial	Acumulado
Cabeza Analizada	1000					
Conc. Rougher	34.3	3.44	16.06	0.0006	53.89	53.89
Conc. Scavenger	27.4	2.75	3.19	0.0001	8.56	62.45
Relave	936.3	93.82	0.41	0.0004	37.55	100.00
Cabeza Calculada	998	100.00	1.85	0.0010	100.00	

Fuente: elaboración propia

## CAPITULO VIII

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS II

## 8.1 Evaluación Estadística

Tabla 90

*Resultados obtenidos para cada prueba*

Orden Co- rrida	PtCentral	Bloques	Sulfato de cobre	Z-6	AP-4037	%-m200	% Rec. Au
1	1	1	35	18	71	80	55.87
2	1	1	40	18	71	90	67.45
3	1	1	35	24	71	90	59.58
4	1	1	40	24	71	80	58.21
5	1	1	35	18	76	90	63.48
6	1	1	40	18	76	80	60.23
7	1	1	35	24	76	80	56.41
8	1	1	40	24	76	90	69.57
9	0	1	37.5	21	73.5	85	61.85
10	0	1	37.5	21	73.5	85	62.45

Nota: Elaboración Propia

## 8.1.1 Análisis de Datos

Mediante los resultados obtenidos realizamos el análisis estadístico para hallar las significancias de las variables involucradas, usaremos la regresión factorial en minitab:

Regresión factorial: %Re vs. Sulfato de cobre; Z-6; AP-4037; %-m200; PtCentral

**Tabla 91***Coefficientes codificados*

Término	Efecto	Coef	coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		61.350	0.150	409.00	0.002	
sulfato de cobre	5.030	2.515	0.150	16.77	0.038	1.00
z-6	-0.815	-0.408	0.150	-2.72	0.225	1.00
AP-4037	2.145	1.072	0.150	7.15	0.088	1.00
%-m200	7.340	3.670	0.150	24.47	0.026	1.00
sulfato de cobre*z-6	0.865	0.432	0.150	2.88	0.213	1.00
sulfato de cobre*AP-4037	-0.075	-0.038	0.150	-0.25	0.844	1.00
sulfato de cobre*%-m200	1.950	0.975	0.150	6.50	0.097	1.00
Pt Ctral		0.800	0.335	2.39	0.253	1.00

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

En la tabla N°92 podemos ver que la variable sulfato de cobre tiene un valor p de 0.038, lo que sugiere que es estadísticamente significativo e indica que un aumento en esta variable está asociado con un aumento en la variable dependiente, así como la variable %-m200 tiene un valor p de 0.026, también significativo. Mientras que las variables z-6 y AP- 4037 Tienen un coeficiente negativo, ya que el valor p es 0.225 y 0.088 respectivamente, lo que indica que no es estadísticamente significativo.

La interacción sulfato de cobre con z-6 tiene un valor p de 0.213, lo que sugiere que no es significativa.

La interacción sulfato de cobre con AP-4037 no es significativa debido al valor p de 0.844.

La interacción sulfato de cobre con %-m200 tiene un valor p de 0.097, lo que indica que es marginalmente significativa.

**Tabla 92***Análisis de varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	179.020	22.378	124.32	0.069
Lineal	4	168.883	42.221	234.56	0.049
sulfato de cobre	1	50.602	50.602	281.12	0.038
z-6	1	1.328	1.328	7.38	0.225
AP-4037	1	9.202	9.202	51.12	0.088
%-m200	1	107.751	107.751	598.62	0.026
Interacciones de 2 términos	3	9.113	3.038	16.88	0.177
sulfato de cobre*z-6	1	1.496	1.496	8.31	0.213
sulfato de cobre*AP-4037	1	0.011	0.011	0.06	0.844
sulfato de cobre*%-m200	1	7.605	7.605	42.25	0.097
Curvatura	1	1.024	1.024	5.69	0.253
Error	1	0.180	0.180		
Total	9	179.200			

*Nota:* (GL: Grados Libertad, SC Ajust: Suma cuadrados, MC Ajust: Cuadrado medio, F:

Distribución de probabilidad p: probabilidad). Dato del Software MINITAB 20 (Salazar & Del Castillo, 2018)

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 93, 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.

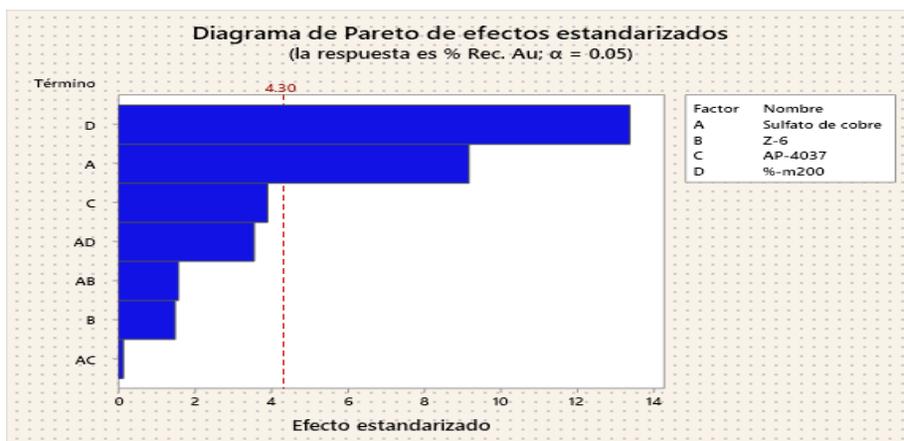
El modelo general tiene un (GL) 8 que indica uno por cada término del modelo, incluidas las interacciones y curvaturas, cuando sea mayor número de grados de libertad para el error suele implicar una estimación más precisa del error residual. (SC Ajust.) 179.020 es la variabilidad

total explicada por el modelo completo. (MC Ajust.): 22.378, que es la Suma de Cuadrados Ajustada dividida entre los grados de libertad. F: 124.32. Este es el cociente entre la variabilidad explicada por el modelo (SC Ajust.) y la variabilidad residual (Error). Un valor F alto sugiere que el modelo tiene un buen ajuste. Valor p: 0.069. Este valor p es mayor que 0.05, lo que indica que, en conjunto, el modelo no es estadísticamente significativo al 5% de nivel de significancia (aunque está muy cerca, lo que sugiere que el modelo puede ser marginalmente significativo). Observando los resultados de la interacción de los valores de la tabla 91, por consiguiente, nuestro modelo codificado al 95% de confianza será:

### 8.1.2 Diagrama de Pareto

#### Figura 53

*Diagrama de Pareto de los efectos*



*Nota:* (A: Sulfato de cobre B: Z-6, C: AP-4037, D: Granulometría (%-m200). 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.

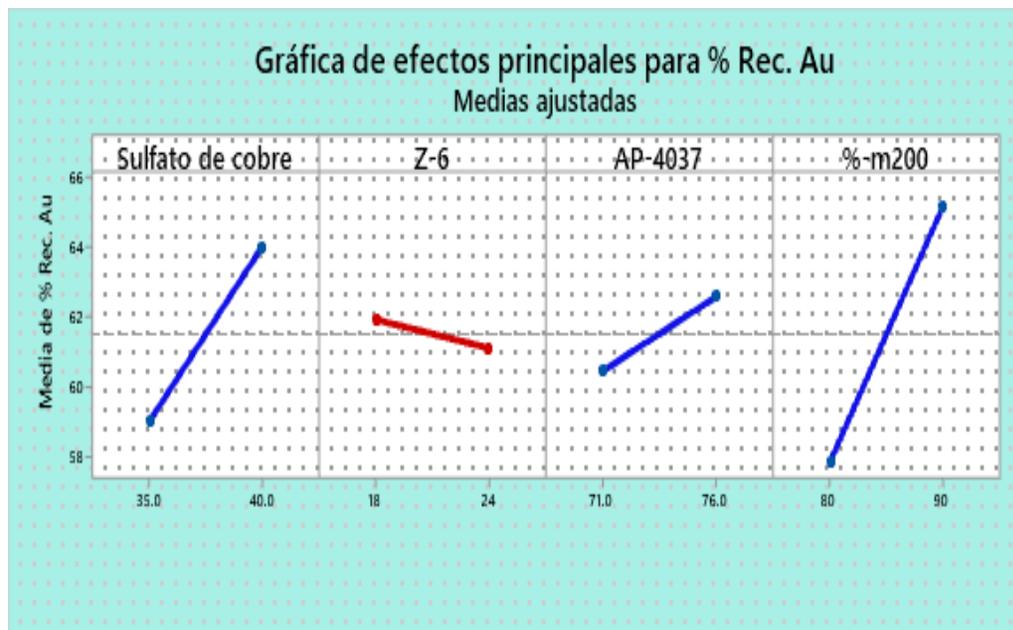
- Los efectos que sobrepasan esta línea son estadísticamente significativos.
- A (Sulfato de cobre) variable que pasa el umbral, por consiguiente, es una de las variables significativos
- B (Z-6) no alcanza el umbral de significancia lo que implica no ser significativo para el proceso de recuperación de oro.
- C (AP-4037) no alcanza el umbral de significancia lo que implica no ser significativo para el proceso de recuperación de oro.
- D (Granulometría %-m200). tiene el mayor efecto es relevantemente significativo
- AB, AD, AC y punto central no son estadísticamente significativos.

