

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



**EVALUACIÓN DE LOS COLECTORES A-3418 Y Z-6 PARA RECUPERAR EL COBRE  
DE LOS MINERALES MIXTOS DE LA PLANTA DE BENEFICIOS JESÚS S.A.C- NAZCA**

(Investigación tecnológica)

**Tesis presentada por los bachilleres:**

**RIQUELME GUTIÉRREZ, Cristian Oliver**

**TORRE QUISPE, Shiomara Selena**

**Para optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico**

**Asesor: ING. Julio Danilo Bustamante Jaén**

**CUSCO-PERU**

**2022**

## Dedicatoria

*A Dios todo poderoso por la oportunidad de darme la voluntad, fuerza y valor para lograr mis objetivos.*

*A mis padres Pablo Rimberto Torre Delgado y Mercedes Quispe Bellido, a mi hermano Jean Paul Torre Quispe, quienes me impulsan a seguir adelante.*

**SHIOMARA SELENA TORRE QUISPE**

*A Dios por permitirme tener la fuerza para avanzar en mis estudios y formar parte de una importante rama de la ingeniería.*

*A mis padres por su esfuerzo en concederme la oportunidad de estudiar y por su constante apoyo a lo largo de mi vida, a mis hermanos y tíos por sus consejos, paciencia y toda la ayuda que me brindaron durante mi vida universitaria y el estudio del presente trabajo de investigación.*

**CRISTIAN OLIVER RIQUELME GUTIERREZ**

## **Agradecimiento**

*Agradecemos a nuestros docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica por la dedicación y enseñanza que nos brindaron durante nuestra formación profesional. A nuestros queridos padres, hermanos y demás familiares a quienes le debemos todo nuestro agradecimiento por brindarnos su apoyo y sabiduría en todo momento que fue muy determinante para nuestra formación personal y expectativas profesionales.*

*De manera especial;*

*Al Ing. Julio Danilo Bustamante Jaén, por la asesoría que nos brindó durante la elaboración de la tesis.*

**CRISTIAN OLIVER RIQUELME GUTIERREZ**

**SHIOMARA SELINA TORRE QUISPE**

## **Presentación**

**Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.**

Señores Catedráticos Miembros del Jurado:

Con el propósito de optar al Título Profesional de Ingeniería Metalúrgica, y de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, ponemos a vuestra consideración el presente trabajo intitulado:

**“EVALUACIÓN DE LOS COLECTORES A-3418 Y Z-6 PARA RECUPERAR EL  
COBRE DE LOS MINERALES MIXTOS DE LA PLANTA DE BENEFICIOS JESÚS  
S.A.C-NAZCA”**

**(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

Esperando que el presente trabajo de investigación cumpla los objetivos trazados por lo graduandos y sirva de consulta para las personas especializadas en la concentración de minerales.

**CRISTIAN OLIVER RIQUELME GUTIERREZ**

**SHIOMARA SELENA TORRE QUISPE**

## Lista de Figuras

|                  |  |    |
|------------------|--|----|
| <b>Figura 1</b>  | Principio Fundamental De La Flotación .....                              | 12 |
| <b>Figura 2</b>  | Componentes del Proceso de Flotación .....                               | 13 |
| <b>Figura 3</b>  | Reactivos de Flotación.....  | 16 |
| <b>Figura 4</b>  | Propiedad Hidrofílica e Hidrofóbica de los Minerales .....               | 19 |
| <b>Figura 5</b>  | Fenómeno de Adsorción de Materias Tensoactivas .....                     | 23 |
| <b>Figura 6</b>  | Formación de la Doble Capa de Cargas Eléctricas .....                    | 26 |
| <b>Figura 7</b>  | Interpretación Esquemática del Origen de la Tensión Superficial.....     | 30 |
| <b>Figura 8</b>  | Definición del Angulo de Contacto.....                                   | 31 |
| <b>Figura 9</b>  | Ángulos de Contacto en Solidos de Distintas Mojabilidades.....           | 32 |
| <b>Figura 10</b> | Cinética de Flotación.....   | 38 |
| <b>Figura 11</b> | Ubicación de la Planta de Beneficio Jesús S.A.C. ....                    | 49 |
| <b>Figura 12</b> | Ubicación de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco ..... | 50 |
| <b>Figura 13</b> | Tiempo de Molienda.....  | 68 |
| <b>Figura 14</b> | Diagrama de Flujo de Flotación, Planta de Beneficio Jesús S.A.C.....     | 70 |
| <b>Figura 15</b> | Diagrama de Flujo de Flotación - Laboratorio .....                       | 71 |
| <b>Figura 16</b> | % Recuperación y Ley de Cobre Total.....                                 | 85 |
| <b>Figura 17</b> | Ganancia de cada prueba.....   | 88 |
| <b>Figura 18</b> | Resultados del análisis de diseño factorial.....                         | 91 |
| <b>Figura 19</b> | Diagrama de Pareto de los efectos.....                                   | 92 |
| <b>Figura 20</b> | Gráfica de residuos para % Recuperación.....                             | 93 |
| <b>Figura 21</b> | Gráfica de efectos principales de % Recuperación .....                   | 94 |
| <b>Figura 22</b> | Porcentaje que aumenta la recuperación frente a la prueba estándar ..... | 97 |
| <b>Figura 23</b> | Diferencia de ganancias frente a la prueba estándar.....                 | 98 |

## Lista de Tablas

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 1</b> Clasificación de Minerales de Cobre.....   | 18  |
| <b>Tabla 2</b> Operacionalización de variables.....   | 46  |
| <b>Tabla 3</b> Corridas a realizar.....   | 52  |
| <b>Tabla 4</b> Leyes de cobre en planta.....  | 62  |
| <b>Tabla 5</b> Balance de Planta.....   | 63  |
| <b>Tabla 6</b> Resultado de Análisis de Cobre Total de Cabeza.....                              | 64  |
| <b>Tabla 7</b> Gravedad Específica del Mineral.....   | 65  |
| <b>Tabla 8</b> Análisis Granulométrico Tiempo Cero.....   | 66  |
| <b>Tabla 9</b> Molienda 5 Minutos.....  | 67  |
| <b>Tabla 10</b> Molienda 10 Minutos.....  | 67  |
| <b>Tabla 11</b> Tiempo de Molienda de los Tres Test.....  | 68  |
| <b>Tabla 12</b> Preparación de pulpas, planta y laboratorio.....                                | 72  |
| <b>Tabla 13</b> Dosificación de Reactivos a Nivel de Planta – Estándar.....                     | 73  |
| <b>Tabla 14</b> Dosificación Agrupada de Reactivos a Nivel de Planta.....                       | 73  |
| <b>Tabla 15</b> Dosificación de Reactivos a Nivel de Laboratorio – Estándar.....                | 78  |
| <b>Tabla 16</b> Dosificación de Reactivos a Nivel de Laboratorio – Evaluando Reactivos.....     | 79  |
| <b>Tabla 17</b> Pesos de Concentrados y Relaves.....  | 80  |
| <b>Tabla 18</b> Análisis Químico de Cobre Total.....  | 81  |
| <b>Tabla 19</b> Balance Metalúrgico Test 1.....   | 81  |
| <b>Tabla 20</b> Balance Metalúrgico Test 2.....   | 82  |
| <b>Tabla 21</b> Balance Metalúrgico Test 3 (estándar).....                                      | 82  |
| <b>Tabla 22</b> Balance Metalúrgico Test 4.....   | 83  |
| <b>Tabla 23</b> Balance Metalúrgico Test 5.....   | 83  |
| <b>Tabla 24</b> Balance Metalúrgico Test 6 Balance Metalúrgico Test 6.....                      | 84  |
| <b>Tabla 25</b> Recuperación y ley de Cobre.....  | 84  |
| <b>Tabla 26</b> Contenido metálico y cantidad de reactivo utilizado a nivel de laboratorio..... | 87  |
| <b>Tabla 27</b> Costos y beneficios evaluados de las pruebas.....                               | 87  |
| <b>Tabla 28</b> Análisis de Varianza.....   | 94  |
| <b>Tabla 29</b> Margen de error (Prueba Planta vs Prueba Laboratorio.....                       | 96  |
| <b>Tabla 30</b> Cronograma De Actividades.....  | 117 |
| <b>Tabla 31</b> Presupuesto.....  | 118 |

## Resumen

El presente trabajo de investigación, se orientó al proceso de flotación de minerales mixtos de cobre, disminuyendo la dosificación del colector A-3418 o reemplazando parte de su dosificación por el Z-6 para mejorar la recuperación de cobre, de esta manera disminuye el costo relevante del A-3418 al ser un reactivo costoso frente a otros, se reporta que la recuperación de cobre en minerales mixtos de cobre de la planta de beneficio Jesús S.A.C. se encuentra entre 88% a 90% de cobre. El trabajo de investigación se realizó experimentalmente en el laboratorio de procesamiento de minerales de la UNSAAC, simulando las pruebas metalúrgicas de flotación con las variables que se manejan en planta, efectuando las mismas características de flotación, ya sea densidad de pulpa, pH, circuito de flotación, dosificación entre otros. Se realizaron diversas pruebas metalúrgicas manipulando la dosificación de los colectores A-3418 y Z-6 y compararlas con la prueba estándar, cuyo resultado final es que sustituyendo 10g/t de A-3418 por Z-6 se obtiene la mayor recuperación de cobre a nivel de laboratorio, alcanzando el 89.57% de cobre en el concentrado, cuyo valor es 1.4% más de cobre que la obtenida en la prueba estándar. Realizando una evaluación económica se logra mejorar los beneficios \$ 756.30, utilizando el contenido metálico y las variables de estudio como soporte de apoyo. Entonces este resultado aumenta el beneficio - costo del proceso y mejora la recuperación. Por lo tanto, se determinó para el proceso de flotación de cobre mixto reemplazar la dosificación que se le quita al AEROPHINE 3418 por el Xantato Z-6 para el proceso de flotación de minerales mixtos a nivel de laboratorio en la Planta de Beneficio Jesús S.A.C.

**Palabras Clave:** Evaluación, Colectores, Flotación, Cobre,

## **Abstract**

The present research work was oriented to the flotation process of mixed copper minerals, reducing the dosage of collector A-3418 or replacing part of its dosage with Z-6 to improve copper recovery, thus reducing the cost. relevant to A-3418 as it is a costly reagent compared to others, it is reported that the recovery of copper in mixed copper minerals from the Jesús S.A.C. benefit plant is between 88% and 90% copper. The research work was carried out experimentally in the UNSAAC mineral processing laboratory, simulating the metallurgical flotation tests with the variables that are handled in the plant, carrying out the same flotation characteristics, be it pulp density, pH, flotation, dosage among others. Various metallurgical tests were carried out manipulating the dosage of collectors A-3418 and Z-6 and comparing them with the standard test, whose final result is that by substituting 10g/t of A-3418 for Z-6, the highest recovery of copper is obtained at laboratory level, reaching 89.57% copper in the concentrate, whose value is 1.4% more copper than that obtained in the standard test. Carrying out an economic evaluation, it is possible to improve the benefits \$ 756.30, using the metal content and the study variables as support support. So, this result increases the benefit - cost of the process and improves recovery. Therefore, it was determined for the mixed copper flotation process to replace the dosage that is removed from AEROPHINE 3418 by Xanthate Z-6 for the mixed mineral flotation process at the laboratory level at the Jesús S.A.C. Beneficiation Plant.

**Keywords:** Evaluation, Collectors, Flotation, Copper,

## Índice General

|   |      |
|---|------|
| Dedicatoria .....                           | II   |
| Agradecimiento.....                         | IV   |
| Presentación .....                          | V    |
| Lista de Figuras.....                       | VI   |
| Lista de Tablas.....                        | VII  |
| Resumen.....                                | VIII |
| Abstract.....                               | IX   |
| Siglas y Abreviaturas.....                  | XIV  |
| Introducción .....                          | XV   |
| Capítulo I.....                             | 1    |
| Planteamiento del Problema .....            | 1    |
| 1.1. Situación Problemática .....           | 1    |
| 1.2. Formulación de Problemas .....         | 2    |
| 1.2.1. Problema General.....                | 2    |
| 1.2.2. Problemas Específicos .....          | 2    |
| 1.3. Justificación de la Investigación..... | 3    |
| 1.3.1. Justificación Tecnológica.....       | 3    |
| 1.3.2. Justificación Económica .....        | 3    |
| 1.3.3. Justificación Social.....            | 3    |
| 1.3.4. Justificación Ambiental .....        | 4    |
| 1.4. Objetivos de la Investigación.....     | 4    |
| 1.4.1. Objetivo General.....                | 4    |
| 1.4.2. Objetivos Específicos.....           | 4    |
| 1.5. Delimitación de la Investigación.....  | 4    |
| 1.5.1. Delimitación Espacial.....           | 4    |
| 1.5.2. Delimitación Temporal .....          | 5    |
| Capítulo II.....                            | 6    |
| Marco Teórico .....                         | 6    |
| 2.1. Antecedentes (Estado de arte).....     | 6    |
| 2.1.1. Antecedentes Internacionales.....    | 6    |
| 2.1.2. Antecedentes Nacionales.....         | 7    |
| 2.1.3. Antecedentes Locales .....           | 8    |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2.2. Bases Teóricas.....</b>                                  | <b>9</b>  |
| 2.2.1. <i>Definición de Flotación.....</i>                       | 9         |
| 2.2.2. <i>Proceso de Flotación de Minerales .....</i>            | 10        |
| 2.2.3. <i>Componentes del Proceso de Flotación.....</i>          | 12        |
| 2.2.4. <i>Variables del Proceso de Flotación.....</i>            | 13        |
| 2.2.5. <i>Tipos de Reactivos.....</i>                            | 15        |
| 2.2.6. <i>Mineral de Cobre.....</i>                              | 17        |
| 2.2.7. <i>Principios de la Flotación .....</i>                   | 19        |
| 2.2.8. <i>Flotación de Sulfuros de Cobre .....</i>               | 20        |
| 2.2.9. <i>Flotación de Óxidos de Cobre.....</i>                  | 21        |
| 2.2.10. <i>Teoría de la Flotación de Minerales .....</i>         | 21        |
| 2.2.11. <i>Teoría de la Adsorción Física.....</i>                | 22        |
| 2.2.12. <i>Teoría del Potencial Electrocínético .....</i>        | 24        |
| 2.2.13. <i>Teoría Química o de la Oxidación Superficial.....</i> | 26        |
| 2.2.14. <i>Teoría de los Semiconductores .....</i>               | 27        |
| 2.2.15. <i>Fases del Proceso de Flotación.....</i>               | 27        |
| 2.2.16. <i>Interfaces del Proceso de Flotación .....</i>         | 29        |
| 2.2.17. <i>Contacto de Tres Fases .....</i>                      | 31        |
| 2.2.18. <i>Angulo de contacto .....</i>                          | 32        |
| 2.2.19. <i>Termodinámica de la Flotación.....</i>                | 33        |
| 2.2.20. <i>Termodinámica de Interfaces.....</i>                  | 34        |
| 2.2.21. <i>Cinética de la Flotación .....</i>                    | 35        |
| 2.2.22. <i>Modelamiento del Proceso de Flotación.....</i>        | 38        |
| 2.2.23. <i>Balance Metalúrgico.....</i>                          | 40        |
| 2.2.24. <i>Diseño Experimental.....</i>                          | 41        |
| 2.2.24.1. <i>Aplicaciones del diseño experimental .....</i>      | 41        |
| 2.2.24.2. <i>Experimento factorial .....</i>                     | 42        |
| 2.2.24.3. <i>Diseño factorial.....</i>                           | 42        |
| <b>Capítulo III.....</b>   | <b>44</b> |
| <b>Hipótesis y variables .....</b>                               | <b>44</b> |
| <b>3.1. Hipótesis .....</b>                                      | <b>44</b> |
| 3.1.1. <i>Hipótesis General .....</i>                            | 44        |
| 3.1.2. <i>Hipótesis específicas .....</i>                        | 44        |

|                              |   |    |
|------------------------------|---|----|
| 3.2.                         | Variables de investigación.....   | 44 |
| 3.2.1.                       | <i>Variables Dependiente</i> .....  | 44 |
| 3.2.2.                       | <i>Variables Independiente</i> .....  | 44 |
| 3.3.                         | Variables Intervinientes.....   | 45 |
| 3.4.                         | Indicadores .....   | 45 |
| 3.5.                         | Operacionalización de variables.....  | 46 |
| 3.6.                         | Definición de Términos Básicos.....   | 46 |
| Capítulo IV                  | .....   | 48 |
| Metodología de Investigación | .....   | 48 |
| 4.1.                         | Ámbito de la Investigación.....   | 48 |
| 4.1.1.                       | <i>Información de la Empresa</i> .....  | 48 |
| 4.1.2.                       | <i>Información del Laboratorio de Procesamiento de Minerales</i> .....                    | 49 |
| 4.2.                         | Metodología de la Investigación .....   | 50 |
| 4.3.                         | Tipo y Alcance de la investigación.....   | 50 |
| 4.3.1.                       | <i>Diseño experimental</i> .....  | 51 |
| 4.4.                         | Población y Muestra .....   | 53 |
| 4.4.1.                       | <i>Población</i> .....  | 53 |
| 4.4.2.                       | <i>Muestra</i> .....  | 53 |
| 4.5.                         | Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....                                     | 53 |
| 4.5.1.                       | <i>Técnica de recolección de datos</i> .....  | 53 |
| 4.5.2.                       | <i>Instrumentos de recolección de datos</i> .....   | 54 |
| 4.6.                         | <i>Método de investigación</i> .....  | 57 |
| 4.6.1.                       | <i>Técnica de investigación</i> .....   | 58 |
| Capítulo V                   | .....   | 61 |
| Desarrollo Experimental      | .....   | 61 |
| 5.1.                         | Muestra del mineral.....  | 61 |
| 5.1.1                        | Balance de planta con respecto al cobre.....  | 62 |
| 5.2.                         | Presentación, análisis e interpretación de las características del mineral. ....          | 63 |
| 5.2.1                        | <i>Presentación de las características del mineral para flotación.</i> ....               | 63 |
| 5.2.2                        | <i>Elaboración de Flowsheet para el proceso de flotación a nivel de laboratorio</i> ..... | 69 |
| 5.2.3                        | <i>Preparación de pulpas para flotación.</i> .....  | 71 |
| 5.2.4                        | <i>Dosificación de reactivos de forma industrial a nivel de laboratorio</i> .....         | 72 |
| 5.2.5                        | <i>Pruebas a realizar de flotación a nivel de laboratorio</i> .....                       | 78 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 5.2.6   | <i>Flotación de mineral mixto de cobre estándar y evaluando los reactivos</i> | 80  |
| 5.2.7   | <i>Evaluación económica de contenido metálico vs costo de reactivos</i>       | 85  |
| <b>Capítulo VI</b>  |   | 89  |
| <b>Análisis y Discusión de Resultados</b>   |   | 89  |
| 6.1   | <b>Resultados obtenidos</b>   | 89  |
| 6.2   | <b>Resultados del diseño experimental</b>                                     | 90  |
| 6.3   | <b>Discusión de Resultados</b>  | 95  |
| <b>Conclusiones</b>   |   | 99  |
| <b>Recomendaciones</b>  |   | 101 |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   |   | 102 |
| <b>ANEXOS</b>   |   | 106 |
| <b>ANEXO N° 01 Matriz de Consistencia</b>   |   | 107 |
| <b>ANEXO N°02: Información Mineralógica</b>   |   | 108 |
| <b>ANEXO N° 03: Análisis químico planta, Densidades y costo de reactivos</b>                    |   | 110 |
| <b>ANEXO N° 04: Resultados de Análisis Químico</b>  |   | 111 |
| <b>ANEXO N° 05: Planta de Beneficios Jesús S.A.C.</b>   |   | 112 |
| <b>ANEXO N° 06: Procedimientos en el laboratorio de procesamiento de minerales de la UNSAAC</b> |   | 113 |
| <b>ANEXO N° 07: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES</b>   |   | 117 |
| <b>ANEXO N° 08: Presupuesto</b>   |   | 118 |

## Siglas y Abreviaturas

|                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| - $\mu\text{l}$         | microlitro                  |
| - $\zeta$               | Potencial Z                 |
| - A-208                 | AEROFLOAT 208               |
| - A-3418                | AEROPHINE 3418              |
| - A-404                 | AEROPROMOTER 404            |
| - As                    | Arsénico                    |
| - BaS                   | Sulfuro de bario            |
| - cc                    | centímetro cúbico           |
| - $\text{Cos}\Theta$    | Coseno del ángulo $\Theta$  |
| - Cu                    | Cobre                       |
| - g reac                | gramos de reactivo          |
| - g                     | gramo                       |
| - $H_0$                 | hipótesis nula              |
| - $H_1$                 | hipótesis alternativa       |
| - Kg                    | Kilogramo                   |
| - min                   | minuto                      |
| - $N^\circ$             | número                      |
| - $\text{Na}_2\text{S}$ | Sulfuro de sodio            |
| - NaHS                  | Sulfuro ácido de sodio      |
| - t                     | Tonelada                    |
| - Z-6                   | Xantato Amílico de Potasio. |
| - $\gamma_{\text{GL}}$  | Tensión Gas Líquido         |
| - $\gamma_{\text{GS}}$  | Tensión Gas Sólido          |
| - $\gamma_{\text{LS}}$  | Tensión Líquido Gas.        |

## **Introducción**

El proceso de tratar mineral mixto de cobre proveniente de la planta de beneficio Jesús S.A.C. en Nazca, presenta un consumo de un reactivo que es costoso frente a otros y su recuperación de cobre al procesar mineral mixto de cobre es baja, siendo elevado el costo en el proceso de flotación debido al precio del reactivo A-3418. El objetivo del trabajo de investigación, es reemplazar parte de la dosificación del reactivo A-3418 por otro de menor precio y genere a la vez mayor recuperación del cobre procedente de los minerales mixtos. En tal sentido se plantea la hipótesis, que disminuyendo la dosificación del A-3418 y aumentando el Z-6, se logra mayor recuperación de cobre en el proceso de flotación de minerales mixtos a nivel de laboratorio. Los resultados obtenidos por las pruebas metalúrgicas, da a conocer que se logra aumentar la recuperación de cobre en 1.4% del proceso de flotación a nivel de laboratorio con respecto a la prueba estándar que recupera 88.17% de cobre en laboratorio de la planta de beneficio Jesús S.A.C. Por consiguiente, la conclusión que arribamos, es que se debe sustituir la dosificación de 10g/t de A-3418 por el Z-6, que genera la mayor recuperación de cobre en el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre nivel de laboratorio. Para el estudio se clasificó el trabajo de investigación en seis capítulos para una mejor comprensión.

# Capítulo I

## Planteamiento del Problema

### 1.1. Situación Problemática

El proceso fisicoquímico de la flotación es extensamente usado para la concentración de minerales valiosos. Generalmente, cuando la ley es demasiada baja, como consecuencia del agotamiento de las reservas minerales en los yacimientos, donde los ingenieros metalúrgicos se ven enfrentados con diferentes tipos de problemas como técnico y económicos, tales como el incremento de impurezas en el proceso y disminución de leyes de las especies valiosas; problemas que demanda operaciones con mayor tonelaje para que el proceso sea rentable.

Debido a lo mencionado, la tendencia mundial en la industria de procesamiento de minerales, como en diversas industrias, es optimizar y evaluar los reactivos de flotación, tiempo de flotabilidad y el pH adecuado para mejorar la recuperación de los metales valiosos presentes en el mineral.

La planta de Beneficio Jesús S.A.C. que se encuentra en la provincia de Nazca, departamento de Ica en Perú, concentra minerales de cobre de la zona, con agregados de oro y minerales de plata, entre estos encontramos minerales sulfurados de cobre y minerales mixtos de cobre (sulfuros y óxidos), para cada uno de ellos se maneja un proceso de concentración diferente. Durante la estancia en la planta se observó que al procesar mineral mixto de cobre, el proceso presenta una baja recuperación de cobre con respecto a cuando se procesa minerales sulfurados de cobre, lo que conlleva a mayor costo de transporte por el volumen de concentrado obtenido, una negociación de maquila más baja debido a la ley de cobre total y que en su proceso de flotación utilizan colectores conocidos que son económicos, pero presentan un colector que triplica a más el precio común de los reactivos. El reactivo Aerophine 3418 (A-3418) que es uno

de los tantos reactivos que se utilizan para el proceso, permite la recuperación de oro y cobre, sin embargo, el costo del reactivo A3418 es alto con respecto a los demás colectores. Por tal motivo, nos hemos propuesto evaluar dos tipos de reactivos que se utilizan en planta y que alguno de ellos se asemeje a la recuperación alta de cobre, cuyos resultados se alcanzarán la planta de beneficio Jesús S.A.C. para su evaluación final.

Por lo tanto, el problema principal radica en realizar una buena estrategia de selección de dos tipos de colectores que ya se utilizan en planta, que permitan recuperar un mayor porcentaje de cobre en el concentrado, debido al elevado costo que demanda los ensayos de los componentes de flotación, es de suma importancia la determinación de resultados fehacientes con mínima cantidad de pruebas experimentales.

Las pruebas de flotación de minerales mixtos de cobre procedente de la planta de beneficio Jesús S.A.C., se realizarán en el laboratorio de procesamiento de minerales de la UNSAAC.

## **1.2. Formulación de Problemas**

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

- ¿Cuál será el reactivo colector que posibilite mayor recuperación de cobre a partir de los minerales mixtos de cobre a nivel de laboratorio?

### ***1.2.2. Problemas Específicos***

- ¿Las características mineralógicas que presentan los minerales mixtos de la planta de beneficio Jesús S.A.C. serán favorables para el proceso de flotación?

- ¿Cuál será la recuperación de cobre llegando a modificar la dosificación de los colectores A-3418 y Z-6 en el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre?

- ¿Cómo influye económicamente el aumento o disminución de la recuperación de cobre en el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre?

- ¿De qué modo se evaluará el comportamiento de las variables de operación para hallar un modelo matemático que explique el proceso de flotación?

### **1.3. Justificación de la Investigación**

#### ***1.3.1. Justificación Tecnológica***

Con el presente trabajo de investigación se pretende evaluar el reactivo colector más eficiente, como reactivo en flotación de minerales a partir de minerales mixtos de cobre, dado que actualmente la recuperación de la planta de beneficio Jesús S.A.C. es relativamente baja con respecto al tratar minerales sulfurados de cobre. Para el estudio, se incluirá la influencia del tiempo de flotabilidad y pH dados por la planta para la mejor recuperación de cobre.

#### ***1.3.2. Justificación Económica***

Como se sabe, el precio del cobre ha ido subiendo a lo largo de los últimos años y su gran consumo a nivel mundial lo ha puesto entre los metales más vendidos y necesitados para diversas industrial, entonces al tener una relativa baja recuperación de cobre se pierde el metal en el relave y por otro lado, las pruebas experimentales y el uso de reactivos de flotación son bastante caras en el procesamiento de minerales, por ello, económicamente determinaremos cual es el reactivo que abaratará el proceso de flotación. Lo cual se reflejará en el beneficio – costo del proceso de flotación al seleccionar un reactivo adecuado en dicho mineral, dadas las pruebas establecidas.

#### ***1.3.3. Justificación Social***

Todo trabajo tecnológico, pretende demostrar el beneficio económico con la finalidad de obtener ganancias y que permita al empresario elevar la calidad de vida de los trabajadores y por ende a sus familias.

### ***1.3.4. Justificación Ambiental***

Realizando una mejor dosificación de reactivos, y recuperando un mayor porcentaje de cobre, conducirá a la menor contaminación ambiental de los relaves para su último tratamiento. Se llegará a obtener mayor cantidad de concentrado, por ende, menor cantidad de relave depositado en las relaveras.

## **1.4. Objetivos de la Investigación**

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

Evaluar los colectores A-3418 y Z-6 para aumentar la recuperación de cobre en el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre a nivel de laboratorio

### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Determinar las características mineralógicas para la flotabilidad de los minerales mixtos de la planta de beneficio Jesús S.A.C.
- Lograr la dosificación adecuada de colectores A-3418 y Z-6 para obtener la mejor recuperación posible en el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre.
- Realizar una evaluación económica con respecto a la recuperación de cobre obtenido y los costos de los reactivos evaluados.
- Evaluar las variables utilizando el software MINITAB para obtener el modelo matemático que explique este comportamiento.

## **1.5. Delimitación de la Investigación.**

### ***1.5.1. Delimitación Espacial***

El trabajo de investigación, se realizará en los laboratorios de procesamiento de minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio

abad del Cusco. Los minerales mixtos de cobre, se traerán de la ciudad de Nazca, procedente de la Planta de Beneficio Jesús S.A.C.

### ***1.5.2. Delimitación Temporal***

El tiempo calculado para la presentación del trabajo de investigación fluctúa entre los meses de junio a diciembre del año 2021.

## Capítulo II

### Marco Teórico

#### 2.1. Antecedentes (Estado de arte)

##### 2.1.1. Antecedentes Internacionales

Eulate (2012); en la tesis *Mejoramiento de la recuperación de plata de los minerales de mina Poopó*; Universidad Técnica de Oruro. Afirma que el mineral de la mina Poopó es considerada la más compleja, por el alto contenido de zinc y plata. Esto se refleja en la muestra de recuperación de plata en el concentrado de plomo que es 25,59% con 5 884 g/t de plata, la recuperación de plata en el concentrado de zinc es 46,80% con 462 g/t. El valor económico de plata en el concentrado de zinc no es favorable, en comparación de producir concentrado de plomo – plata con alto contenido de plata. Ya que el análisis químico del mineral indicaba que el contenido de zinc y plata son superiores al de plomo; se afirma que tendríamos que flotar plata con contenido de plomo. En la investigación se realizó pruebas a nivel laboratorio y planta para evaluar la recuperación de plata, se usó 7 como colector AEROPHINE 3418. Luego de seis campañas se lograron resultados favorables alcanzando recuperaciones de 42,32%.

Molina V. (2017) en su trabajo de investigación sobre. *Estudio del efecto de la aplicación de espumantes en el proceso de flotación de mineral mixto de cobre*. Pontificia Universidad Católica De Chile dice que los minerales mixtos de cobre (sulfuros/óxidos) representan alrededor de un 20% de las reservas de cobre fino en Chile. Actualmente una importante fracción de éstos son concentrados y recuperados mediante el proceso de flotación. Debido a la alta complejidad mineralógica de la mena, es difícil lograr una buena recuperación de sulfuros y óxidos en un solo proceso, aceptándose penalidades de una de las dos especies. El presente trabajo experimental

busca identificar la condición óptima de operación (maximizar la recuperación y ley de cobre del producto), mediante el control de la mezcla de espumantes comerciales, centrándonos en el DF400 debido a su alto “poder” y “selectividad” como espumante. Se realizaron ensayos de espumabilidad en una columna AMIRA modificada y mediciones de distribución de diámetro de burbujas en el equipo Bubbleviewer®, los cuales se complementan con pruebas metalúrgicas (en celdas de flotación) bajo condiciones de trabajo típicas de la industria. Se concluye de los resultados que la columna AMIRA modificada presenta una correlación con la celda de flotación en términos de espumabilidad de casi un 80%. La variable de mayor impacto sobre la espumabilidad es la salinidad del medio, aumentándola en promedio un 93% con respecto al caso en agua fresca

### ***2.1.2. Antecedentes Nacionales***

López; H. y Ipanaqué; O. (2008), en el trabajo de investigación, *Caracterización y optimización de flotación a nivel laboratorio del mineral de cobre de la minera candelaria*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Objetivo, Optimizar la recuperación de cobre a nivel laboratorio mediante la técnica de diseños experimentales del mineral sulfurado proveniente de la Compañía Minera Candelaria - Chile. Determinar un modelo matemático de la Recuperación de Cobre en función de las variables más influyentes en el proceso. Diagnosticar la interrelación existente entre el cobre y fierro con respecto a leyes y recuperaciones de cobre en el concentrado de cobre. Las conclusiones, De las tres etapas de optimización se concluye que la recuperación de cobre en el concentrado es afectada principalmente por granulometría y grado de agitación: incrementando el grado de molienda y reduciendo el grado de agitación se obtiene mayores recuperaciones. Se logró incrementar la recuperación del cobre de 87 %, obtenida en la planta, a 92.57 % a nivel laboratorio; optimizando las variables principales de mayor influencia

como: grado de molienda, incrementando a 94 % - malla 100 Tyler, y grado de agitación, reduciendo a 915 rpm. Las otras variables se mantuvieron en sus puntos medios de la primera etapa, en vista que no tenían efectos significativos sobre la recuperación de cobre.