### ***8.1.3 Análisis de los Efectos Principales de cada Variable en la Recuperación***

En la Figura 52 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 (%-m200) y la dosificación de sulfato de cobre son más significativo que la dosificación del colector Z-6 y AP-4037

**Figura 54**

*Grafica de efectos principales para recuperación de Cu%*

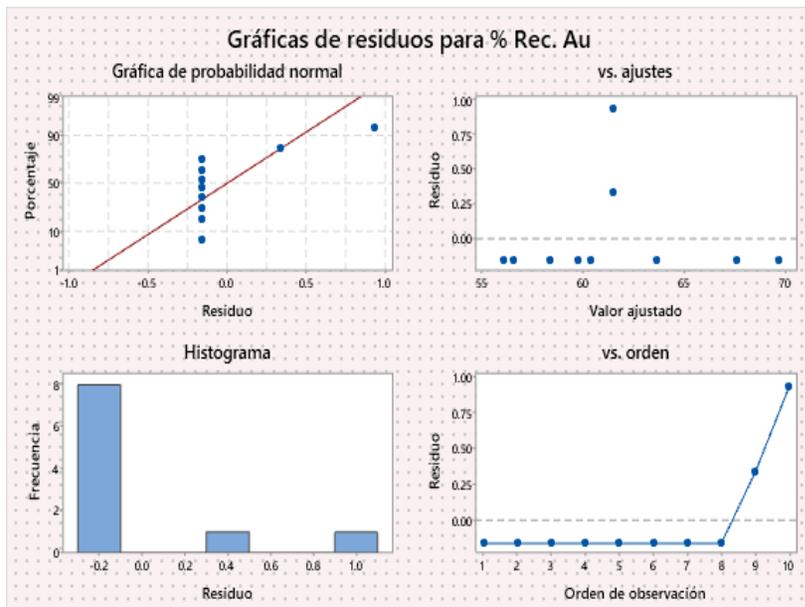


*Nota:* (A: Sulfato de cobre B: Z-6, C: AP-4037, D: Granulometría (%-m200)). 20

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 la variable %-m200 y la dosificación de sulfato de cobre tienen una pendiente positiva, lo cual nos dice que este interviene de forma directamente proporcional a nuestro factor de respuesta, el factor B: la dosificación del colector Z-6 es evidentemente negativa por lo que esta variable no es significativa en el proceso de obtención de oro por el proceso de gravimetría.

**Figura 55**

*Gráfica de residuos para porcentaje de recuperación*



*Nota:* (A: Sulfato de cobre B: Z-6, C: AP-4037, D: Granulometría (%-m200). 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

#### 8.1.4 Efecto de Variables Individuales

**Tabla 93**

*Análisis de varianza de sulfato de cobre*

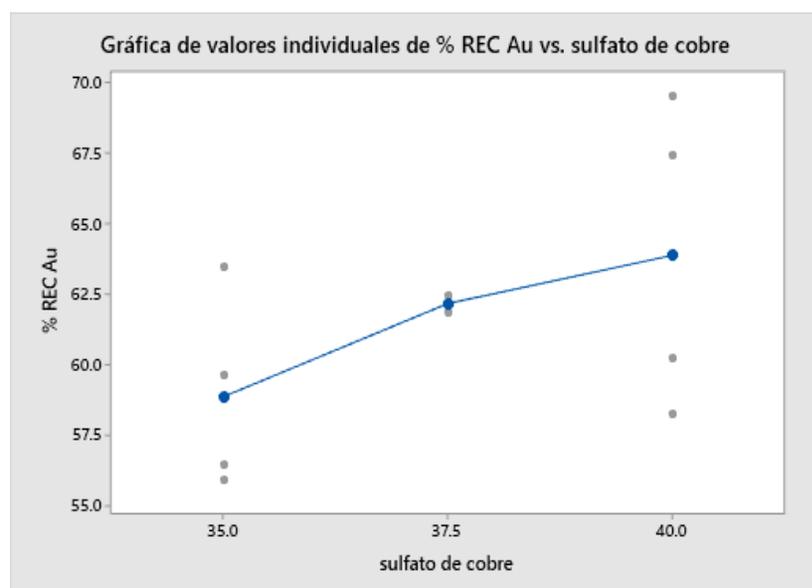
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
sulfato de cobre	2	51.63	25.81	1.42	0.304
Error	7	127.57	18.22		
Total	9	179.20			

*Nota.* Data del Software MINITAB 20

**Tabla 94***Resumen del modelo de dosificación*

Sulfato de cobre	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
35.0	4	58.83	3.50	(53.79; 63.88)
37.5	2	62.150	0.424	(55.012; 69.288)
40.0	4	63.86	5.50	(58.82; 68.91)

Nota. Data del Software MINITAB 20(Desv.Est. agrupada = 4.26906)

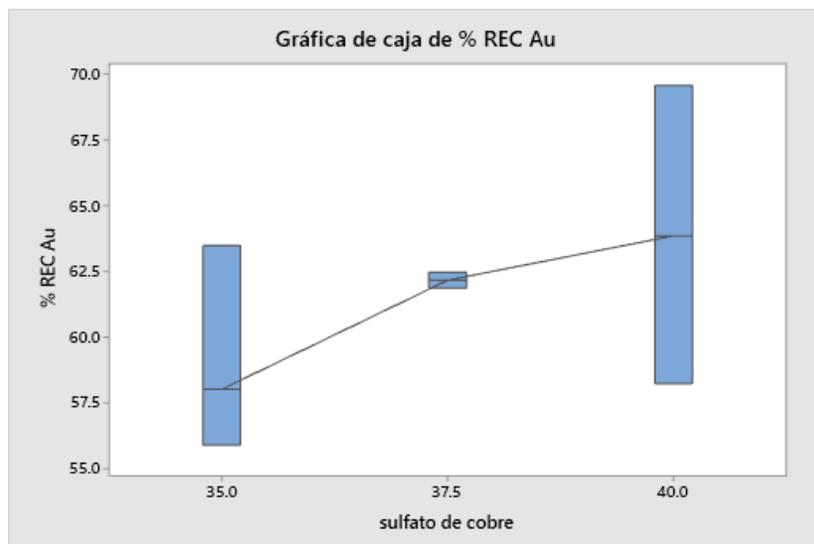
**Figura 56***Valores individuales de recuperación vs sulfato de cobre*

Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de valores individuales revela una mayor dispersión en los datos para la dosificación de sulfato de cobre en de 35 y 40g/T, mientras que 37.5g/T muestra menor variabilidad. es la variable más influyente en el proceso, por su preponderancia en el porcentaje de recuperación.

**Figura 57**

*Gráfica de cajas de recuperación con dosificación de sulfato de cobre*



Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de caja confirma la tendencia ascendente y muestra algunas asimetrías en la distribución de los datos, especialmente para la dosificación de sulfato de cobre en 35 y 40 lo que implica una significancia respecto a la recuperación.

**Tabla 95**

*Análisis de varianza de z-6*

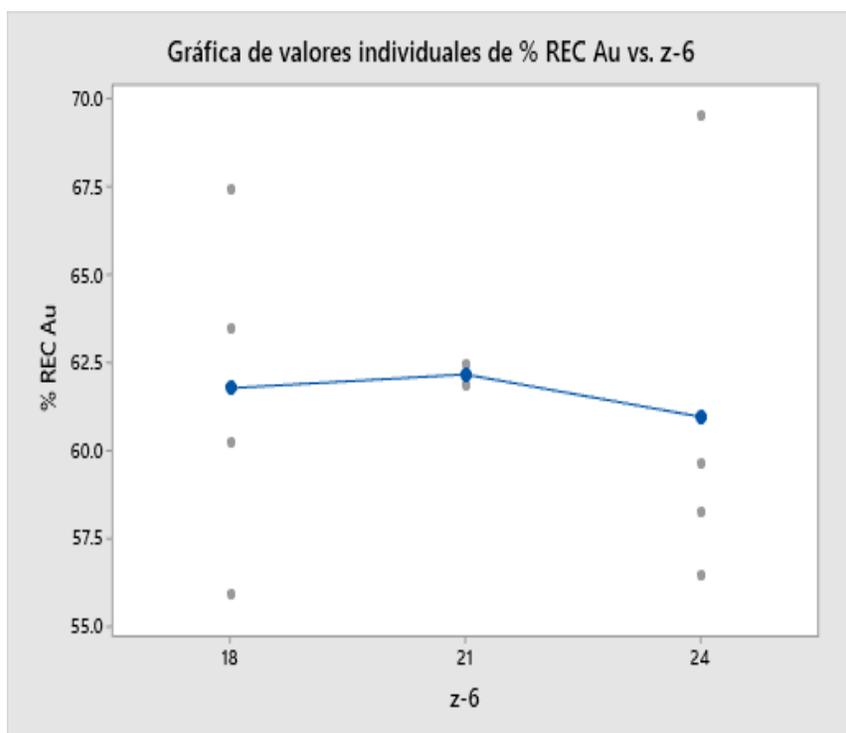
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
z-6	2	2.352	1.176	0.05	0.955
Error	7	176.848	25.264		
Total	9	179.200			

Nota. Data del Software MINITAB 20

**Tabla 96***Resumen del modelo de dosificación*

z-6	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
18	4	61.76	4.91	(55.81; 67.70)
21	2	62.150	0.424	(53.746; 70.554)
24	4	60.94	5.90	(55.00; 66.89)

Nota. Data del Software MINITAB 20(Desv.Est. agrupada = 5.02633)

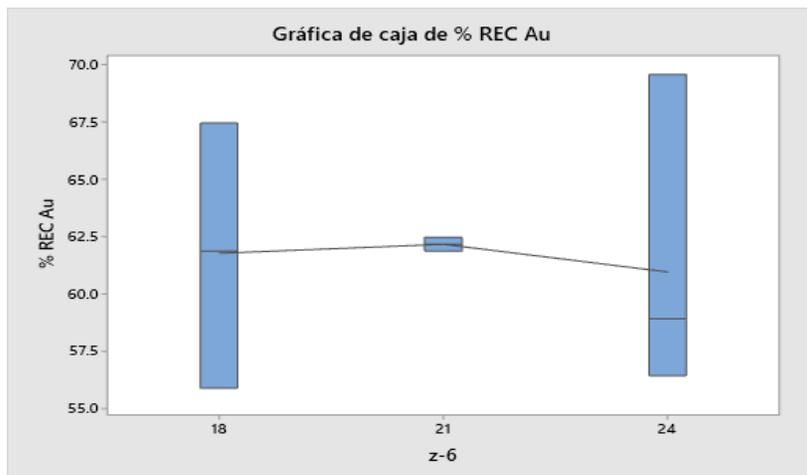
**Figura 58***Valores individuales de recuperación vs Z-6*

Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de valores individuales revela una mediana dispersión en los datos para la dosificación de Z-6 en de 18, 21 y 24g/T LA. La dosificación de Z-6 tuvo un ligero efecto en el porcentaje de recuperación.

**Figura 59**

Gráfica de cajas de recuperación con dosificación de Z-6



Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de caja confirma la tendencia descendente y muestra algunas asimetrías en la distribución de los datos, especialmente para la dosificación de z-6 en 18 y 24 g/t lo que implica no tener significancia respecto a la recuperación.

**Tabla 97**

Análisis de varianza de AP-4037

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
AP-4037	2	10.23	5.113	0.21	0.814
Error	7	168.97	24.139		
Total	9	179.20			

Nota. Data del Software MINITAB 20

**Tabla 98**

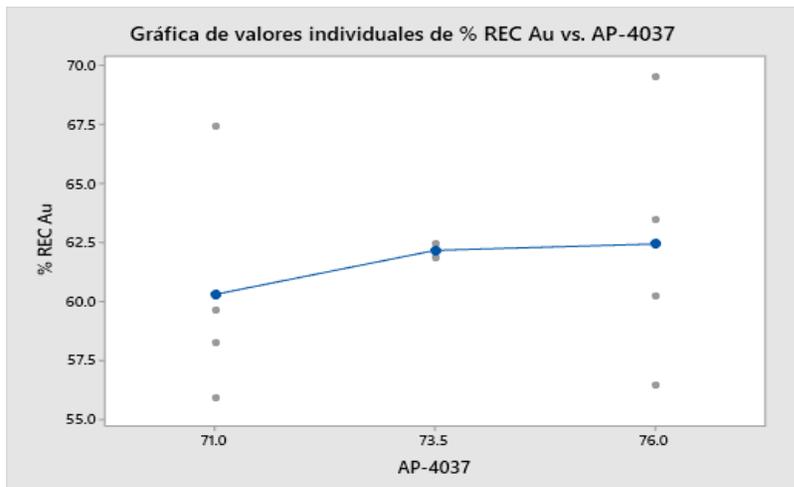
Resumen del modelo de dosificación

AP-4037	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
71.0	4	60.28	5.02	(54.47; 66.09)
73.5	2	62.150	0.424	(53.935; 70.365)
76.0	4	62.42	5.57	(56.61; 68.23)

Nota. Data del Software MINITAB 20 (Desv.Est. agrupada = 4.91316)

**Figura 60**

*Valores individuales de recuperación vs AP-4037*

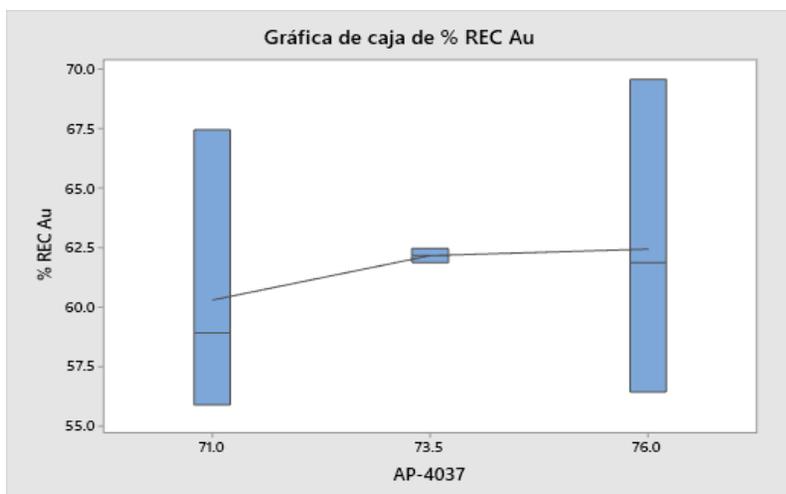


Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de valores individuales revela una gran dispersión en los datos para la dosificación de AP-4037 en de 71.0 y 76.0g/T. La dosificación de Z-6 tuvo un mínimo efecto en el porcentaje de recuperación, pero no es significativo estadísticamente.

**Figura 61**

*Gráfica de cajas de recuperación con dosificación de sulfato de cobre*



Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de caja confirma la tendencia ascendente mínima y muestra algunas asimetrías en la distribución de los datos, especialmente para la dosificación de AP-4037 en 71 y 76 g/t lo que implica no tener significancia respecto a la recuperación.

### Tabla 99

#### Análisis de varianza de %-m200

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
%-m200	2	108.78	54.39	5.41	0.038
Error	7	70.43	10.06		
Total	9	179.20			

Nota. Data del Software MINITAB 20

### Tabla 100

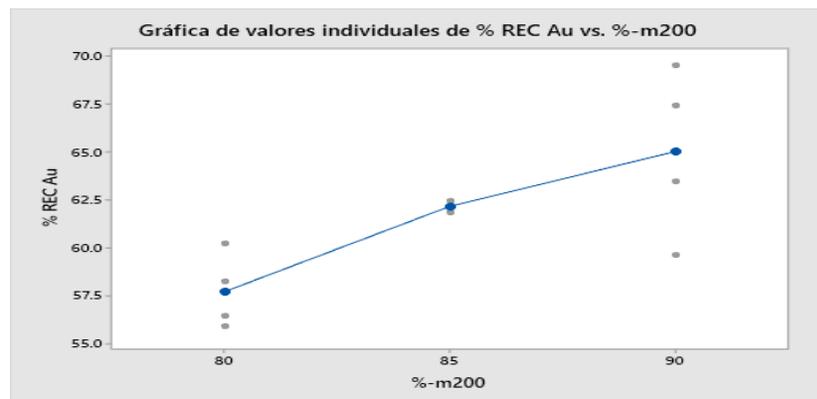
#### Resumen del modelo de %-m200

%-m200	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
80	4	57.680	1.973	(53.930; 61.430)
85	2	62.150	0.424	(56.847; 67.453)
90	4	65.02	4.42	(61.27; 68.77)