Artica; M. y Rivera; J. (2015), en la tesis *Optimización del proceso de flotación de la calcopirita en presencia de la pirita en la pulpa en la concentradora amistad CIA minera argentum*, Universidad Nacional del Centro del Perú. El objetivo, determinar la influencia de la presencia de la pirita en el mineral para la optimización del proceso de flotación de la calcopirita en la Planta Concentradora Amistad Morococha. La conclusión a que arriban los Investigadores es, el contenido de oxígeno disuelto en la pulpa (DO) y el potencial de oxidación de la pulpa también disminuye con el aumento de contenido de pirita en la mezcla. El análisis de superficie (XPS) sugiere que la oxidación de la calcopirita y la activación con cobre producen la activación de la pirita. La disminución en la recuperación de flotación de la calcopirita posiblemente es consecuencia de la formación de especies óxido/hidróxido sobre la superficie de la calcopirita y el consumo de colector por pirita activada con cobre.

### **2.1.3. Antecedentes Locales**

Lupo; W. y Utani; W. (2014), la tesis *Recuperación del cobre por flotación de los minerales sulfurados del yacimiento Sulfubamba Apurímac*, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco. El objetivo es recuperar el mineral sulfuro de cobre en los desmontes del yacimiento de Sulfubamba por el método de flotación, la investigación llega a la siguiente conclusión. Mediante el proceso de flotación por espumas, se logró una recuperación de 87.93% que corresponde a la prueba No 2 para una densidad de pulpa 1350g/L, 0.929g/t de colector (Z-11) y 0.029 mm de espumante (aceite de pino). Por flotación por espuma se determinó los

parámetros siguientes; tiempo de molienda de 15 minutos, tamaño de partícula de 65% -200 malla y las pruebas de cinética establece un tiempo de flotación de 4 minutos.

Loza M. Rivera; G. (2009), la tesis *Concentración por el método de flotación por espumas del mineral sulfurado de Cobre- Molibdeno del Proyecto las Bambas*, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco. Tiene como objetivo la concentración de minerales sulfurados de Cu- Mo del proyecto las Bambas por el método de flotación por espumas para lograr una recuperación adecuada, así como obtener un concentrado de CuMo de calidad óptima. El estudio establece las siguientes conclusiones: el mineral que presenta el Proyecto las Bambas en sus tres yacimientos (Ferrobamba, Chalcobamba, Sulfubamba) es de tipo pórfido de Cu y Mo, con presencia de Au, Ag, el mineral se encuentra básicamente compuesto por calcopirita, esfalerita, bornita, molibdenita, teniendo como ganga cuarzo feldespatos, magnetita, hematita y pirita, por lo que se considera flotable al presentar la configuración suficiente para clasificarlo dentro de este grupo de minerales. Las leyes de cabeza ensayadas son; Cu = 2.17%, Au = 2.75gffM, Mo = 119ppm El tamaño óptimo determinado para este mineral es de 75% -200 malla, colector principal utilizada Z-11 y cinética de flotación establece un tiempo de 4 minutos, la recuperación del mineral es de 88.09% Cu.

## **2.2. Bases Teóricas**

### ***2.2.1. Definición de Flotación***

La flotación es un proceso físico-químico que tiene como objetivo concentrar los minerales valiosos y separarlos de la ganga, la separación es dada por la adherencia selectiva de la capa superficial de la partícula sólida hacia una burbuja de aire o a un líquido, la adherencia en la mayor parte de los casos, beneficiada por reactivos para modificación de la superficie de la partícula. El medio en que sucede la separación está compuesta por tres fases: fase líquida

(agua), fase gaseosa (aire) y la fase sólida (mineral). Las burbujas de aire circulan en la pulpa y proveen flotabilidad para llevar los minerales seleccionados a la superficie de la mezcla, estos serán extraídos o arrastrados como concentrados. Por otro lado los materiales que no han sido adheridos a las burbujas de aire permanecerán sumergidos y salen fuera del proceso como relaves. Mundialmente el proceso de flotación ayuda a la concentración de Cobre, Zinc, Plomo, entre otros, inicialmente a partir de minerales con bajo grado de ley.

Salage, J.L. y Forgiarini, A. (2007), *Fundamentos de la Flotación*, Universidad de los Andes, Venezuela. Definen que la flotación ha hecho posible utilizar tantos minerales de bajo grado, así como minerales complejos, los cuales no hubieran tenido valor si es que sólo se hubiera confiado en los métodos clásicos de concentración por gravedad. En este mundo que siempre clama por un mayor tonelaje de metales, la flotación ha hecho posible la explotación de millones de toneladas de material, que, de otra manera, no habrían sido económicos. “Históricamente, los primeros intentos en flotación fueron concentrados en la recuperación de Cobre, Plomo y Zinc; esto fue seguido por la recuperación de otros minerales metálicos de Níquel, Molibdeno, Manganeso, Cromo, Cobalto, Tungsteno, y otros. Asimismo, se fomentó bastante trabajo para la recuperación de minerales no metálicos o industriales, y hoy día, se producen grandes tonelajes de Fosfatos y Potasio para las industrias de fertilizantes y detergentes. Los minerales industriales tales como la Mica, Fluorita, Feldespatos, Berilio y Barita, también son enriquecidos por flotación por espumas. El carbón fino, anteriormente descartado como desperdicio, actualmente se recupera por flotación.

### ***2.2.2. Proceso de Flotación de Minerales***

La principal propiedad del proceso de flotación se da de forma natural en los minerales, la ganga, el material que no se adhiere a la espuma es hidrofílica y por defecto aerofóbica,

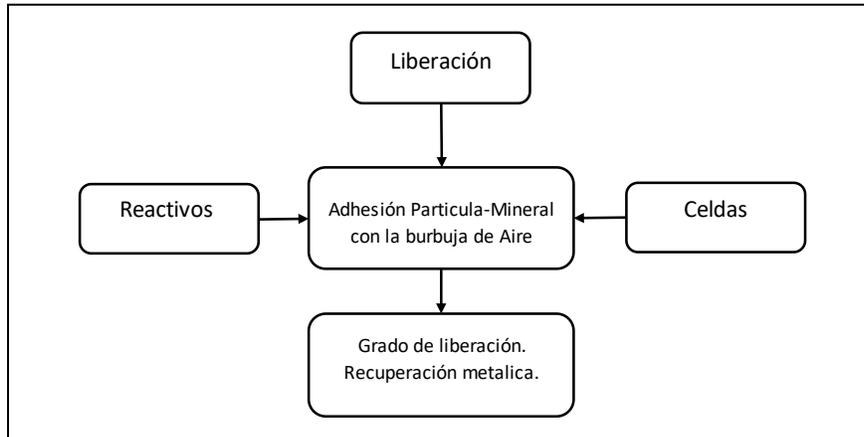
permanece en la celda de la flotación, mientras que los minerales como azufre nativo, grafito, molibdenita, carbón bituminoso poseen propiedades hidrofóbicas y aerofílicas, pueden ser flotados.

Sutulov A. (1968), *Flotación de Minerales*, Universidad de Concepción, Chile. Es un fenómeno físico-químico, usado como un proceso de concentración de minerales finamente divididos, que comprenden el tratamiento físico y químico de una pulpa de mineral creando condiciones favorables, para la adhesión de partículas de un mineral predeterminado a las burbujas de aire. Tiene por objeto la separación de especies minerales, divididos a partir de una pulpa acuosa, aprovechando sus propiedades de afinidad (hidrofílico) o repulsión (hidrofóbico) por el agua. Las especies valiosas o útiles constituyen una fracción menor del mineral, mientras que las especies no valiosas o estériles constituyen la mayor parte. El carácter hidrofílico o de afinidad hace que estas partículas se mojen, permanezcan en suspensión en la pulpa, para finalmente hundirse. El carácter hidrofóbico o de repulsión evita el mojado de las partículas minerales que pueden adherirse a las burbujas y ascender. Estas propiedades de algunos minerales se presentan en forma natural, pero pueden darse o asentarse mediante los reactivos de flotación.

La flotación se logra gracias al principio fundamental de concentración, en donde se desea obtener la mayor recuperación o grado de liberación del mineral deseado, para ello debe existir la adhesión partícula del mineral con la burbuja de aire. La adhesión solido-gas se debe a 3 factores principales, tenemos a los reactivos que dan las condiciones para que el mineral sea flotable; la liberación, es el tamaño de partícula en el que el mineral deseado se encuentra en su mayor parte libre y las celdas, que viene a ser el envase donde la pulpa se posee la agitación y aireación necesaria para mantener a todos los sólidos en constante flujo y contacto con las burbujas de aire.

## Figura 1

### *Principio Fundamental De La Flotación*



*Nota:* Figura extraída de Salage, J.L. y Forgiarini, A., *Fundamentos de la Flotación*.

### **2.2.3. Componentes del Proceso de Flotación**

El proceso de flotación se basa principalmente en los siguientes componentes.

**2.2.3.1. Componentes Químicos.** Están dados por los reactivos de flotación, los colectores, espumantes, activadores, depresores, modificadores de pH.

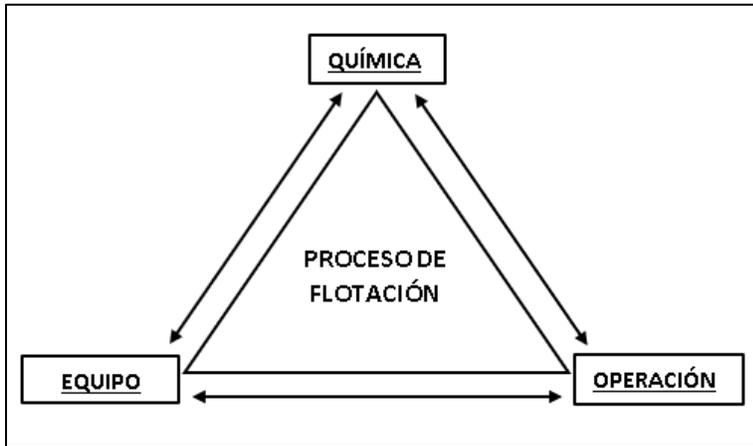
**2.2.3.2. Componentes de Equipo.** Tenemos las condiciones mecánicas como el tamaño y tipo de celda, las revoluciones por minuto del agitador, el flujo de aire, la configuración del circuito de flotación, el control realizado al tamaño del colchón de espuma, etc.

**2.2.3.3. Componentes Operacionales.** Son las características del mineral, como son el tipo de mineralogía, el tamaño óptimo de la partícula para su liberación, la densidad de la pulpa, la alimentación de pulpa a la celda y la temperatura a la cual se produce el proceso de flotación.

Cada componente es importante, al basarse en tres tipos, sin uno de ellos el proceso de flotación no podría ser efectiva, están relacionado de la siguiente manera:

**Figura 2**

*Componentes del Proceso de Flotación*



*Nota: imagen extraída y modificada del libro Flotación de Minerales de Sutulov.*

#### **2.2.4. Variables del Proceso de Flotación**

Azareño Ortiz, A. (2015) Flotación y Concentración de Minerales, Perú, dice que la flotación tiene una serie de variables entre las principales tenemos, presencia de impurezas, diseminación, pH Natural, oxidación y otros factores. Se debe tener en cuenta los problemas que se presentan en los circuitos de reducción de tamaño y clasificación, el mineral está expuesto a oxidación, además, debido a su contacto con el agua se produce la disolución de ciertos componentes de la mena, igual que la contaminación directa con fierro proveniente del proceso de conminución. El agua es también importante por cuanto se usa en enormes cantidades, lleva materias disueltas y a menudo no se puede purificar. Finalmente, tenemos el mismo proceso de flotación y otros factores como el acondicionamiento de reactivos, tamaño granulométrico del mineral, densidad de pulpa, método de aireación de la pulpa, tiempo de flotación, tipo y dosificación de reactivos entre otros.

La flotación es un proceso de muchas variables, muchos autores y especialistas clasifican las variables según las etapas que la originan en:

#### **2.2.4.1. Variables respecto al mineral.**

- Mineralogía del mineral.
- Asociación con otros componentes.
- pH natural de mineral.
- Oxidación en la explotación.
- Grado de oxidación y presencia de lamas primarias.
- Presencia de impurezas y sales solubles.
- Agua de cristalización.

#### **2.2.4.2. Variables referentes a la molienda y clasificación.**

- Lamas secundarias.
- Dureza del mineral y componentes.
- Tiempo de molienda.
- Tamaño de liberación.
- Oxidación durante la molienda.
- Adición de reactivos.
- Remolienda

#### **2.2.4.3. Variables Relacionadas al Agua.**

- Dureza del agua.
- Presencia de gases disueltos.
- Sales de metales solubles.
- pH del agua.

#### **2.2.4.4. Variables en Función al Acondicionamiento.**

- Dosificación de reactivos.
- Tiempo de acondicionamiento.
- Densidad de pulpa.
- Tamaño del acondicionador.
- Porcentaje y forma de adición de reactivos.

- Temperatura.
- pH de acondicionamiento.
- Agitación.

#### **2.2.4.5. Variables Respecto a la Flotación.**

- Tiempo de flotación.
- Nivel de espuma.
- Granulometría.
- Grado y tipo de aireación.
- Densidad de pulpa.
- Temperatura de la pulpa.
- Porcentaje de sólidos.
- Dosificación de reactivos.
- pH de flotación.
- Cantidad de carga circulante.

#### **2.2.4.6. Variables Relacionadas a las Máquinas de Flotación.**

- Potencia de la celda.
- Aireación.
- Altura de la zona de espumas.
- Revoluciones por minuto.
- Tipo de máquina.

### **2.2.5. Tipos de Reactivos**

#### **2.2.5.1. Modificadores.**

Tienen la función de preparar la superficie de los minerales para la adsorción o desorción de uno o varios reactivos y hacer que la pulpa tenga las condiciones para que otros reactivos actúen y produzcan una buena flotación, generalmente los modificadores se clasifican en:

- Modificadores del medio o de pH, que controlan la concentración iónica de las pulpas y sus reacciones por medio de la acidez o basicidad.

- Activadores, promueven las propiedades hidrofóbicas en la superficie del mineral y aumenta su flotabilidad.