Nota. Data del Software MINITAB 20 (Desv.Est. agrupada = 3.17186)

### Figura 62

#### Valores individuales de recuperación vs %-m200

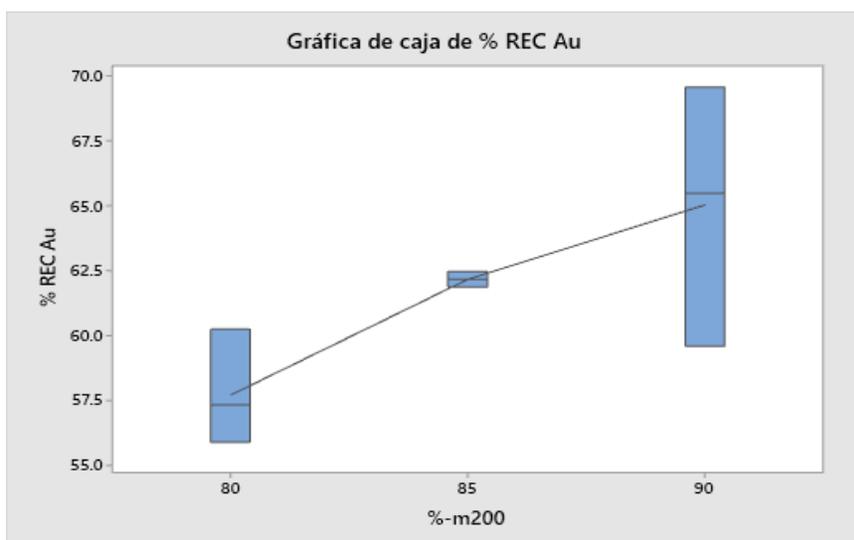


Nota. Data del Software MINITAB 20

Esta gráfica de valores individuales revela una mediana dispersión en los datos para %-m200 de 80%, mientras que 90% muestra mayor variabilidad. es la variable más influyente en el proceso, por su preponderancia en el porcentaje de recuperación.

### Figura 63

Gráfica de cajas de recuperación con %-m200



Nota. Data del Software MINITAB 20

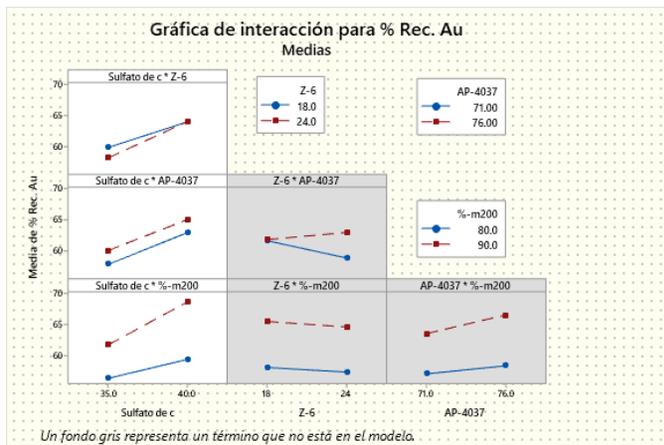
Esta gráfica de caja confirma la tendencia ascendente máxima y muestra algunas asimetrías en la distribución de los datos 90 % m-200, es la variable más influyente en el proceso, por su preponderancia en el porcentaje de recuperación.

#### 8.1.5 Análisis de los Efectos de las Interacciones en la Recuperación

La Figura x 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 62.

**Figura 64**

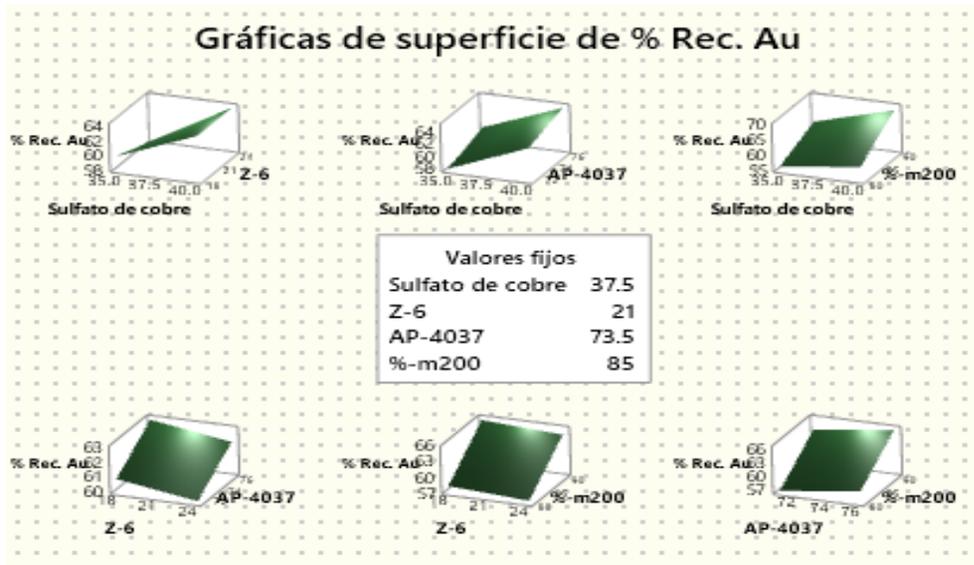
*Gráfica de interacción para recuperación de Au*



*Nota:* (A: Sulfato de cobre B: Z-6, C: AP-4037, D: Granulometría (%-m200 Minitab 20

**Figura 65**

*Gráfica de superficies para la recuperación de Au*



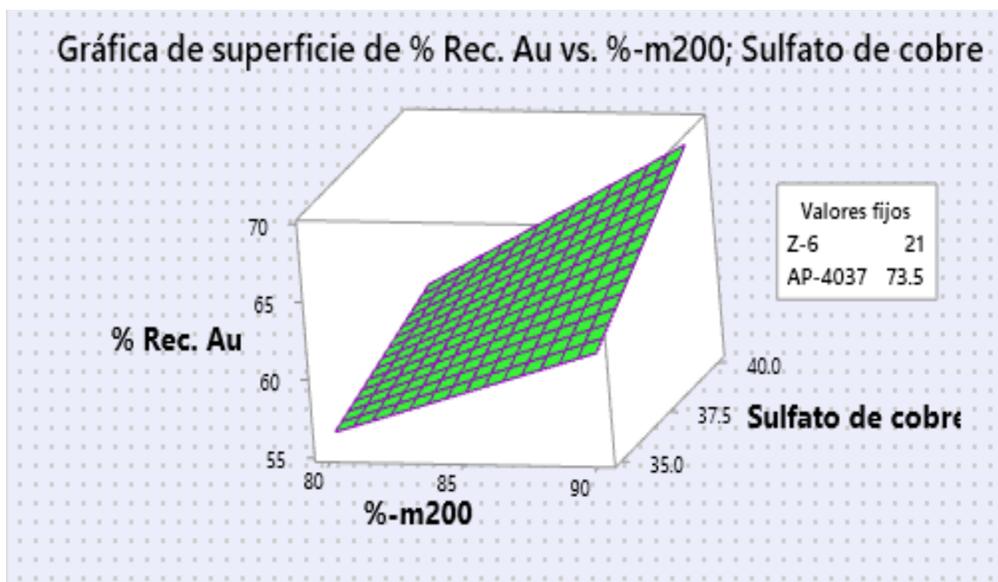
*Nota:* Data de Software MINITAB 20

La figura anterior a diferencia de grafica de contorno esta nos permite ver el comportamiento en conjunto de 4 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 oro.

### Figura 66

Gráfica de superficie de recuperación vs A: Sulfato de cobre, D: Granulometría (%-m200)

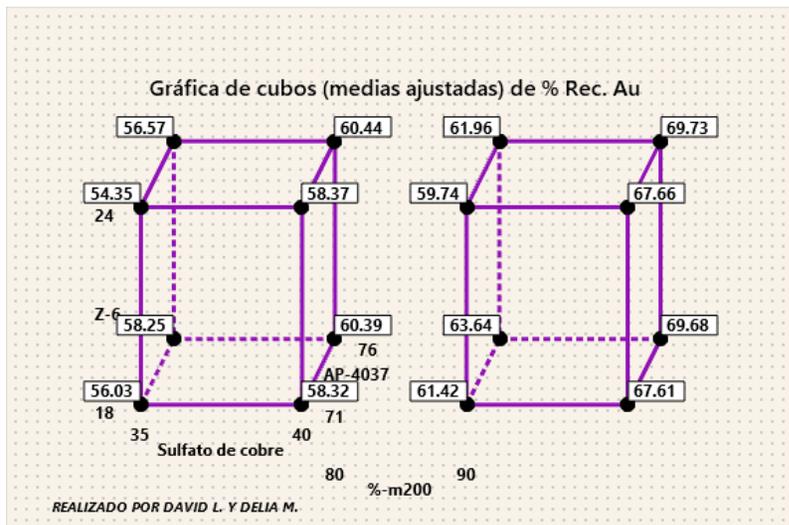


Nota: A: A: Sulfato de cobre, D: Granulometría (%-m200). Elaborado en Minitab 20

La grafica x se muestra el contorno que tiene como característica principal mostrar la interacción de dos factores de respuesta por medio de áreas coloreadas, siendo el color verde, 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 67**

Gráfica de cubos (medias ajustadas) de recuperación de Au



Nota. Data de Software MINITAB 20

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

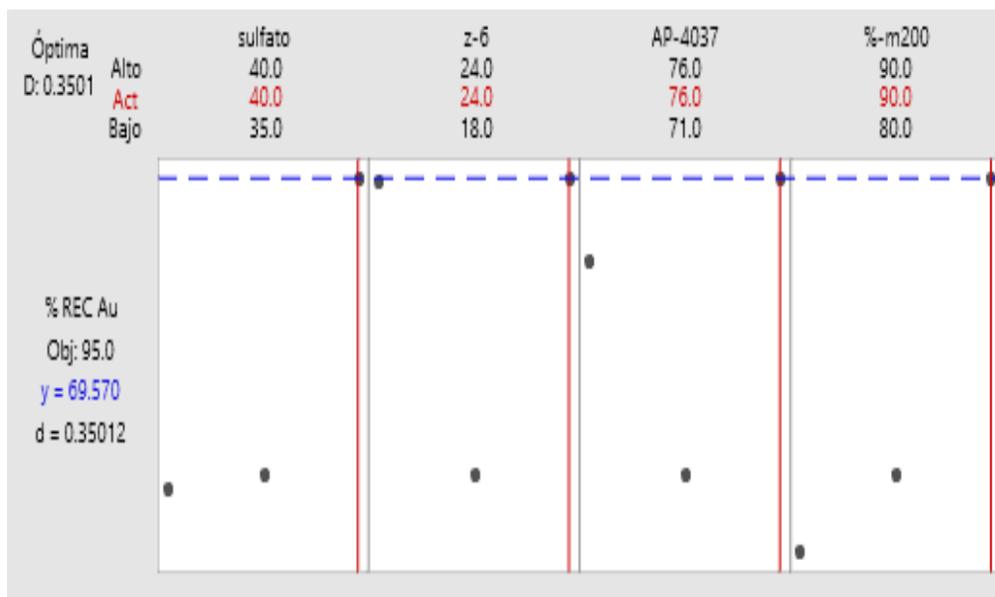
La mayor recuperación (69.73%) se obtiene bajo condiciones de: dosificación de z-6 24 g/t, AP-4037 de 76 g/t, sulfato de cobre 40 g/t y con una granulometría 90%-m200.

### 8.1.6 Optimización de Respuesta: %Re

Sólo se consideran los puntos axiales y centrales al optimizar un modelo que incluye un término de punto central.

**Figura 68**

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



*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 101**

*Ecuación de regresión en unidades no codificadas*

$$\begin{aligned} \% \text{Rec. Au} = & 210 - 6.39 \text{ sulfato de cobre} - 2.30 \text{ Z-6} + 0.65 \text{ AP-4037} - 2.191 \% \text{-M200} \\ & + 0.0577 \text{ sulfato de cobre} * \text{Z-6} - 0.0060 \text{ sulfato de cobre} * \text{AP-4037} \\ & + 0.0780 \text{ sulfato de cobre} * \% \text{-M200} \end{aligned}$$

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 102**

*Parámetros*

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
%Rec. Au	Objetivo	55.87	95	104.5	1	1

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 103***Solución*

Solución	Sulfato de cobre	Z-6	AP-4037	%-M200	%Rec. Au Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	40	24	76	90	69.73	0.354204

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 104***Predicción de respuesta múltiple*

Variable	Valor de configuración				
sulfato de cobre	40				
Z-6	24				
AP-4037	76				
%-M200	90				
Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%	
%Rec. Au	69.730	0.766	(66.434; 73.026)	(65.038; 74.422)	

*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.

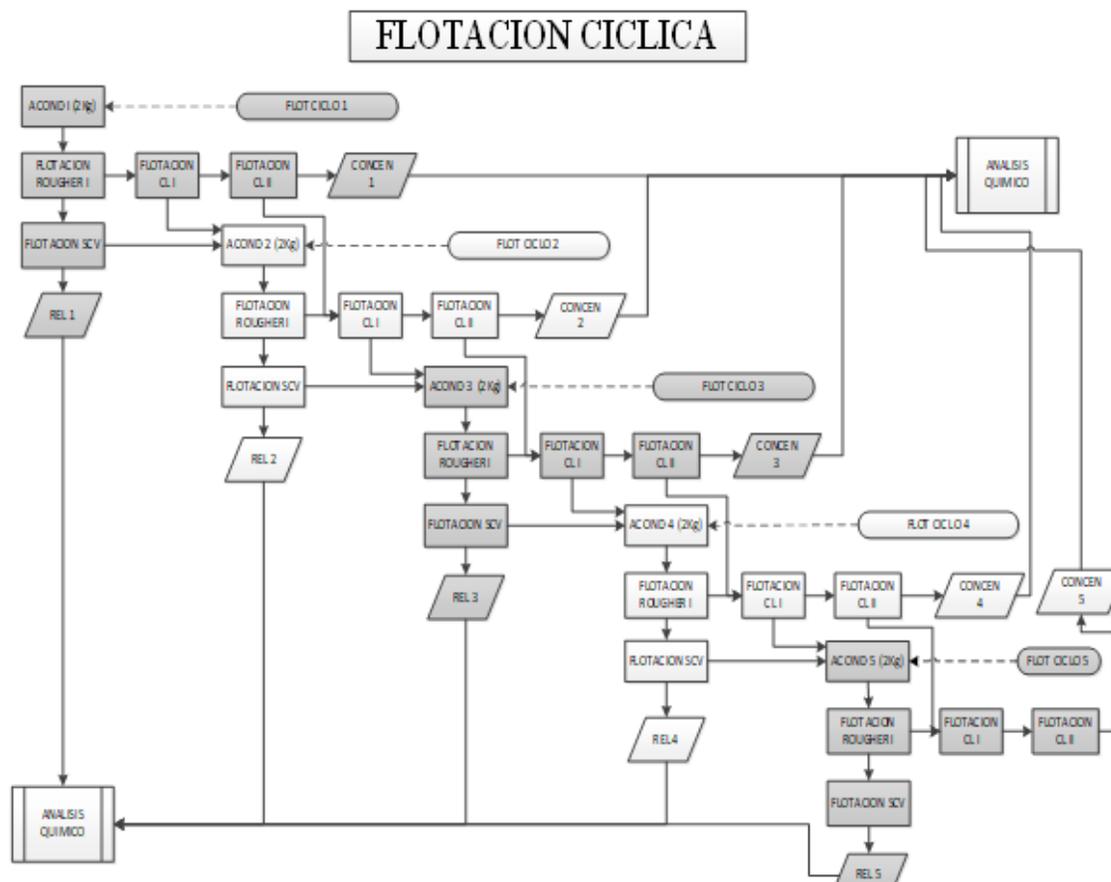
El modelo predice que el porcentaje de recuperación de oro (% REC Au) para las configuraciones dadas es 69.570%, con un error estándar pequeño (0.424), lo que indica un buen ajuste.

Si realizamos una predicción para una nueva observación bajo las mismas condiciones, podemos esperar que el valor del % REC Au esté en el rango de 61.946% a 77.194% con un 95% de confianza, lo que muestra un grado de incertidumbre asociado a las predicciones futuras.

Siempre se trata buscar de maximizar en la recuperación mediante el procedimiento de flotación de los minerales de oro del Yacimiento Constanza.

Según el diseño, la mayor recuperación de oro se logra con las variables de Granulometría 90% -200 malla, Dosificación de reactivos Z-6 24g/T, AP-4037 76g/T, sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) 40g/T las pruebas de flotación cíclicas o cerradas, se realizaron para simular un circuito continuo lo más parecido al tratamiento en Planta, consta de 5 ciclos el cual se tomaron las variables más significativas y los parámetros de optimización calculadas del diseño experimental. Causando que la semejanza es mayor a los resultados que se puedan obtener en Planta.