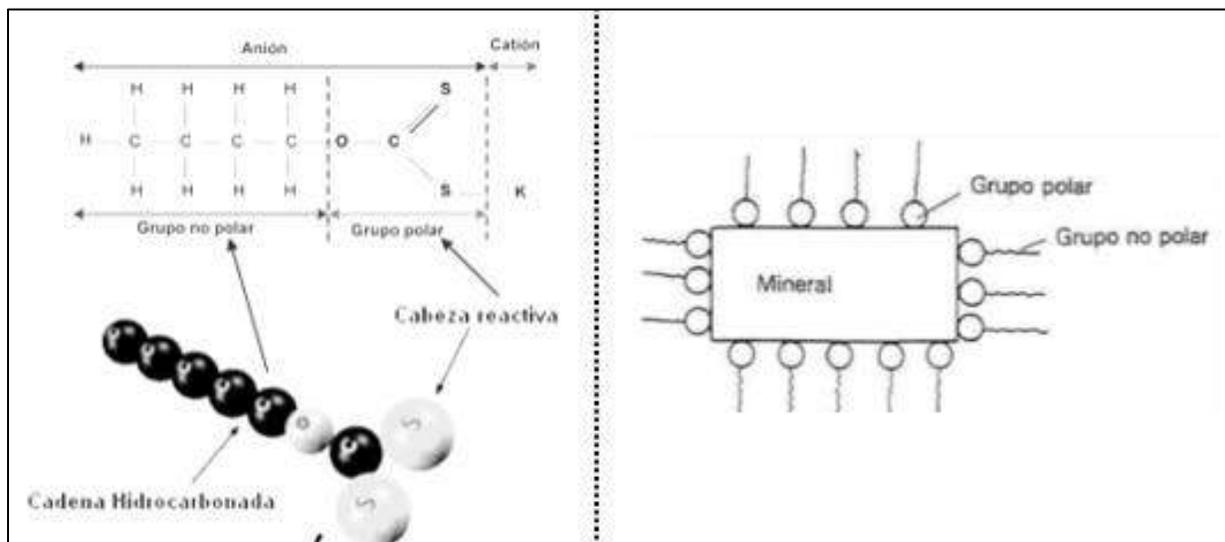
- Depresores, aerofolizan los minerales e impiden que se adhiera con la burbuja de aire, disminuyendo su flotabilidad.

**2.2.5.2. Colectores.** Mejoran las propiedades hidrofóbicas de la superficie del mineral, creando condiciones favorables para la adherencia de las burbujas de aire, esto quiere decir que habrá mayor ángulo de contacto.

Son componentes heterogéneos, por un lado, tienen un grupo polar activo el cual se adsorbe sobre el mineral y, por otro lado, una cadena de hidrocarburos (grupo no polar) que es una superficie hidrofóbica y va hacia el colchón de espumas, Figura 3, los colectores más usados pertenecen a las familias: monotiofosfatos, tionocarbamatos, ditiofosfatos, tioureas, mercaptopbenzotiazol, ésteres alil xantato, xantatoformiatos y xantatos.

**Figura 3**

*Reactivos de Flotación*



Nota: Modificado de: <https://www.monografias.com/trabajos103/reativos-flotacion/reativos-flotacion.html>

**2.2.5.3. Espumante.** Son reactivos orgánicos compuestos de una superficie activa heteropolar. El radical orgánico no polar se repele con el agua, por otro lado, el polar se atrae al agua.

Entonces las espumas tienen afinidad por la interfase líquido-gas, debido a su actividad superficial, también son capaces de reducir la tensión superficial generando estabilidad a la burbuja.

Para pruebas de laboratorio de flotación se considera adecuado una altura de colchón de espuma de 1.5 a 3.0 cm.

### ***2.2.6. Mineral de Cobre***

El mineral de cobre se encuentra en la naturaleza de diversas combinaciones y numerosos minerales, existen alrededor de 165 minerales de cobre que se conocen y solo alrededor de 12 son importantes.

Los sulfuros de cobre pueden ser clasificados de acuerdo a su composición mineralógica y al método de tratamiento por beneficio de flotación con espuma, se presenta la clasificación de minerales de cobre según su especie.

Los óxidos de cobre mayormente se someten al proceso de lixiviación, debido a que los minerales oxidados no presentan afinidad con las burbujas de Aire, para flotar oxidados es necesario realizar una sulfuración, cubriendo su superficie con sulfuros; se presenta a continuación una lista de los minerales sulfurados y oxidados más conocidos e importantes para el proceso de recuperación.

**Tabla 1***Clasificación de Minerales de Cobre.*

| <b>MINERAL</b>     | <b>FORMULA</b>                                | <b>% DE COBRE</b> |
|--------------------|---|-------------------|
| <b>ÓXIDOS</b>      |   |                   |
| <b>CUPRITA</b>     | $\text{Cu}_2\text{O}$                         | 88.8              |
| <b>TENORITA</b>    | $\text{CuO}$                                  | 79.8              |
| <b>ATACAMITA</b>   | $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$           | 59.5              |
| <b>MALAQUITA</b>   | $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$       | 57.0              |
| <b>BROCANTITA</b>  | $\text{CuSO}_4 \cdot (\text{OH})_3$           | 56.2              |
| <b>AZUCARITA</b>   | $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ | 55.1              |
| <b>DIOPTAZA</b>    | $\text{CuSiO} \cdot \text{H}_2\text{O}$       | 54.0              |
| <b>ANTLERITA</b>   | $\text{CuSO}_4 \cdot (\text{OH})_4$           | 54.0              |
| <b>CRISOCOLA</b>   | $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$    | 36.0              |
| <b>CALCANTINA</b>  | $\text{CuSO} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$       | 25.4              |
| <b>SULFUROS</b>    |   |                   |
| <b>CALCOSITA</b>   | $\text{Cu}_2\text{S}$                         | 79.8              |
| <b>COVELLITA</b>   | $\text{CuS}$                                  | 66.4              |
| <b>BORNITA</b>     | $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$                     | 63.3              |
| <b>TETANTITA</b>   | $\text{Cu}_8\text{As}_2\text{S}_7$            | 57.0              |
| <b>ENARGITA</b>    | $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$                     | 48.3              |
| <b>CALCOPIRITA</b> | $\text{CuFeS}_2$                              | 34.5              |

*Nota:* Elaboración propia

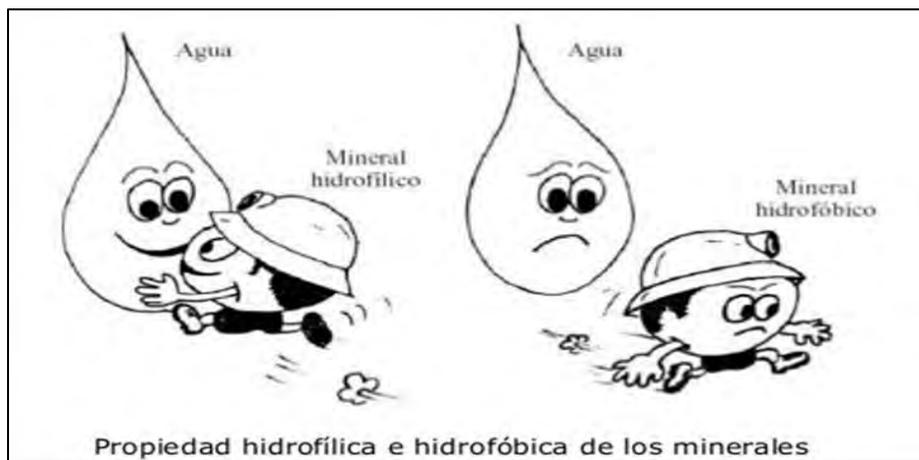
### 2.2.7. Principios de la Flotación

Ballester; A. (2014), *Metallurgia Extractiva*, España, La flotación es un proceso de concentración de minerales, en el cual se procura separar las partículas de mineral finamente molidos de menas útiles de estériles o gangas. El proceso comprende el tratamiento químico de una pulpa de mineral, a fin de crear condiciones favorables para la adhesión de ciertas partículas de minerales a las burbujas de aire. El objetivo principal, es la separación de especies minerales finamente divididas, a partir de una pulpa acuosa, aprovechando sus propiedades de afinidad (hidrofílico) o repulsión (hidrofóbico) por el agua. En el proceso de flotación por espumas la concentración de minerales puede adoptar diversas formas: La flotación colectiva (Bulk) en que se produce la separación de varios componentes en dos grupos, la flotación selectiva o diferencial en la cual se realizan la separación de compuestos complejos que contienen no más de una especie individualizada.

La figura 4, presenta la propiedad de aceptación y rechazo al agua.

#### Figura 4

*Propiedad Hidrofílica e Hidrofóbica de los Minerales*



Nota: Recuperado de: <https://Procesosbio.wikispaces.com>

Para poder optimizar el proceso de flotación, se realizan pruebas en laboratorio. Por lo general las pruebas se realizan en celdas de flotación que aceptan entre 500 y 2000 g de mineral.

La preparación de muestra parte de un mineral de alimentación a la planta, que requiere una etapa o más para la reducción de tamaño hasta lograr que toda la muestra pase por la malla N° 10 Tyler (1700  $\mu\text{m}$ ). posteriormente las muestras que fueron preparadas se someten a pruebas de molienda para determinar el tiempo de necesario para la reducción de tamaño de acuerdo al plan experimental de flotación.

### ***2.2.8. Flotación de Sulfuros de Cobre***

El cobre ocupa el primer lugar entre los metales que se recuperan por flotación. La mayor parte proviene de los sulfuros tales como la Calcopirita, Calcosina, Bornita, Covelina, Tenantina, Tetraedrita, Enargita y varios otros. El resto proviene de minerales oxidados, tales como Cuprita, Malaquita, Azurita, Crisocola, Chalcantita, Brochantita y otros”. “Hablando en forma general, los sulfuros de Cobre son minerales de flotabilidad buena y pareja. Su flotabilidad natural empieza a disminuir sólo cuando son afectados por la oxidación o por algunos fenómenos secundarios como son, por ejemplo, la depresión por lamas y productos de descomposición. Los estudios sobre la flotabilidad relativa de las distintas especies mineralógicas no llevan a conclusiones unánimes. (Sutulov; A. 1968, p. 203)

Los minerales sulfurados de cobre, por lo general, están acompañados por los minerales o compuestos de hierro. La pirita que es el principal mineral de hierro que se presenta en el cobre, varía dentro de límites considerables de un yacimiento a otro y puede estar presente en bajas cantidades de 3% y en altas cantidades de 20%, cabe mencionar que la pirita es muy flotable en medio ácido. Ya que existe una alta proporción se considera como desecho y acompaña a la mayoría de sulfuros de cobre. Podemos decir que existe un gran número de reactivos y estudios

sobre flotación que se han efectuado para los minerales sulfurados de cobre, por esta razón tenemos en este campo una tecnología simple y eficiente.

### ***2.2.9. Flotación de Óxidos de Cobre***

La flotación de minerales oxidados es muy importante, se tiene conocimiento por varios autores que los óxidos de cobre flotan directamente si este óxido se encuentra directamente asociado a la partícula, con ayuda de colectores de cadena larga de carbón. Existen reactivos colectores modificados especializados para la flotación de óxidos, pero no es rentable debido a su alta dosificación y elevado costo, debido a eso las plantas de concentración optan por el método de sulfurizar los óxidos por medio de reactivos modificadores. Entre los minerales oxidados de cobre que se presentan en la flotación mixta de cobre se tiene principalmente a la Malaquita ( $\text{CuO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ ), Crisocola ( $\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) y Cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). la flotación con sulfurización considera la influencia del oxígeno en la superficie del mineral.

Los reactivos que se emplean para sulfurizar son:

- Sulfuro de Sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )
- Sulfuro ácido de sodio ( $\text{NaHS}$ )
- Sulfuro de bario ( $\text{BaS}$ )

Estos reactivos forman una capa superficial al mineral oxidado de cobre, donde la parte del sulfuro se disgrega y se conecta con el colector para después adherirse a la burbuja de aire.

### ***2.2.10. Teoría de la Flotación de Minerales***

La flotación teóricamente debe explicar la manera mecánica por el cual actúan los reactivos colectores, modificadores y espumantes, las condiciones para que un reactivo químico

sea colector de un determinado mineral; y debe establecer las condiciones físico-químicas que producirían un desempeño más óptimo del proceso. Indica que los avances que se han logrado, han llevado a la concepción actual que la interacción entre el colector y la superficie del mineral es de naturaleza electroquímica. Se ha demostrado que el oxígeno, en medio alcalino; además de transformar la superficie de los sulfuros en especies oxidadas de mayor solubilidad, cumple la importante función de actuar como aceptante de electrones permitiendo la formación de disulfuros orgánicos que confieren un alto grado de hidrofobicidad al recubrimiento formado únicamente por la sal metálico del colector. (Mamani; 2013, pp. 9- 17)

De esta forma las antiguas teorías de reacción química entre el colector y el sulfuro metálico o de simple adsorción de iones, han dejado paso a nuevas teorías, existiendo las siguientes:

- Teoría química o de oxidación superficial.
- Teoría de los semiconductores.
- Teoría de la adsorción física.
- Teoría Electroquímica.

De las teorías mencionadas las que mayor aplicación tienen para minerales sulfurados son la teoría electroquímica y la teoría de adsorción física.

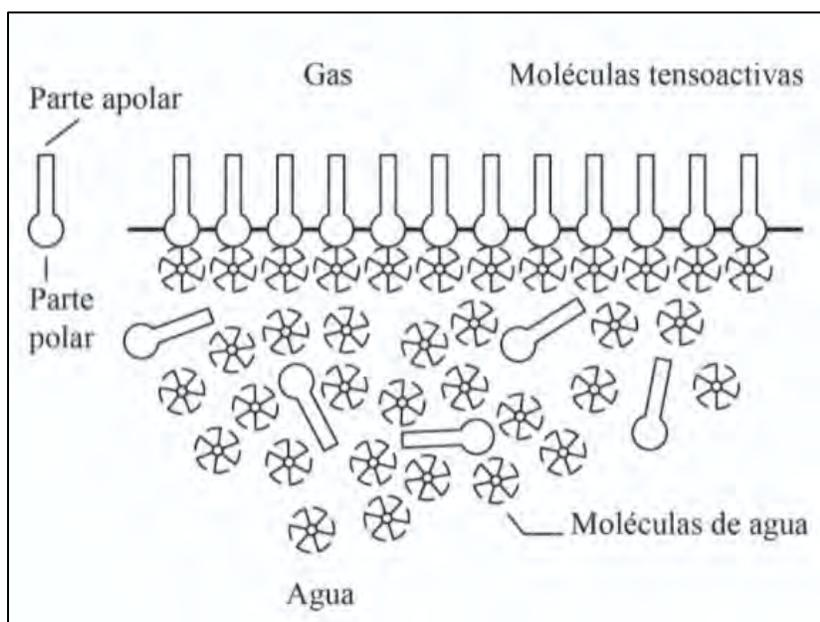
### ***2.2.11. Teoría de la Adsorción Física***

Ballester A.; (2003), Metalurgia Extractiva, España. El autor considera finalmente que los minerales con cristales de estructura atómica favorecen la adsorción física y los minerales con estructura iónica favorecen la fijación por intercambio iónico.

En el estado de equilibrio el agua tiene una cierta cantidad de energía libre que se expresa por su tensión superficial. Al introducir en este sistema un líquido orgánico heteropolar el sistema va a tratar de llegar a un nuevo estado de equilibrio que, según el segundo principio de la termodinámica, tiene que tener el mínimo de energía libre. A este estado se llega, precisamente, si las materias heteropolaras se absorben selectivamente en la interface gas- liquido (ver Fig. 5) pues de esta manera queda neutralizada la energía libre de la superficie y la tensión superficial del sistema se reduce en forma notoria. La parte polar de las moléculas queda ligada al agua y la parte apolar forma una película mono molecular inactiva sobre la superficie. Los compuestos que se adsorben selectivamente en las interfaces gas- líquido se llaman tenso-activos.

### Figura 5

*Fenómeno de Adsorción de Materias Tensoactivas*



*Nota:* Adaptado de Ballester A.; Metalurgia Extractiva

El fenómeno de la adsorción fue estudiado y deducido matemáticamente por Gibbs quien llegó a la siguiente formula:

$$A = - \frac{C}{RT} \left( \frac{\partial s}{\partial c} \right)$$

Dónde: A es la cantidad de sustancia adsorbida, o sea, la diferencia entre su concentración en la interface y en el líquido.

- C es la concentración de la sustancia.
- $\frac{\partial s}{\partial c}$  Es el cambio de tensión superficial relacionado con el cambio de concentración.
- R Y T constantes de gases y temperatura absoluta, respectivamente.

Es evidente que con la disminución de la tensión superficial la adsorción aumenta del mismo modo que con el aumento de concentración de la sustancia absorbida (isotermas de absorción).

### ***2.2.12. Teoría del Potencial Electrocinético***

Cuando el sólido empieza a moverse en el líquido los iones que forman la doble capa del potencial electroquímico quedan firmemente asociados con la superficie que siguen, mientras que los iones de la zona de difusión quedan inmóviles o se mueven en otra dirección. El potencial que surge entre las dos superficies, eléctricamente cargadas, que se mueven en direcciones opuestas, se llama potencial electrocinético o potencial zeta ( $\zeta$ )

Los potenciales electrocinéticos existen también entre líquidos y gases. La estructura de las capas eléctricas es completamente análoga, reemplazando ahora la interface líquida – gas a la interface líquido – sólido. Los iones que forman la capa doble están en este caso en la superficie misma que separa el gas del líquido y la zona de difusión se extiende en la profundidad de este. La capa doble se encuentra entonces íntegramente en el líquido.

Los fenómenos involucrados con los potenciales electroquímicos y electrocinética, como se puede observar, son de notable trascendencia para los procesos de flotación. Su presencia conduce no solo al fenómeno de hidratación, sino también a la adsorción de líquidos orgánicos que actúan como colectores y agentes espumantes. Las partículas minerales en desplazamiento, igual que las burbujas, originan una potencial electrocinética que refleja la composición íntima de las capas dobles y regiones de difusión y dichos potenciales, paralelamente, tienen la posibilidad de influir añadiendo materias iónicas que cambian su magnitud o carga, construyendo de esta manera las condiciones deseadas para una buena flotación.

**2.2.12.1. Potencial electroquímico.** Al hidratarse el mineral se desarrolla el proceso de hidratación, generalmente en forma dispareja. Al hidratarse la red cristalina de carácter iónico, los cationes también se hidratan y posteriormente se disuelven a una gran velocidad en los aniones.

Este proceso genera inmediatamente un desequilibrio eléctrico del sistema, ya que la superficie del mineral se carga negativamente.

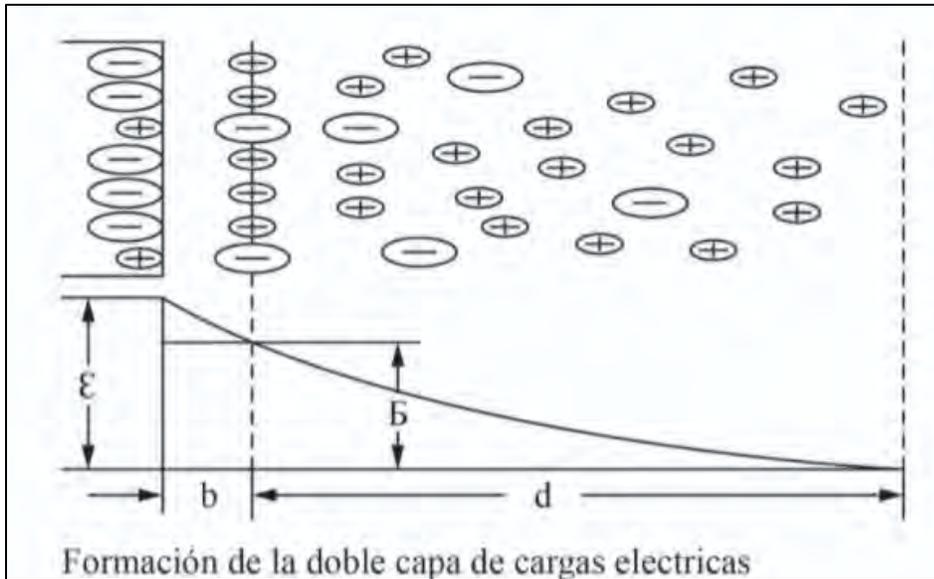
Para equilibrar el sistema sólido – líquido, la superficie cargada negativamente en primer lugar cesará o frenará la disolución de cationes todavía presentes en la red cristalina y en seguida, desde la solución atraerá los iones cargados positivamente. De este modo entre la superficie y el líquido se formará un potencial eléctrico cuyo origen se encuentra en la doble capa de cargas eléctricas recién señalada (ver Fig. 6). El potencial eléctrico formado por la capa eléctrica de iones de la solución junto con la superficie cargada eléctricamente se llama potencial electroquímico.

La doble capa de cargas eléctricas es de gran importancia en los fenómenos de flotación, porque afecta directamente la adsorción de reactivos en la superficie mineral. Se ha visto que

existe una interacción directa entre el costo del potencial eléctrico y la proporción de moléculas o iones absorbidos. Ejemplificando, la adsorción de moléculas orgánicas se incrementa con el decrecimiento del potencial y es máxima una vez que el potencial es igual a cero. Por otro lado, cuando alcanza un valor alto, el potencial puede reducir la absorción de moléculas orgánicas a cero.

**Figura 6**

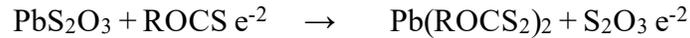
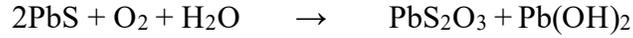
*Formación de la Doble Capa de Cargas Eléctricas*



*Nota:*  $\epsilon$ : potencial electroquímico,  $b$ : zona de la doble capa,  $\eta$ : potencial electrocinético,  $d$ : zona de la difusión; Adaptado de: Ballester A.; Metalurgia Extractiva.

**2.2.13. Teoría Química o de la Oxidación Superficial**

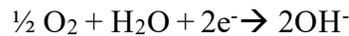
Debido al medio acuoso con pH alcalino, en general los minerales sulfurados sufren de oxidación en la parte superficial, especialmente de tiosulfato básico de plomo. Estudios demuestran que al aplicar un colector del tipo xantato existe un intercambio iónico, para mejor entendimiento, el mecanismo se resume en las siguientes reacciones:



De esta manera se produce la formación de recubrimiento de colector formado por xantato, este colector es responsable de la hidrofobización de la partícula. Sin embargo, varios autores han mostrado que superficies de plomo que están recubiertas con xantato conservan su hidrofobicidad. El proceso de oxidación superficial es poco realista para metales como son el oro y platino, mostrando ser poco importante para metales de mayor consumo como el cobre y galena.

#### **2.2.14. Teoría de los Semiconductores**

Se fundamenta en la hidrofobización si atribuye a la formación de una especie oxidada del colector, el dixantógeno se forma directamente sobre la superficie del mineral. El más común aceptor de electrones es el oxígeno, a través de su reacción con el agua:



De esta manera cuando las bandas de conducción de un sulfuro semiconductor son electrones en exceso se les denomina semiconductores tipo N (negativos), por otro lado, si las bandas están representadas por huecos son positivos, Semiconductores tipo P. Así, la adsorción de especies aniónicas está favorecidas sobre el semiconductor tipo P. La transformación de xantato a dixantógeno es por oxidación, esto se produce por el paso de un electrón hacia la red cristalina, ya que generan huecos por la ausencia de electrones libres.

#### **2.2.15. Fases del Proceso de Flotación**

Ayala Mina, J. y Pardo Mercado, R. (1995) *Optimización Por Diseños Experimentales*, Perú. La flotación de minerales por el método de flotación por espumas se basa en el contacto

íntimo entre tres fases, una sólida, líquida y gaseosa. Las dos últimas están representadas casi siempre por agua y aire siendo la fase sólida representada por el mineral que se desea recuperar. El estudio de la termodinámica del proceso nos da una mejor comprensión del mecanismo de algunas reacciones, como la hidratación, y de los fenómenos tales como tensión superficial, adsorción, capilaridad, etc. Es importante señalar que el fenómeno de flotación hace uso de propiedades de superficie nuevamente creadas, y no pueden recibir una explicación cuantitativa enteramente satisfactoria.

El proceso de flotación de minerales por espumas presenta tres fases, estas son:

**2.2.15.1. Fase Sólida.** El mineral está compuesto por finas partículas de minerales triturados, sus propiedades superficiales dependen de su estructura y su composición.

Se tiene entendido que el sistema cristalino es muy importante ya que influye de manera directa en el área de disolución que se conforma en reducción de tamaño del mineral. La reducción de tamaño juega un papel importante por los siguientes componentes: Características del área originada por la separación del sólido (fuerzas residuales de enlaces, tipo de área). Contaminantes provenientes de sólidos líquidos y gases (oxidación). Recursos traza, se concentra en las áreas de los granos.

**2.2.15.2. Fase Líquida.** Se presenta por agua y reactivos líquidos, el agua contiene dos polos, o sea es polar y provoca la hidratación de la superficie del mineral en soluciones acuosas.

En iones por lo general contiene iones libres de cloro, sodio, potasio y otros minerales, como también impurezas y contaminantes naturales. La contaminación natural del agua que es causada por el calcio, magnesio y sodio se le denomina agua dura, esta puede modificar completamente la flotabilidad de ciertos minerales, también puede generar consumo desmesurado de reactivos, formación de insolubles, etc.

**2.2.15.3.Fase Gaseosa.** En el proceso de flotación está conformada generalmente por aire que se inyecta de manera mecánica o neumática en la pulpa y llega a formar burbujas que son el centro de ataque a las partículas del mineral, en otros casos de otro gas es el nitrógeno. Las principales funciones de la fase gaseosa son:

- Influye químicamente en el proceso de flotación.
- La burbuja es el medio de transporte del mineral para llegar a la superficie de la pulpa.

### ***2.2.16. Interfaces del Proceso de Flotación***

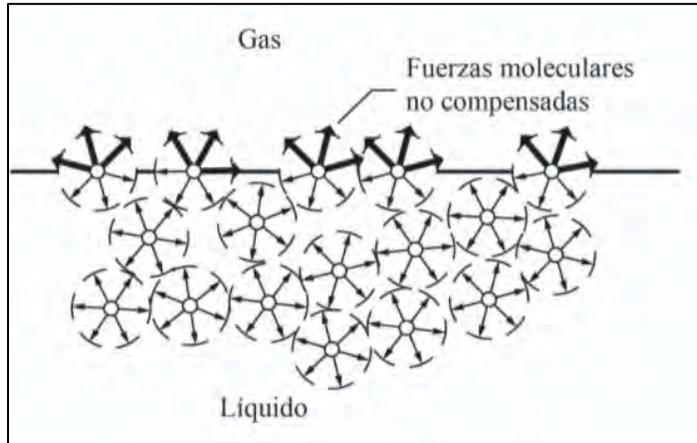
La flotación de minerales es un proceso fisicoquímico ya que el fenómeno ocurre con interacciones físicas y químicas entre los elementos compuesta por las tres fases habladas con anterioridad, todo esto ocurre a través de tres interfaces, que son: Gas – Líquido y Sólido – Líquido.

**2.2.16.1.Interface Gas – Líquido.** El líquido en equilibrio con su vapor tiene la característica de presentar la existencia en su superficie de energía libre, cuya magnitud está dada por la tensión superficial.

La energía libre se origina por la influencia entre todas las moléculas del líquido y se atraen o repelen mutuamente; estas fuerzas se compensan entre sí, dentro del líquido y su resultante es igual a cero. Pero, las moléculas que se ubican en la superficie no están completamente compensadas, ya que la mitad de su volumen se orienta hacia la fase gaseosa (ver figura 7) donde la dilución de materia se encuentra de tal manera que prácticamente representan el vacío y no se encuentran demasiadas moléculas para absorber la presión de la película superficial. Esta es la manera que se crea una cantidad de energía libre, cuya magnitud es medida por la tensión superficial.

**Figura 7**

*Interpretación Esquemática del Origen de la Tensión Superficial*



*Nota:* Adaptado de Ballester A.; Metalurgia Extractiva

La energía libre tiene naturaleza del tipo de enlace de Van der Waals, debido a que se trata de interacción entre moléculas, por esta razón el alcance de su influencia es baja, pequeña, en tamaño angstroms.

Esta energía libre se interpreta como energía potencial porque se puede considerar que las moléculas de la superficie están siempre a una mayor elevación y se necesita una cierta cantidad de energía para llevarlas a este nivel.

**2.2.16.2. Interface Sólido – Líquido.** La hidratación de los sólidos se da debido a que se encuentra sumergido en el agua, esto depende de las características hidrofóbicas del sólido, o sea de sus características eléctricas que existen en la superficie del mineral.

La hidratación de minerales oxidados empieza con la formación de hidróxidos, posteriormente, como en el caso de enlaces iónicos, si la fuerza de enlace cristalino es menor a la fuerza de hidratación, se genera la disolución de sólidos en el agua. Es un fenómeno de dependencia de carácter sólido y concentración de solución acuosa.

### 2.2.17. Contacto de Tres Fases

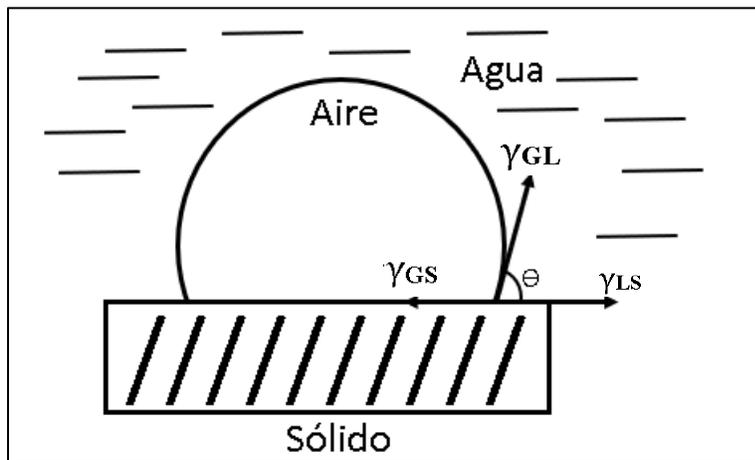
Al estudiar las fases e interfaces, nos llevan al contacto de las tres fases, contacto trifásico, tiene gran importancia, debido a que presenta lo que sucede en el proceso de flotación. En la flotación de una partícula sólida en una burbuja de aire, su unión se genera a través de un contacto trifásico que tiene propiedades muy esenciales.

Para su estudio debemos tener en cuenta que la fase sólida se considera como una superficie hidrofóbica sumergida en el agua donde se introduce la burbuja de aire. (ver Fig. 8). Simplificando, la superficie del mineral puede ser una placa de vidrio cubierta por hidrocarburos.

Teniendo en cuenta que el contacto de dos fases se da siempre por una superficie y el contacto de la superficie con otra (tercera fase) genera una línea, matemáticamente esta línea de contacto trifásico se le denomina ángulo de contacto, es conveniente usar el ángulo de forma superficial con el contacto de las fases (ver ángulo  $\theta$  en la Fig. 8).

**Figura 8**

*Definición del Angulo de Contacto*



*Nota:*  $\gamma_{GS}$ - Tensión Sólido Gas;  $\gamma_{GL}$  – Tensión Líquido Gas;  $\gamma_{LS}$  – Tensión Sólido Líquido.

Imagen mejorada del libro de Ballester A.; Metalurgia Extractiva.