Se realiza la prueba de optimización del proceso ya teniendo los parámetros más adecuados. Se pesa aproximadamente 10kg de mineral seco a una densidad de 1260g/lit con un porcentaje de solido de 33% con un peso de 4000gr de agua

**Figura 69***Esquema de Flotacion ciclica*

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 105***Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones*

	Unidad	Cantidad
Peso Mineral	Kg	1
Densidad	g/lit	1260
% de solido	%	33
G. Especifica		2.83
% -m 200	%	90
pH		6.5

Fuente: elaboración propia

**Tabla 106***Condiciones operativas y dosificación*

Operación	Und.	Valor	pH	Reactivos g/t		
				CuSO4	Z-6	AP 4037
<i>Rougher</i>						
Acondicionamiento	Min	0	6,5	26.67		
	Min	1			16	
	Min	4				50.67
Flotación	Min	10				
Velocidad de agitación	Rpm	1200				
# Paletas	cant.	30				
<i>Scavenger</i>						
Acondicionamiento	Min	0		13.33		
	Min	1			8	
	Min	4				24,5
Flotación	Min	8				
Velocidad de agitación	Rpm	1200				
# Paletas	cant.	30				
<i>Cleaner I</i>						
Acondicionamiento	Min	0				
Flotación	Min	4				
Velocidad de agitación	Rpm	1200				
# Paletas	cant.	20				
<i>Cleaner II</i>						
Acondicionamiento	Min	0				
Flotación	Min	2				
Velocidad de agitación	Rpm	1200				
# Paletas	cant.	20				

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 107***Resultados de la flotación cíclica*

Producto	Peso (g)	Peso (%)	Ley Au (g/t)	Recuperación (%)
Conc. Cleaner II - 1	1.5	0.02	336.73	3.56
Conc. Cleaner II - 2	8.5	0.09	140.71	8.43
Conc. Cleaner II - 3	9.5	0.10	118.85	7.96
Conc. Cleaner II - 4	11	0.11	108.15	8.39
Conc. Cleaner II - 5	13.9	0.14	111.52	10.93
Relave Cleaner II	44.7	0.45	44.71	14.09
Relave Cleaner I	114.7	1.15	9.46	7.65
Conc. Sev	87.1	0.88	5.22	3.21
Relave Final - 1	1818.6	18.29	0.53	6.79
Relave Final - 2	1923.8	19.35	0.51	6.92
Relave Final - 3	1959.5	19.71	0.54	7.46
Relave Final - 4	1963.8	19.75	0.5	6.92
Relave Final - 5	1985.6	19.97	0.55	7.70
Cabeza Calculada	9942.2	100.00	1.84	100.00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 108***Balance metalúrgico flotación cíclica*

Producto	Peso (%)	Ley Au (g/t)	Recuperación (%)
Cabeza Calculada	100	1.84	100
Concentrado Flot.	0,80	112,47	63,15
Relave de Flotación	99,20	0,53	36,85
Cabeza Ensayada		1.83	

Fuente: Elaboración propia

### 8.1.7 Balance Global de Gravimetría y Flotación

**Tabla 109**

*Balance global*

Etapa	Peso g	Peso %	Ley Au g/t	Finos Rec. g.Au	%Rec Etapa
Gravimetría					
Conc. Grav.	95.88	4.79	15.31	0.001	29.85
Rve Gravime	1906.00	95.30	1.81	0.003	70.15
Cbza Calculada	2000	100.00	2.24	0.005	100
Flotación					
Conc. Flotación	20	0.8	112.5	0.002	63.14
Rve Flot.	1984	99.2	0.53	0.001	28.89
Cbza Calc.	2000	100	1.82	0.004	
Flot.+Grav					
Rec. Global					92.99

Fuente: elaboración propia

La recuperación global obtenida es el resultado de la suma de ambas recuperaciones de gravimetría 29.85% y flotación de 63.14%, resultando un total de 92.99 % de recuperación.

## CONCLUSIÓN

- El oro nativo se encuentra asociado a arsenopirita y lollingita, presentando una liberación del 0%. Las asociaciones del oro nativo son de tipo incluidos/ocuidos, seguido de tipo lateral. Los tamaños del oro nativo en los Inter crecimientos son inferiores a los 13 micrones (Tabla 5). Los sulfuros primarios presentes son Pirrotita, lollingita y Arsenopirita, el tamaño partícula del oro electrum se encuentran menores a 13 Micras en la Arsenopirita y cuarzo, mientras que el Oro también se encuentra presente estibina (Au-Sb) no mayor a 13 micras.
- La hipótesis general que establece evaluar el comportamiento del mineral Constanza por el proceso de gravimetría teniendo una mejor recuperación de 29.85% bajo condiciones de parámetros óptimos de presión de 3Psi, con una velocidad de rotación del cono frecuencia de 80 Hz y a una granulometría de 60% malla -200.
- Se logró evaluar los parámetros operacionales del proceso de flotación de minerales auríferos para mejorar la recuperación de oro en la empresa minera Cori Puno de manera satisfactoria, obteniéndose la concentración más alta de 63.14% de recuperación en la prueba final de flotación cíclica, con los siguientes parámetros óptimos: de Granulometría 90% -200 malla, Dosificación de reactivos Z-6 24g/T, AP-4037 76g/T, sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>) 40g/T.
- La recuperación alcanzada con el mineral Constanza tiene un promedio de 92.99 % de recuperación el comportamiento Metalúrgico del mineral de Constanza indica principalmente que la mayor recuperación se presenta en la etapa de Flotación.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un estudio más detallado, utilizando el diseño factorial fraccionado para poder evaluar la interacción de las otras variables.
- Elegir dos variables más influyentes para luego plasmarlo en un diseño de optimización con modelos cuadráticos en este caso se sugiere el diseño hexagonal.
- Se recomienda implementar un control riguroso de la granulometría en el proceso de molienda tanto en la etapa de preconcentración gravimétrico y flotación teniendo un buen control de la mineralogía para obtener una mejor recuperación de Au.

**REFERENCIAS**

- Astucuri, V. (1994). *INTRODUCCION DE FLOTACION DE MINERALES*. LIMA.
- ballenas, G. (2027). *Metodologia de la Investigacion*. mexico: Patria.
- Bermudez, O., & Lamas, M. (2017). *Metodologia de la Invetigacion*. mexico.
- Bizalab. (2021). *INFORME DE ENSAYO MINERALOGICO*.
- Bravo, A. C. (2004). *Manual de Flotacion*. Casapalca.
- Carlos R. Sabido Couoh, J. G. (2010). Adaptación de un micrométodo espectrofotométrico para determinación de fósforo en hueso. *Revista latinoamericana de química*, [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-59432010000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-59432010000200005).
- Castro Bravo, R. R. (2022). *Comparación de procesos de concentración gravimétrica entre mesa vibratoria y espiral para la obtención de un concentrado de óxido de hierro (FeO)*. Universidad del Azuay.
- Conejeros, V. (2003). *Procesamiento de Minerales*.
- Hernandez Sampiere, R. (2014). *Metodologia de la investigacion*. Mexico: Impreso en mexico.
- Mamani, A. (1988). *Manual de Flotación de Minerales*. Lima: Peru.
- Martinez, W., & Vera, M. (2016). YACIMIENTO UNTUCA, MARCO ESTRUCTURAL Y MINERALIZACION EN LAS CUARCITAS ORDOVICIANAS DE LA FORMACIÓN SANDIA– CORDILLERA CARABAYA - PERÚ. *INGEMMET*, 06.

- MERCHÁN DOMÍNGUEZ, Fernanda Marianela; MONSALVE ESPINOZA, Fabián Santiago. (2019). Flujograma para concentración de oro aluvial, mediante utilización del JIG, Espiral y Mesa Vibratoria. Universidad del Azuay.
- Morral, F., & Jimeno, E. (1985). *Metalurgia General*. España.
- Pacheco, J. L. (2018). *Optimización en la recuperación por diseño experimental PLACKET BURMAN en el proceso de extracción de oro por gravimetría y flotación del mineral de UNTUCA – Minera CORIPUNO, efectos de la molienda - sobremolienda y liberación de oro*. Repositorio UNSA.
- Portilla, H. R. (2022). *Presión de agua y frecuencia de rotación del concentrador Falcon L40 en el porcentaje de recuperación de oro mediante concentración gravimétrica a relaves*. repositorio UNITRU.
- Pozo, M. (2019). *EL PAPEL DE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y GEOQUÍMICA*. Madrid.
- Rivera Parra, S. C. (2017). *Optimización de concentración gravimétrica de oro en la Mesa Vibratoria de la Mina “Vicentina”*. Tesis de Licenciatura. Universidad del Azuay.
- Rivera Parra, S. c. (2017). *Optimización de concentración gravimétrica de oro en la Mesa Vibratoria de la Mina “Vicentina”*. Universidad del Azuay.
- Salager, J. I., & Forguiarini, A. (2007). *Fundamentos de Flotacion*. Venezuela.
- Salazar , C., & Del Castillo, S. (2018). *Fundamentos de la Estadística*.
- SEPRO mineral systems. (2009). *CONCENTRADORES GRAVIMÉTRICOS FALCON SB*. Canada.