### 2.2.18. Angulo de contacto

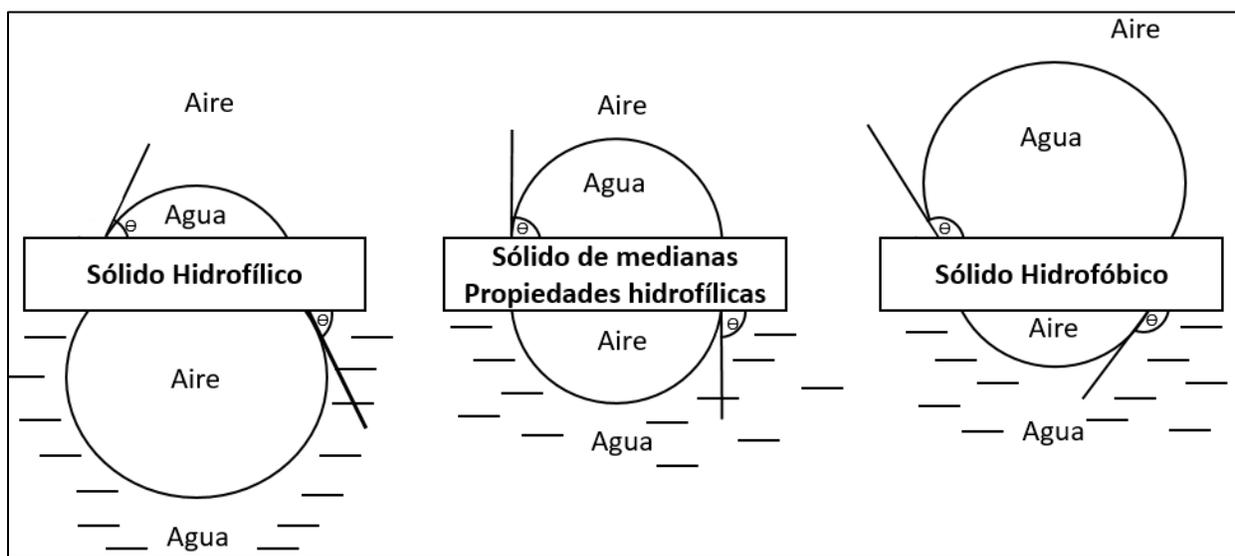
El ángulo de contacto está formado entre la tangente a la gota del líquido, que se deposita en la superficie sólida, con la tensión de las interfaces: líquido – gas; sólido – gas; y sólido – líquido. Existe equilibrio de fuerzas entre las interfaces. La línea de contacto trifásica se extiende en forma de círculo sobre la superficie plana del mineral. Si se traza una tangente a la superficie de la burbuja, entonces el ángulo ( $\theta$ ) entre la superficie y la tangente se llama ángulo de contacto.

El ángulo de contacto tiene gran importancia ya que relaciona en forma cuantitativa las propiedades hidrofóbicas del mineral con su flotabilidad. En sí para la relación de mojabilidad de un mineral con al ángulo de contacto se utiliza el coseno de  $\theta$  ( $\cos\theta$ ).

La mojabilidad de la superficie plana del mineral depende del ángulo de contacto, ya que mientras más grande sea en ángulo de contacto el mineral será más hidrofóbico, tenemos la figura 9 donde se puede observar lo siguiente.

**Figura 9**

*Ángulos de Contacto en Sólidos de Distintas Mojabilidades*



*Nota:* Imagen mejorada del libro de Ballester A.; Metalurgia Extractiva

Se puede concluir que existe una equivalencia entre las propiedades hidrofóbicas y aerofílicas, también en viceversa. Se debe al coseno del ángulo de contacto ( $\cos\theta$ )

### ***2.2.19. Termodinámica de la Flotación***

El fenómeno de flotación se explica en base a las propiedades hidrofóbicas de las partículas que tienen facilidad de adherirse y formar uniones estables con las burbujas de aire, anteriormente preparadas con ayuda de un espumante adecuado. Sin embargo, la interrogante del proceso es: ¿Cuál es la fuerza que hace posible la unión entre la burbuja y la partícula?

En la flotación la fuerza que une la burbuja con la partícula no es tan evidente, no es extraño que hubiera una confusión ya que al comienzo se trata de atribuir esta función a la fuerza de la tensión superficial, que naturalmente no tiene nada que ver con el mecanismo de flotación, entonces la correcta interpretación de termodinámica del fenómeno se declaró en 1925 por Bartsch, diciendo que la fuerza que une la partícula con la burbuja es la fuerza termodinámica que tiene a reducir un sistema cerrado a un mínimo de energía libre.

Esta interpretación se deduce fácilmente en forma matemática, considerando el sistema de la figura 8 en el estado de equilibrio. El balance de tensiones interfásicas, para el punto O, será igual a cero según la ecuación:

$$\gamma_{gs} - \gamma_{ls} - \gamma_{lg} \cos\theta = 0$$

Entonces:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{gs} - \gamma_{ls}}{\gamma_{lg}} \quad \text{Ecuación de Young}$$

El trabajo A necesario para desplazar el agua desde la unidad de superficie es igual a la fuerza necesaria para romper la adhesión del agua a la superficie, o sea:

$$A = \gamma_{gs} + \gamma_{gl} - \gamma_{ls}$$

Reemplazando tenemos:

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

Analizando la última ecuación vemos que el ángulo de contacto depende efectivamente de la relación entre la fuerza de cohesión entre las moléculas de agua y la fuerza de adhesión entre el agua y la superficie del mineral.

Si  $\theta = 0$ , entonces  $\cos \theta = 1$  y el trabajo necesario para separar el agua desde la superficie tiene que ser igual o mayor que la cohesión del agua. Este es el caso de los cuerpos netamente hidrofílicos. Por otra parte, si  $\theta$  es un ángulo finito, mayor que cero, entonces el trabajo necesario para remover el agua será menor que  $2\gamma_{gl}$  y en consecuencia, las fuerzas que unen la superficie del mineral con el agua son inferiores a las fuerzas de cohesión que rigen entre las moléculas de agua. (Sutulov; A. 1968, pp. 54-55).

### **2.2.20. Termodinámica de Interfaces**

En esta sección se consideran dos aspectos:

- La termodinámica de la adsorción sobre las superficies minerales en las interfases aire- agua
- Termodinámica que controla la adherencia de las partículas de minerales a las burbujas de aire.

La entalpía de una unidad de área de cualquier superficie, que es igual a la energía total de superficie;  $E_s$  se expresa por la ecuación:

$$E_s = \gamma + TS$$

Donde  $\gamma$  es la energía libre de la superficie por unidad de área; S es la entropía de la superficie por unidad de área, T es la temperatura absoluta.

Toda interfase es el lugar de una fuerza de tensión, que actúa en el plano de la interfase, a tal fuerza de tensión se le conoce como tensión superficial y se considera igual a la energía libre de superficie. La entropía de la superficie a presión constante se expresa por la ecuación:

$$S = \frac{d\gamma}{dT}$$

De manera que la energía total de superficie puede relacionarse con la tensión interfacial mediante la ecuación: (Azareño, 2015 p. 56)

$$E_s = \gamma - T \frac{d\gamma}{dT}$$

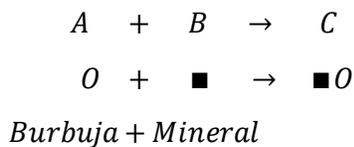
### ***2.2.21. Cinética de la Flotación***

Se define como la variación de la cantidad del producto que se obtiene en la celda con respecto al tiempo de flotación.

En el proceso de flotación se identifican tres zonas, que contribuyen en la formación complementaria al resultado final del proceso, pero, la dificultad de expresar los fenómenos fisicoquímicos que se generan en ambas zonas en forma exacta, así como la de medir directamente el transporte de mineral entre ellas, se limita el uso y la confiabilidad de diversos modelos matemáticos teóricos.

### 2.2.21.1. Método Cinético (García – Zúñiga).

Este modelo fue introducido en 1935, reconoce que el comportamiento exponencial de primer orden, para así determinar la cinética de flotación. La forma de la interfase partícula-burbuja en la zona de colección se puede asimilar a una reacción química como se muestra a continuación.



Sin embargo, la flotación no solo consiste en la formación del concentrado, sino que además se necesita la separación del mineral sólido, es decir, el transporte de la espuma y finalmente el concentrado. En la práctica, a pesar de las complejidades del proceso de flotación, la variación de la concentración normalmente se puede representar por una ecuación simple de primer orden.

Para esta operación en particular, se tiene que la variación en peso del mineral es proporcional al peso del mineral en la zona de colección, dada por la ecuación:

$$\frac{dc}{dt} = -K \cdot m$$

Donde:

**C:** Concentración al interior de la celda: m/v

**K:** constante cinético de flotación (1/t)

**m:** masa

El parámetro K representa la constante cinética de una determinada especie; y depende de varios factores: naturaleza del mineral, composición química, asociación de especies minerales,

acondicionamiento del mineral, reactivos de flotación, condiciones de operación tales como flujo de aire, tasas de alimentación, forma y diseño de la celda entre otros.

Considerando la condición del límite  $C=C_0$ , en  $t=t_0$  se obtiene:

$$C = C_0 \cdot e^{-k \cdot t}$$

Luego la recuperación de mineral se puede expresar según la ecuación:

$$R = \frac{C_0 - C(t)}{C_0}$$

Reemplazamos y se obtendrá el modelo de recuperación ideal para operaciones batch, una ecuación de primer orden. (Azareño, 2015 pp. 60-63)

$$R = 1 - e^{-k \cdot t}$$

Otros autores indican que el modelo cinético de flotación que fue desarrollado por García y Zúñiga y se basa en el supuesto que la tasa de colisión de partículas-burbujas es de primer orden con respecto al número de partículas presente y que la concentración de burbujas en el sistema permanece constante.

La ecuación cinética de primer orden se expresa de la siguiente forma:

$$R = R_{\alpha}(1 - e^{-kt})$$

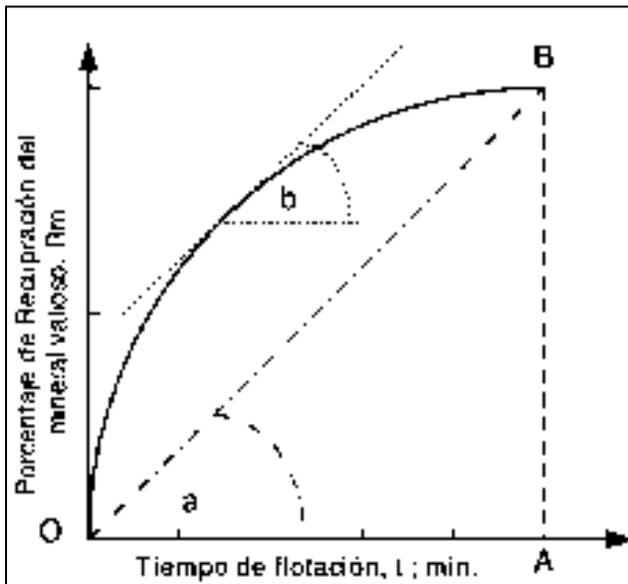
Donde:

**R:** Recuperación Útil

**R<sub>α</sub>:** Recuperación máxima teórica.

**Figura 10**

*Cinética de flotación*



Nota: Figura extraída de Ballester A.; Metalurgia Extractiva.

### **2.2.22. Modelamiento del Proceso de Flotación**

En la práctica, el estudio del sólido finamente dividido se realiza separando las partículas en un número finito de clases de tamaño. Las propiedades como flotabilidad no son modelables por valores únicos ni bien definidos, ni siquiera para especies puras, y no pueden ser consideradas como intrínsecas de las especies minerales, pues varían no sólo con el acondicionamiento de los reactivos, sino con las condiciones de operación del proceso de separación (Guevara, 2001).

En forma general, en el proceso de flotación se identifican dos zonas, la zona de colección y la zona de espuma que atribuyen de modo complementario al resultado final del proceso de separación. Sin embargo, la dificultad de expresar los fenómenos físicos y químicos que ocurren en ambas zonas, así como la imposibilidad de medir directamente el transporte de mineral entre ambas zonas, limita el uso y confiabilidad de modelos matemáticos teóricos.

Existen distintos tipos de modelos para describir el proceso de flotación:

**2.2.22.1. Modelos Empíricos.** Se basa en realizar experimentos en serie, de los cuales se busca recopilar una gran cantidad de datos que son analizados para entregar información coherente.

El problema es que no permite realizar extrapolaciones con los datos obtenidos. Se puede adaptar o no y los fenómenos fenomenológicos son difíciles de describir debido a que poseen gran cantidad de variables.

**2.2.22.2. Modelos Probabilísticos.** Este modelo es utilizado para realizar diversos diagnósticos de operación, comparar reactivos de flotación entre otros. Además, se puede caracterizar el comportamiento del mineral frente a diferentes tipos de dosis de reactivos, pH de trabajo, tiempo de flotación, etc.

**2.2.22.3. Modelos Cinéticos.** Reconoce el comportamiento exponencial de primer orden, para determinar la cinética de flotación. La forma de agregar partícula de burbuja en la zona que se colecta el mineral se puede asimilar a una reacción química como, por ejemplo:



Sin embargo, en el proceso de flotación no solo consiste en formación de agregado, sino que, se necesita la separación del mineral sólido, quiere decir, el transporte de las burbujas y finalmente la concentración. Se tiene que la variación másica de mineral es proporcional a la masa del mineral en la zona que se colecta, dada por la ecuación de modelo cinético de variación:

$$\frac{dm}{dt} = -k \cdot m$$

### ***2.2.23. Balance Metalúrgico***

Para obtener el producto final que será comercializado con las condiciones técnicas requeridas por la planta de proceso o comprador, los materiales indeseables de la mena deben ser rebajados en porcentaje de concentración y aumentar la concentración de la especie metálica que se desea obtener.

Los balances metalúrgicos se pueden realizar en cualquier método de concentración, ya sea eléctrica, magnética, gravimétrica, su importancia se basa en permitir manipular la información con mayor confiabilidad, esto para toma de decisiones, ayudando así el mejor entendimiento de cómo se comporta el sistema, considerando que la información obtenida se registra en tiempo real.

Tiene varios objetivos, entre los cuales está diseñar un sistema de información que procese datos precisos; analizar el método de recolección de datos para administrar la información; se puede construir un software que administre los datos del balance metalúrgico para construir en la toma de decisiones, se aplica mayormente en reportes diarios, balances por circuitos o secciones, balances puntuales y para determinar las deficiencias en el circuito y encontrar posibles decisiones.

En la planta de Beneficio Jesús S.A.C., realizar el balance metalúrgico es una práctica diaria, que se divide por turnos, tomando muestras de la cabeza cada hora, por turno son en total 12 muestras, se junta en un compósito y se saca una muestra representativa para llevarlo a analizar, de esta manera se obtiene la ley de cabeza por turno, de igual manera sucede con el concentrado y el relave final, 12 muestras de pulpa y 12 de relave que son secados para luego homogeneizarlos y sacar una muestra representativa de cada uno para analizarlo químicamente, de esta manera se obtienen las leyes de cabeza, del concentrado y del relave final. Para obtener el

porcentaje de recuperación, se necesita el tonelaje de cabeza por turno, que son de 150 toneladas. Para hallar el tonelaje del concentrado se determina el volumen saliente cada hora, por el caudal y se determina su porcentaje de humedad y la gravedad específica del concentrado, de esta manera por ecuaciones se obtendrá el peso del concentrado, por diferencia se halla el peso del relave. Este es el proceso por el que se obtienen los datos necesarios para realizar el balance metalúrgico.

#### ***2.2.24. Diseño Experimental***

Los diseños experimentales constituyen la estrategia más adecuada para obtener modelos matemáticos empíricos con un mínimo de pruebas experimentales.

Un experimento es una prueba o ensayo.

Un experimento diseñado está definido como una prueba o serie de pruebas en los cuales se efectúan cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en las respuestas de salida.

##### ***2.2.24.1. Aplicaciones del diseño experimental***

El diseño experimental es una estrategia más adecuada para obtener modelos matemáticos empíricos con un mínimo de pruebas experimentales para mejorar el rendimiento de un proceso o en el desarrollo de nuevos procesos.

Las aplicaciones técnicas del diseño experimental en su fase inicial del desarrollo de un proceso pueden proporcionar los resultados siguientes:

- Mejora en el rendimiento de un proceso.
- Menor variabilidad
- Menor tiempo de desarrollo.

- Menores costos globales.

#### **2.2.24.2. Experimento factorial**

Para localizar el intervalo óptimo es necesario realizar un experimento en el que se hace variar simultáneamente dos variables significativas del proceso a dos niveles. En cualquier problema experimental hay dos aspectos que se debe tomar en cuenta; el diseño de experimentos y los análisis estadísticos.

Los tres principios básicos en el diseño de experimentos son:

1. Obtener las réplicas, para la determinación del error experimental y calcular en forma más precisa el efecto de un factor en el experimento.