Soto, A. F., & Leguía, J. J. (2020). *Influencia minerográfica en la recuperación de oro en los procesos metalúrgicos de la Minera Qero's Gold de Paucartambo- Cusco.*

VICTOR, H. C. (2022). EVALUACIÓN DEL CONCENTRADOR CENTRÍFUGO PARA TRATAR RELAVE FINAL DEL PROCESO DE FLOTACIÓN. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN.

vilcapoma, j. R., & Chavez, Z. (2012). *Prueba sexperimentales a nivel de laboratorio de concentración gravimétrica y flotación de minerales de oro en la planta concentradora "Caselita" en Condorama - Cuzco.* Repositorio UNAC.

Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral Processing Technology.* Elsevier Science & Technology Books.

Yanes, T., & Garcia, I. (2005). *Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar-Colombia).* Medellin-Colombia.

<b>MATRIZ DE CONSISTENCIA</b>					
TITULO DE INVESTIGACION	<b>CARACTERIZACION DE LOS MINERALES AURIFEROS DE LA MATRIZ SULFURADA Y EVALUACION DE PROCESOS DE GRAVIMETRIA Y FLOTACION DEL YACIMIENTO CONSTANZA-CORI-PUNO SAC.</b>				
OBJETIVO GENERAL	PROBLEMA GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES		METODOLOGIA
Realizar las pruebas a nivel de laboratorio del mineral Constanza con el fin de caracterizar y evaluar el comportamiento metalúrgico con respecto a las operaciones unitarias de gravimetría y flotación	¿De qué manera caracterizar y evaluar el comportamiento metalúrgico mediante los procesos unitarios de gravimetría y flotación del mineral proveniente de la zona Constanza?	Se determina caracterizar y evaluar el comportamiento del mineral en cada uno de los procesos unitarios de flotación y gravimetría de la zana Constanza	VARIABLE DEPENDIENTE N°1	VARIABLE DEPENDIENTE N°2	<b>Tipo de investigación</b> Correlacional-experimental  <b>Método de investigación</b> Analítico-Experimental  <b>Nivel de investigación</b> Explicativo  <b>Diseño experimental</b> Diseño factorial con aplicación de software MiniTAB
			RECUPERACION DE ORO	RECUPERACION DE ORO	
OBJETIVO ESPECIFICO N°1	PROBLEMA ESPECIFICO N°1	HIPOTESIS ESPECIFICO N°1	VARIABLE INDEPENDIENTE 1	VARIABLE INDEPENDIENTE 2	<b>Población</b> mineral de cabeza, extraído de la corteza terrestre de la zona Constanza y relave gravimétrico  <b>Muestra</b> Mineral aurífero en las distintas pruebas 120kg para proceso de gravimetría y 22kg para proceso de flotación
Caracterizar el mineral por medio de microscopía óptica de luz reflejada y microscopía electrónica provenientes de la zona Constanza	¿Por qué caracterizar el mineral proveniente de la zona Constanza?	se logra conocer las características microscópicas, Geoquímicas y físicas a detalle del mineral de la zona Constanza untuca	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión</li> <li>• Frecuencia</li> <li>• Granulometría</li> </ul>	Dosificación de reactivos <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sulfato de cobre</li> <li>• Z-11</li> <li>• AP-4037</li> <li>• % -m200</li> </ul>	
OBJETIVO ESPECIFICO N°2	PROBLEMA ESPECIFICO N°2	HIPOTESIS ESPECIFICO N°2	VARIABLES INTERVINIENTES 1	VARIABLES INTERVINIENTES 2	
Evaluar las variables de presión, frecuencia, % de sólidos y granulometría en el proceso metalúrgico de gravimetría como pre concentración para la recuperación de oro.	¿Cuáles son las variables influyentes en el proceso metalúrgico de gravimetría como pre concentración para la recuperación de oro.?	Al incrementar el % de liberación durante el proceso metalúrgico de gravimetría se logrará recuperar oro en primera instancia a partir del mineral.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• G. específica</li> <li>• Características Del mineral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características</li> <li>• Del mineral</li> <li>• G. específica</li> <li>• Temperatura</li> </ul>	
OBJETIVO ESPECIFICO N°3	PROBLEMA ESPECIFICO N°3	HIPOTESIS ESPECIFICO N°3			
Evaluar las variables dosificación de sulfato de cobre y granulometría en el proceso de flotación como concentración final para la recuperación de oro a partir del relave gravimétrico.	¿Cuáles son las variables influyentes en el proceso metalúrgico de flotación como concentración final para la recuperación de oro a partir del relave gravimétrico?	Al incrementar la dosificación de sulfato de cobre y granulometría En el proceso metalúrgico de flotación permitirá recuperar oro a partir del relave gravimétrico.			

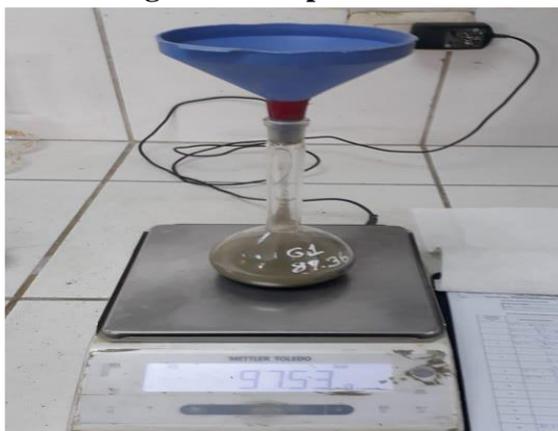
## 1. Área Geología de la unidad minera cori puno S.A.C



## 2. Preparación mecánica de muestras



### 3. Determinación de gravedad específica



### 4. Determinación de curva de moliendabilidad



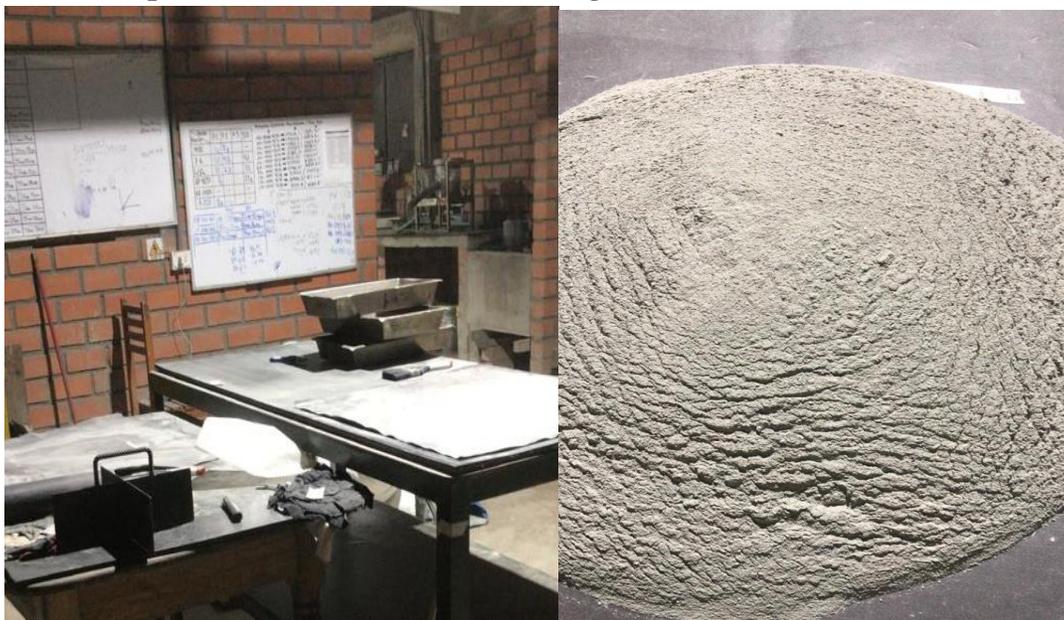
### 5. Determinación de Análisis granulométrico



## 6. Prueba de gravimetría



## 7. Preparación de muestras del relave gravimétrico



### 8. Prueba de flotacion



## 9. Reporte de Ensayos mineralógicos por Bizalab.

BZ-F-11 Ver. 01



### INFORME DE ENSAYO

#### ENSAYOS MINERALÓGICOS POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE LUZ REFLEJADA Y ELECTRÓNICA DE SEIS MUESTRAS

Para:

CORI PUNO S.A.C.

Aprobado por:

Gerente General: Erika Gabriel

Informe de Ensayo No: IL-001M-1426			
REV	EDICION	EMITIDO PARA	FECHA
0	Primera	Información	05-Mar-21
<p><b>Descargo de Responsabilidad:</b> Los resultados de los ensayos pertenecen solo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con Normas del Producto o como certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce.</p>			

## 10. Reporte de Leyes por parte de Laboratorio Químico

Cori Puno S.A.C  
Sistema de Control de Operaciones Minero Metalúrgico

16/09/2021  
10:50 a.m  
pag. 1 de 1

 **INFORME DE ENSAYO N°: LQ-001-LM-2021**

**Cori Puno S.A.C.**

**CLIENTE :** LABORATORIO METALURGICO  
**PRODUCTO :** PRUEBAS

**INFORMACION DE LA MUESTRA**

**IDENTIFICACION :** ver codigos de la muestra  
**CANTIDAD :** 26  
**FECHA DE INGRESO :** 12/09/2021  
**TURNO :** 2T  
**PRESENTACION :** bolsas de polietileno  
**PROCEDENCIA :** Laboratorio Metalúrgico  
**FECHA DE REPORTE :** 15 de septiembre 2021  
**ENSAYO :** ORO

N° DE MUESTRAS	CODIGO METALURGICO	LEY g/T
01	LM-21-001	2.20

  
PLACENCIA REYES, ADRIANO DANIEL  
JEFE DE LABORATORIO QUÍMICO

CORI PUNO S.A.C.  
LABORATORIO QUÍMICO - Urubia



### INFORME DE ENSAYO N°: LQ-001-LM-2021

**CLIENTE :** LABORATORIO METALURGICO  
**PRODUCTO :** PRUEBAS  
**INFORMACION DE LA MUESTRA**  
**IDENTIFICACION :** ver codigos de la muestra  
**CANTIDAD :** 20  
**FECHA DE INGRESO :** 13/09/2021  
**TURNO :** 2T  
**PRESENTACION :** bolsas de polietileno  
**PROCEDENCIA :** Laboratorio Metalúrgico  
**FECHA DE REPORTE :** 18 de septiembre 2021  
**ENSAYO :** ORO

N° DE MUESTRAS	CODIGO METALURGICO	LEY g/T
1	LM21-001	16.14
2	LM21-002	2.97
3	LM21-003	36.44
4	LM21-004	2.11
5	LM21-005	36.76
6	LM21-006	2.76
7	LM21-007	74.05
8	LM21-008	2.66
9	LM21-009	31.14
10	LM21-010	2.78
11	LM21-011	36.3
12	LM21-012	2.33
13	LM21-013	27.69
14	LM21-014	3.01
15	LM21-015	27.69
16	LM21-016	3.01
17	LM21-017	71.2
18	LM21-018	2.52
19	LM21-019	54.75
20	LM21-020	2.5

PLACENCIA DECERR, ADRIANO DARENH  
JEFE DE LABORATORIO QUÍMICO



INFORME DE ENSAYO N°: LQ-002-LM-2021

CLIENTE : LABORATORIO METALURGICO  
 PRODUCTO : PRUEBAS  
**INFORMACION DE LA MUESTRA**  
 IDENTIFICACION : ver codigos de la muestra  
 CANTIDAD : 09  
 FECHA DE INGRESO : 22/09/2021  
 TURNO : 1T  
 PRESENTACION : bolsas de polietileno  
 PROCEDENCIA : Laboratorio Metalúrgico  
 FECHA DE REPORTE : 25 de septiembre 2021  
 ENSAYO : ORO

N° DE MUESTRAS	CODIGO METALURGICO	LEY g/T
1	LM21-001	75.2
2	LM21-002	23.66
3	LM21-003	10.59
4	LM21-004	6.91
5	LM21-005	3.39
6	LM21-006	2.69
7	LM21-007	1.65
8	LM21-008	1.4
9	LM21-009	0.65

FLAVIO RECENA, FLAVIO DAMEN  
JEFE DE LABORATORIO QUÍMICO



INFORME DE ENSAYO N°: LQ-002-LM-2021

CLIENTE : LABORATORIO METALURGICO  
 PRODUCTO : PRUEBAS  
 INFORMACION DE LA MUESTRA  
 IDENTIFICACION : ver codigos de la muestra  
 CANTIDAD : 30  
 FECHA DE INGRESO : 28/09/2021  
 TURNO : 1T  
 PRESENTACION : bolsas de polietileno  
 PROCEDENCIA : Laboratorio Metalúrgico  
 FECHA DE REPORTE : 04 de octubre 2021  
 ENSAYO : ORO

N° DE MUESTRAS	CODIGO METALURGICO	LEY g/T
1	LM21-001	25.32
2	LM21-002	10.88
3	LM21-003	0.59
4	LM21-004	7.44
5	LM21-005	3.66
6	LM21-006	0.47
7	LM21-007	4.53
8	LM21-008	2.01
9	LM21-009	0.36
10	LM21-010	9
11	LM21-011	3.87
12	LM21-012	0.58
13	LM21-013	5.93
14	LM21-014	2.51
15	LM21-015	0.43
16	LM21-016	8.12
17	LM21-017	0.79
18	LM21-018	0.43
19	LM21-019	22.27

PLACENCIA ESCOBAR, ARIANO DAHEIN  
JEFE DE LABORATORIO QUÍMICO

## 11. Propiedades Físicas y Químicas Reactivo AP-4037

AEROSOL 4037P Promoter

SDS: 0057299

Fecha de Impresión: 01-jul-2016

Página: 5 de 10

### Protección de los ojos:

Prevenir contacto con ojos y piel. Proveer una fuente de lavaje ocular y una ducha de seguridad muy cerca de los puntos de posible exposición. Usar protección ocular/ facial, gafas para productos químicos y máscara.

### Protección de la piel:

Evitar la contaminación de la piel o de la ropa al remover el equipo protector. Usar guantes impermeables y ropa protectora adecuada.

### Consejos adicionales:

No se deberá llevar, almacenar o ingerir alimentos, bebidas y productos de tabaco donde este material esté en. Antes de comer, beber o fumar, lavarse la cara y las manos minuciosamente con jabón y agua.

## 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

### INFORMACIÓN SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS BÁSICAS

Color:	amarillo a la naranja
Aspecto:	líquido
Olor:	azufre
Umbral de olor:	Ver la sección 8 para consultar los límites de exposición
pH:	No disponible
Temperatura de fusión:	-15 °C (punto de congelación)
Temperatura de ebullición/rango:	No disponible
Punto de inflamación:	50 °C Vaso Cerrado Pensky-Martens
Índice de evaporación:	No disponible
Inflamabilidad (sólido, gas):	No disponible
LIMITES DE INFLAMABILIDAD (% Por Vol):	No disponible
Presión de vapor:	No disponible
Densidad de vapor:	No disponible
Gravedad Específicas:	1.06@ 25°C
SOLUBILIDAD EN EL AGUA:	Parcial
Coefficiente de reparto (n-octanol/agua):	No disponible
Temperatura de ignición automática (auto):	No disponible
Temperatura de descomposición:	no disponible
Viscosidad (cinemática):	No disponible
Viscosidad (dinámica):	No disponible

### OTRA INFORMACIÓN

Liposolubilidad (disolvente):	No disponible
% VOLATIL (Por peso):	No disponible
Contenido en sólidos:	No disponible
Saturación en Aire (% en Vol.):	No disponible
Índice de acidez (mg KOH/g):	No disponible
Índice de hidróxido (mg KOH/g):	No disponible
Contenido de Orgánicos Volátiles (1999/13/EC):	No disponible
Constante de disociación:	No disponible
Propiedades de explosión:	Ninguno.
Propiedades oxidantes:	No disponible
Granulometría (tamaño de partículas):	No disponible

### INFORMACIÓN DE PELIGRO DE POLVO

Tamaño de partículas (micrones)	No aplicable
Kst (bar-m/seg)	No aplicable
Presión de explosión máxima (P <sub>máx</sub> )	No aplicable