2. Aleatoriedad; la asignación del material experimental y orden en que se realizan las pruebas individuales o ensayos se determinan aleatoriamente.

3. El análisis por bloques es una técnica usada para incrementar la precisión del experimento. Un bloque es una porción del material experimental que sea más homogénea posible que el total del material.

#### **2.2.24.3. Diseño factorial**

Es aquel en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento. Por nivel se entiende a los diferentes valores que puede tomar los factores o variables.

Si se considera 2 niveles, el diseño se llama diseño factorial a 2 niveles o factorial  $2^k$ . Los diseños factoriales permiten determinar los efectos de un factor en diversos niveles de los otros factores en las condiciones experimentales que se está realizando.

Los tipos más sencillos de diseños factoriales implican solo 2 factores o conjunto de tratamientos. Hay (a) niveles del factor A y (b) niveles del factor B, dispuestos en un diseño factorial.

Para iniciar un proceso de optimización y cuando no se conoce el comportamiento y la influencia de las variables que afectan a un proceso cualquiera; es necesario efectuar un análisis e identificar las variables más significativas.

Las observaciones pueden describirse mediante el modelo estadístico lineal o de primer orden.

## Capítulo III

### Hipótesis y variables

#### 3.1. Hipótesis

##### 3.1.1. Hipótesis General

Disminuyendo la dosificación de A-3418 y aumentando la del Z-6 se logra mayor recuperación de cobre en el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre a nivel de laboratorio.

##### 3.1.2. Hipótesis específicas

- Las características mineralógicas del mineral mixto de la planta de beneficio Jesús S.A.C., son favorables para la flotabilidad y recuperación del cobre.
- La recuperación de cobre aumenta al disminuir la dosificación del colector A-3418 a la mitad y reemplazando lo quitado de A-3418 por Z-6.
- Al aumentar la recuperación de cobre y disminuyendo el consumo de A-3418, se logra aumentar las ganancias en el proceso de flotación de minerales mixtos de cobre.
- Con el uso del software MINITAB, se halla el modelo matemático que explica el comportamiento de las variables más significativas del proceso de flotación.

#### 3.2. Variables de investigación

##### 3.2.1. Variables Dependiente

- Recuperación de cobre total.

##### 3.2.2. Variables Independiente

- Dosificación de A-3418.
- Dosificación de Z-6.

### **3.3. Variables Intervinientes**

Son aquellas que modifican la relación entre la variable independiente y la dependiente.

Dificultan las relaciones de las interacciones de los factores experimentales.

- Ley del Mineral
- Insolubles
- Dureza del mineral

### **3.4. Indicadores**

- Recuperación (%)
- Dosificación de reactivo (g/t)

### 3.5. Operacionalización de variables

Se observa en la Tabla 2

**Tabla 2**

*Operacionalización de variables*

| <b>Variable nominal</b>         | <b>Definición de variable</b>   | <b>Definición Operacional</b>                              | <b>Indicador</b>    | <b>Rango</b> | <b>Unidad</b> | <b>Técnica e instrumento de medición</b> |
|---------------------------------|---|--|---------------------|--------------|---------------|--|
| <b>Recuperación Metalúrgica</b> | Razón entre masa del material útil obtenido en el concentrado y la masa del material útil en la alimentación. (Azareño A. - 2015) | Evaluación del concentrado con respecto al mineral cabeza. | Porcentaje          | 85-90        | %             | Software Excel                           |
| <b>Aerophine A-3418</b>         | Colector selectivo usada en flotación para la recuperación de la parte valiosa del mineral (Cytec. - 2015)                        | Colector de gran calidad muy selectivo.                    | Gramos por tonelada | 10-20        | g/t           | Micropipeta                              |
| <b>Xantato Z-6</b>              | Colector energético usado en flotación para recuperar la parte valiosa del mineral. (Cytec - 2015)                                | Es el colector más energético de los xantatos.             | Gramos por tonelada | 45-90        | g/t           | Micropipeta                              |

Nota: Elaboración propia

### 3.6. Definición de Términos Básicos

- **AEROPHINE 3418:** Colector único basado en fosfina que se originó inicialmente para flotación de Cobre y minerales de Zinc, ahora reconocido por sus propiedades de selectividad en minerales complejos, y sulfuros masivos.

- **XANTATO AMILICO DE POTASIO (Z-6):** El xantato llega a ser el colector más usado debido a su bajo costo y elevador poder colector, posee cadena de hidrocarburos más amplio que el Z-11 y el Z-14, esto conlleva mayor fuerza de colección.

- **METIL ISOBUTIL CARBONIL (MIBC):** Es un compuesto orgánico utilizado principalmente como un vaporizador en la flotación de minerales. Es un espumante.
- **PULPA:** Mezcla de mineral y agua cuya finalidad es hacerla fluida.
- **CELDA DE FLOTACIÓN:** Equipo cuya finalidad es la de dar condiciones para la separación del mineral valioso de la pulpa por proceso fisicoquímicos, reactivos y aireación.
- **COLCHON DE ESPUMA:** Es el producto de descarga por el rebose de una celda de flotación, contienen el mineral que se desea recuperar y también minerales no deseados.

## Capítulo IV

### Metodología de Investigación

#### 4.1. **Ámbito de la Investigación**

El presente trabajo de investigación, toma como estudio el mineral procedente de la zona de Nazca, específicamente de la planta de Beneficio Jesús S.A.C. Se realizarán las pruebas metalúrgicas en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

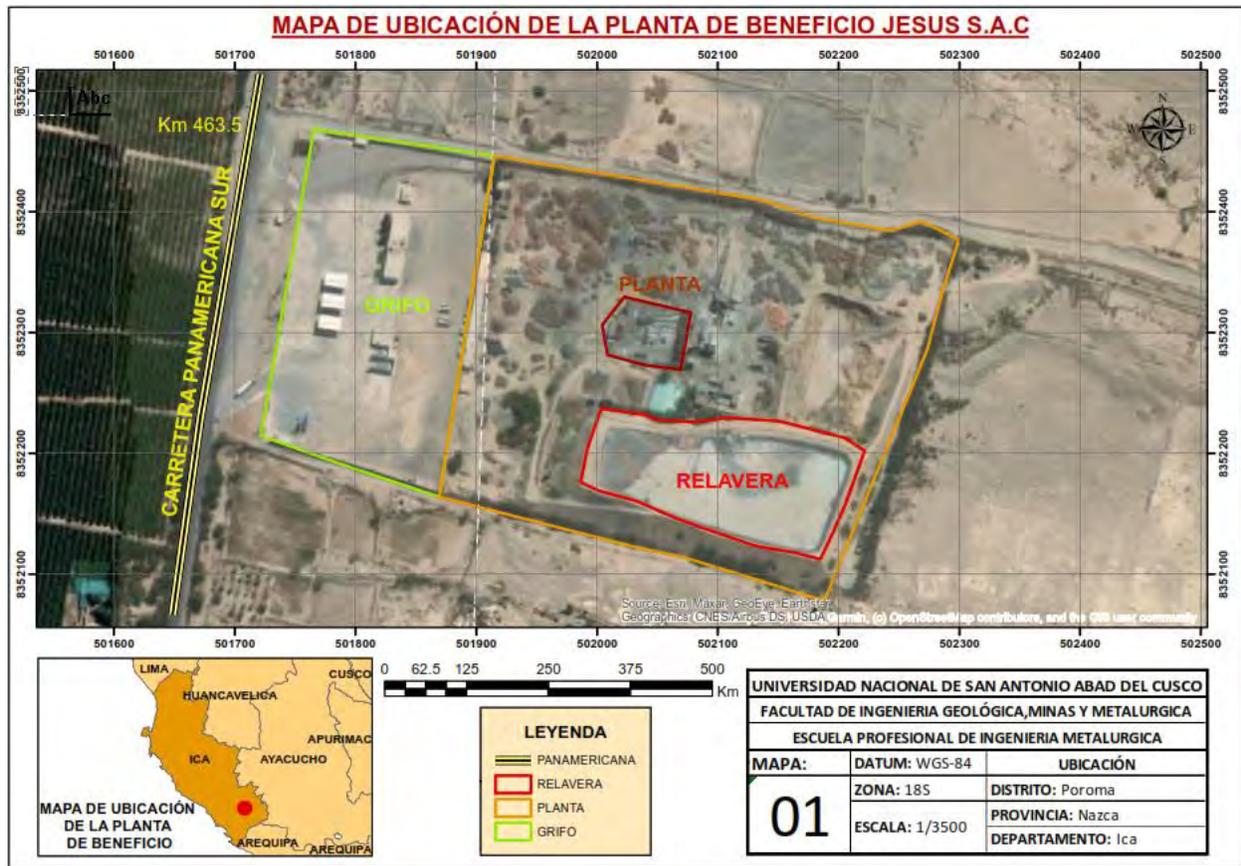
##### 4.1.1. *Información de la Empresa*

- Razón Social: PLANTA DE BENEFICIO JESÚS S.A.C.
- RUC: 20536928261
- Condición: Activa
- Actividad Comercial: Actividad de Arquitectura e Ingeniería
- Latitud y Longitud: -14.904122929804892, -74.9806976484027
- Altitud: 520 m.s.n.m.
- Ubicación: Carretera Panamericana Sur Km. 463.5 Altura del grifo Primax, Nazca, Ica, Perú.

La planta de Beneficio Jesús S.A.C. se encuentra a 15 minutos de la ciudad de Nazca, en el distrito de Poroma, la planta se encuentra a 100 metros de la carretera panamericana sur Km. 463.5, la entrada principal se encuentra en el Grifo Primax ubicado en la pista principal.

**Figura 11**

*Ubicación de la Planta de Beneficio Jesús S.A.C.*



*Nota: Recuperado de Google Maps 2021.*

#### **4.1.2. Información del Laboratorio de Procesamiento de Minerales**

Ubicado en la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, UNSAAC.

- Ubicación: Av. de la Cultura 773. Cusco, Cusco, Cusco.
- Latitud y longitud: -13.522306901690536, -71.9569079382793
- Altitud: 3400 m.s.n.m.

**Figura 12**

*Ubicación de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco*



*Nota:* Ubicación del laboratorio de Procesamiento de Minerales de la UNSAAC; Recuperado de Google Maps 2021.

#### **4.2. Metodología de la Investigación**

La investigación es aplicada de carácter tecnológica, que parte de conocimientos teóricos para transformarlos en conocimientos prácticos. Es decir, la aplicación teórica del proceso de flotación seleccionando un reactivo colector que tenga influencia en la recuperación de concentrados de cobre.

#### **4.3. Tipo y Alcance de la investigación**

El presente trabajo de investigación es de tipo cuantitativo de carácter experimental, es cuantitativo porque se realizó la manipulación de los factores más importantes de la variable

independiente seleccionados previamente y ver su respuesta en la variable dependiente, mediante la observación y análisis.

El alcance es descriptivo y explicativo por que determina las causas de las variables independientes cuyo efecto conducen a la variable dependiente la extracción de cobre en mayor cantidad

$$X \rightarrow Y$$

- X: Es la variable independiente, que es manipulada (causa).
- Y: es la variable dependiente, que es el efecto

#### ***4.3.1. Diseño experimental***

Es un proceso de prueba o investigación de ensayo(s) que busca(n) la verdad, utilizando un diseño o modelo matemático, que nos permita comprobar una hipótesis.

El diseño experimental es una estructura lógica de un experimento; para lo cual se deben especificar los siguientes aspectos:

- Identificación del tipo de unidades experimentales
- Número y tipo de tratamientos que se han de aplicar
- Variables o propiedades que se han de medir sobre las unidades experimentales
- Asignación de tratamientos a las unidades experimentales
- El número de unidades experimentales
- Arreglo espacial de las unidades experimentales
- Secuencia temporal de aplicación y medición de las unidades experimentales (Conde y Pazmiño, p.25)

Se aplicará el software MINITAB para la evaluación y determinación de las variables influyentes en el proceso de flotación en el análisis factorial 2<sup>2</sup>, tenemos que serán 4 pruebas, adicionando 2 intermedios, ya que se experimentará con el máximo y mínimo de dosificación de los reactivos a evaluar.

Las variables de estudio son la dosificación de colectores A-3418 y Z-6, se utilizará un máximo, un mínimo y un intermedio para cada variable, teniendo entonces:

- -1: Mínima dosificación
- 1: Máxima dosificación
- 0: Intermedia dosificación.

Tenemos entonces las corridas a realizar utilizando el software en aleatorio; el test 3 coincide con las dosificaciones estándar, tal cual sería en planta.

**Tabla 3**

*Corridas a Realizar*

| N° de<br>Corridas | Colector |        | Etiqueta de corrida |
|-------------------|----------|--------|---------------------|
|                   | Z-6      | A-3418 |                     |
| 1                 | -1       | -1     | Test 1              |
| 2                 | 1        | -1     | Test 2              |
| 3                 | -1       | 1      | Test 3              |
| 4                 | 1        | 1      | Test 4              |
| 5                 | 0        | 0      | Test 5              |
| 6                 | 0        | 0      | Test 6              |

Nota: Elaboración propia

#### **4.4. Población y Muestra**

##### **4.4.1. Población**

Se considera todo el mineral mixto procedente de la planta de beneficio Jesús S.A.C. y también minerales mixtos procedentes de zonas aledañas a la planta.

##### **4.4.2. Muestra**

La muestra fue recolectada de la salida del primer proceso de conminución, chancadora de quijada, de la planta concentradora y fueron preparadas mecánicamente con los instrumentos del laboratorio de procesamiento de minerales. Se extrajo 25 kilogramos de muestra para las pruebas de molienda y flotación.

#### **4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

##### **4.5.1. Técnica de recolección de datos**

Las técnicas para la elaboración del trabajo de investigación son los procedimientos, los instrumentos y equipos utilizados para acceder al conocimiento o recolección de datos mediante la observación experimental y lo que se deriva de ella.

Las técnicas utilizadas en el trabajo de investigación son:

- **Recolección y análisis documental:** se realizaron análisis de los datos proporcionados por la planta de beneficio Jesús S.A.C., como la ley de cabeza del mineral, los cálculos de la gravedad específica del mineral, el tiempo de molienda, entre otros.

- **Toma de Apuntes:** Los datos obtenidos de los diversos cálculos son analizados y estudiados en un cuaderno para cálculos manuales y tomas apuntes de las características de la prueba realizada.

- **Estadística:** Al obtener los datos de pesos en el laboratorio y de los análisis químicos, son procesados y analizados mediante el uso de la hoja de cálculo Excel para su balance metalúrgico y para la significancia de las variables se utilizó el software MINITAB.

Para las técnicas de recolección de datos, se utilizó, información primaria dada por planta de beneficio Jesús S.A.C., cuaderno de apuntes, celular como cámara fotográfica, computadora y laptop para los procesos estadísticos y la redacción de la tesis.

#### ***4.5.2. Instrumentos de recolección de datos***

Un instrumento adecuado de medición es aquel que registra datos como consecuencia de la manipulación de los factores experimentales, observándolos y luego registrándolo para su posterior procesamiento y análisis.

Los equipos, materiales e instrumentos que fueron utilizados durante el desarrollo de la tesis, son:

- a. **Equipos:** Considerados los siguientes:
  - **Balanzas electrónicas.** Se utilizaron dos balanzas electrónicas, ambas con un dígito después del punto, fueron dos para corroborar el auténtico peso de los concentrados, para determinar la gravedad específica del mineral, entre otros.
  - **Celda de flotación.** Específicamente de la marca Denver donado por la empresa minera Tintaya, su uso se dio especialmente para la flotación por espumas, se utilizó la celda para 1Kg de Mineral.
  - **Chancadora cónica de laboratorio.** Ubicada en el laboratorio de procesamiento de minerales, en esta chancadora fue donde se minimizó el tamaño de toda la muestra, con resultados 95% -10 malla.

- **Cuarveedor de Jones.** Separa las muestras en dos partes iguales, debido a sus pequeñas divisiones.

- **Horno de secado de muestras.** Se utilizó el horno de la escuela profesional de Ingeniería Geológica, graduado a 110°C durante el periodo de tiempo necesario para que la muestra quede totalmente seca.

- **Mallas Tyler.** Usados para el análisis granulométrico del material, pasando de la malla 10 hasta la numero 200.

- **Molino de bolas de laboratorio.** Es hechiza, conteniendo en total 55 bolas de acero, las dimensiones del molino son de 10 pulgadas por 14 pulgadas.

- **pHmetro.** De la marca Toledo, calibrado previamente para su uso, mide el pH desde 1 hasta 14, se utilizó constantemente en las pruebas de flotación.

- **Pulverizadora.** Usada para moler la muestra que fue analizada químicamente, su tamaño producto se encuentra en -200 Malla, menor a 75 micrones.

- **Rotap.** Equipo utilizado para la separación de tamaños por las mallas Tyler, con capacidad de 8 mallas, tiempo de ejecución fue de 10 minutos por prueba.

**b. Materiales:** Reactivos de flotación:

- **A-208.** De la familia de los Ditiofosfatos, el promotor AEROFLOAT 208, es un colector selectivo para minerales de cobre. Excelente colector para plata, cobre y oro nativo.

(Cytec, 2015, p. 122)

- **A-3418.** El promotor AEROPHINE 3418A es un exclusivo colector de sulfuro en base fósforo, Se desarrolló originalmente para flotación de cobre y minerales activados de Zinc, pertenece a la familia de los Ditiofosfinatos, se ha descubierto que es un colector envaluable en el beneficio de complejos, polimetálicos y masivos minerales de sulfuro, en estos minerales

otorga separaciones muy selectivas, tiene como características principales el tener rápida cinética, buena recolección de partículas gruesas, baja contribución a la espumación, incluso en minerales que contienen minerales de arcilla. (Cytec, 2015, p. 124)

- **A-404.** De la familia de los mercaptobenzotiazol, debido a que lleva un benceno en su estructura, el promotor AERO 404, es ampliamente usada para flotación de minerales de cobre alterados y secundarios, minerales de Zinc y Plomo alterados y metales preciosos en circuitos ácidos y neutros. (Cytec, 2015, p. 125)

- **Lechada de Cal.** Esencial modificador de pH, preparado al 10% de concentración, esta puede ser preparada a partir de cal fina o gruesa, es conocido como el reactivo modificador de pH más usado en las plantas. Ya que el pH óptimo para la flotación de sulfuros de Cobre es de 12 y es necesario el uso de este reactivo para llegar a tal punto.

- **MIBC.** Llamado en inglés Metyl Isobutyl Carbonil, es el espumante más conocido de tipo alcohol, usado en flotación por espumas, su uso implica que es poco soluble en agua lo que ayuda a la formación de burbujas consistentes al cambio de factores como el pH, densidad de pulpa entre otros, también utilizado en la industria de pintura. Recuperado de: [https://chile.pochteca.net/wp-content/uploads/2021/06/HT\\_MIBC.pdf](https://chile.pochteca.net/wp-content/uploads/2021/06/HT_MIBC.pdf) .

- **Sulfuro de Sodio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ).** Usado para la sulfurización de los minerales totalmente o parcialmente oxidados de cobre, plomo, zinc; hay que tener cuidado ya que al alimentarlo en exceso al circuito se consigue el efecto contrario, es decir deprime los sulfuros. (Azañero, 2015, p. 94).

- **Z-6,** su nombre es xantato amílico de potasio, es el colector más potente y no selectivo para minerales sulfurados, es el más conveniente para la recuperación de minerales oxidados de plomo y cobre después de la sulfurización, en algunos casos es utilizado como

colector secundario en flotación scavenger después de la flotación rougher. (Azañero;2015, p. 74).

**c. Herramientas:**

- **Bandejas metálicas.** Para depositar las espumas de la flotación, concentrarlas y pasarlas al horno de secado.

- **Bureta.** Usado para preparar reactivos como el xantato y el sulfuro de sodio.

- **Espátula metálica.** Tiene diversos, en este caso como para preparar las muestras, limpiar restos de muestras pegados a las bandejas metálicas.

- **Fiola de 100ml y 200ml.** Usados para determinar la gravedad específica del mineral.

- **Micropipeta.** Para la dosificación exacta de los reactivos en vez de utilizar jeringas, la micropipeta dosifica en microlitros con exactitud.

- **Mortero.** Utilizado para triturar y moler los concentrados y relaves procedentes del horno de secado, para luego ser empaquetados para su análisis químico.

- **Paleta de espumas.** Para la separación del colchón de espuma y depositarlo en la bandeja metálica.

- **Vasos de precipitados.** Como medio de depósito de los reactivos Z-6 y sulfuro de sodio preparados al 10% de concentración.

#### **4.6. Método de investigación**

En el presente trabajo de investigación, los datos fueron cuantitativos, por ser experimental usando factores, variables o indicadores experimentales, las técnicas son:

- **Muestreo.** El muestreo se realizó de la salida de la chancadora de quijada de la guardia A, al momento que se concentraba mineral mixto de la zona Santa Lucia.

- **Preparación.** En esta etapa se preparó el mineral con la chancadora cónica, el molino de bolas de laboratorio y la pulpa de flotación llegue a 55% -200 Malla; en las celdas de flotación para 1 kilo de mineral, los concentrados y relaves fueron secados, molidos y preparados para su análisis.

- **Análisis Químico.** Los datos experimentales de la investigación fueron obtenidos mediante análisis químico, utilizando los métodos de adsorción química y método volumétrica. Este trabajo fue confiado al laboratorio químico INSUMOS Y REACTIVOS QUIMICOS DEL PERU S.A.C., laboratorio de confianza de la planta de beneficio Jesús S.A.C.

- **Experimental.** Se realizó corridas de flotación en el laboratorio de procesamiento de minerales de la UNSAAC.

- **Observación científica.** Mediante esta técnica se tomaron apuntes de los datos con respecto al color del colchón de espuma en cada prueba, para determinar si hay presencia de sílice en el concentrado.

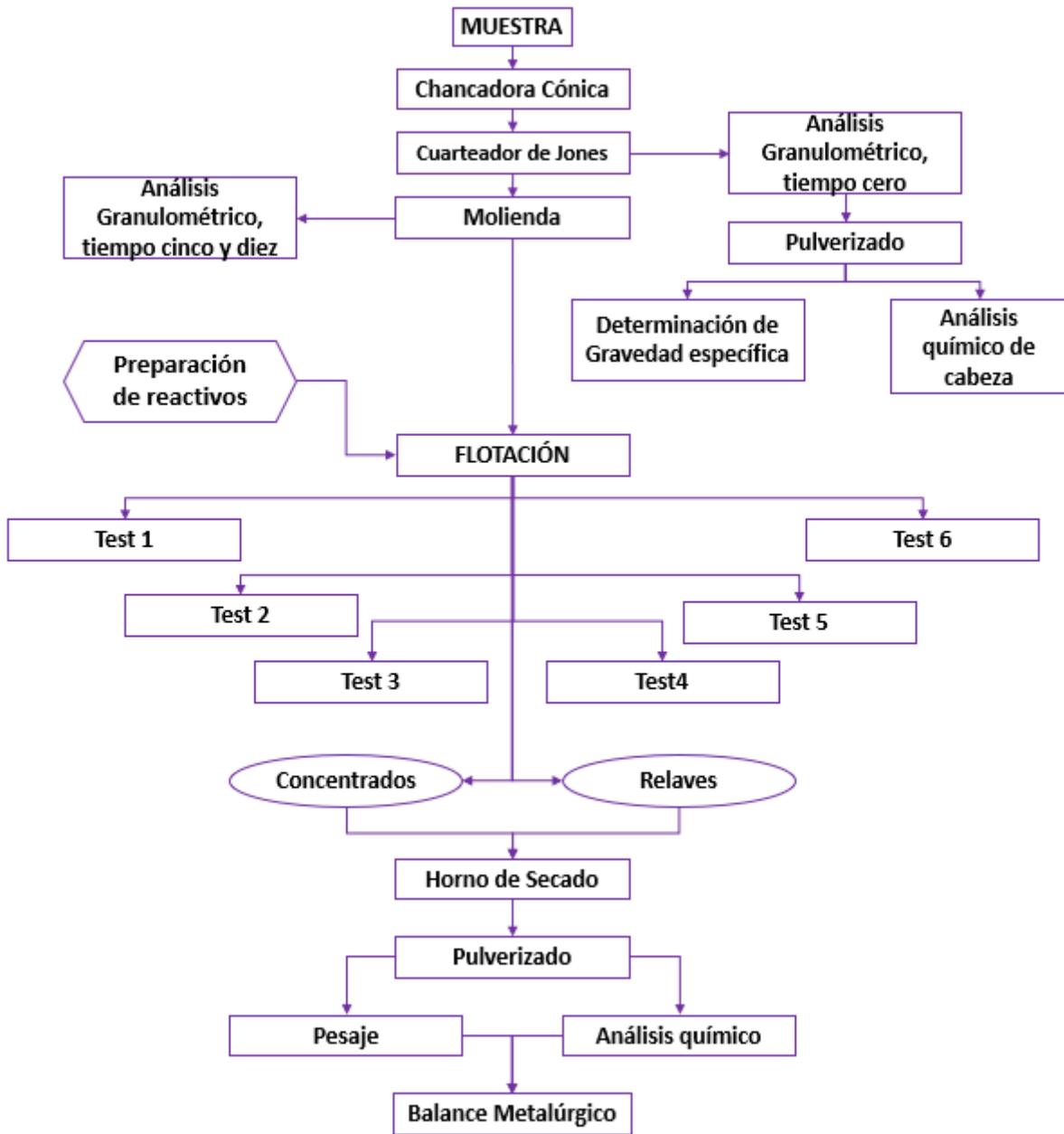
#### ***4.6.1. Técnica de investigación***

- La muestra procedente de la salida de la chancadora de quijada de la planta de beneficio Jesús S.A.C., pasa al proceso de conminución en laboratorio, en la chancadora cónica, esta muestra se cuarta en el equipo de Jones y se selecciona muestras suficientes de un kilogramo para pruebas de molienda, análisis granulométrico, pulverizado para determinar la gravedad específica y análisis químico de cabeza.
- Pruebas de molienda, para determinar el tiempo necesario en que el mineral se encuentre a 55% -200 malla

- Preparación de reactivos, se realizan operaciones matemáticas para transformar las magnitudes de la dosificación de planta a nivel de laboratorio, se alistan los reactivos de flotación y se preparan a su determinada concentración.
- Preparación de pulpa y acondicionamiento de flotación, salida la pulpa del molino, se acondiciona para flotar, lo que requiere agregar agua, subir el pH y dosificar reactivos de acondicionamiento en la celda de flotación.
- Flotación, inicia al agregar aire a la celda mientras se encuentra en agitación, la cama de espuma producida por la acción operativa del flotador debe alcanzar entre 1.5 y 3 cm de altura, los concentrados son retirados en bandejas, esto para las 6 pruebas a realizar.
- Secado de concentrados y relaves, obtenidos los productos de la flotación, se llevan a secar, triturar para posteriormente ser pesados y mandados a laboratorio de análisis químico para determinar la cantidad de cobre en cada muestra.
- Balance metalúrgico, se realiza con las leyes obtenidas del análisis químico y con el peso de las muestras, se llega a obtener el porcentaje de recuperación como producto final del balance.

**Figura 13**

*Diagrama de Elaboración del Proceso de Flotación*



*Nota:* Procedimientos seguidos por los tesistas.

## Capítulo V

### Desarrollo Experimental

La evaluación de reactivos colectores, requiere de un trabajo experimental, para poder ver en cuanto y como influyen los colectores evaluados en el proceso. Por consiguiente, se solicitó muestra de mineral mixto de cobre de la salida de la chancadora de quijada de la planta de beneficio Jesús S.A.C. La muestra fue procesada en el laboratorio de procesamiento de minerales ubicada en la facultad de Ingeniería Metalúrgica, en la UNSAAC.

El objetivo del presente trabajo de investigación, es evaluar colectores, entre ellos el Aerophine A-3418 y el Xantato Z-6, manipulando su dosificación, para aumentar la recuperación de cobre en el proceso de flotación.

#### 5.1. Muestra del mineral

Se realizó el muestreo del mineral a la salida de la chancadora de quijada de la planta de beneficio Jesús S.A.C., tomando 25 Kilogramos de muestra, al momento de tratar mineral mixto de cobre procedente del reservorio de Santa Lucía. Se realizaron análisis de cabeza del mineral, análisis granulométrico, análisis químico de los concentrados y relaves.

Las características de flotación en planta tienen que ser llevadas a nivel de laboratorio y deben tener la misma magnitud, tenemos datos de planta en los Anexos 2 y 3:

- Densidad de rougher: 1.33 Kg/L
- Densidad overflow: 1.50 Kg/L
- Densidad scavenger: 1.22 Kg/L
- Gravedad Específica del mineral: 3.8 – 4.0 g/cc
- Ley de cabeza CuT: 1.98 – 2.09 (%)

- P80: 120 um
- pH rougher: 12
- pH scavenger: 9
- Tamaño partícula overflow: 55% -200 Malla

El objetivo de nuestra investigación es evaluar Los colectores: Xantato Amílico de Potasio (Z-6), y Aerophine 3418 (A-3418), tratando de reemplazar este último o disminuir su dosificación para generar mayor recuperación de cobre total.

Los resultados obtenidos por el proceso de flotación, concentrado y relave, se secaron, pesaron y pulverizado para su análisis químico y finalmente realizar el balance metalúrgico.

### 5.1.1 Balance de planta con respecto al cobre

La planta de beneficio Jesús S.A.C. trata 300T al día, tiene un ratio de 13.1 y su análisis químico para observar su distribución de recuperación de cobre en sulfuros y cobre en óxidos es:

**Tabla 4**

Leyes de cobre en planta

| <b>Muestras</b>              | <b>CuT (%)</b> |
|------------------------------|----------------|
| <b>Cabeza</b>                | 2.03           |
| <b>Concentrado rougher</b>   | 29.18          |
| <b>Concentrado scavenger</b> | 15.68          |
| <b>Concentrado final</b>     | 23.64          |
| <b>Relave final</b>          | 0.24           |
| <b>Relave rougher</b>        | 5.62           |

Nota: información brindada por la planta de beneficio Jesús S.A.C. en el Anexo 3

De acuerdo al tonelaje y al análisis químico se logra realizar el balance de planta, con ayuda de Excel tenemos:

**Tabla 5**

Balance de planta

| <b>Resultados Metalúrgicos</b> |             |               |                          |             |             |                       |               |               |  |
|--------------------------------|-------------|---------------|--------------------------|-------------|-------------|-----------------------|---------------|---------------|--|
| <b>Producto</b>                | <b>Peso</b> |               | <b>Ensayos %, *Oz/T</b>  |             |             | <b>Recuperación %</b> |               |               |  |
|                                | <b>T</b>    | <b>%</b>      | <b>Ag</b>                | <b>Cu</b>   | <b>Au</b>   | <b>Ag</b>             | <b>Cu</b>     | <b>Au</b>     |  |
| <b>1 Conc Rougher</b>          | 13.40       | 4.47          | 14.12                    | 29.18       | 2.12        | 35.77                 | <b>64.31</b>  | 56.87         |  |
| <b>2 Conc Scavenger</b>        | 9.60        | 3.20          | 11.15                    | 15.68       | 1.09        | 20.24                 | <b>24.76</b>  | 20.95         |  |
| <b>Relave Final</b>            | 277.00      | 92.33         | 0.84                     | 0.24        | 0.04        | 43.99                 | 10.93         | 22.18         |  |
| <b>Cabeza</b>                  | <b>300</b>  | <b>100.00</b> | <b>1.76</b>              | <b>2.03</b> | <b>0.17</b> | <b>100.00</b>         | <b>100.00</b> | <b>100.00</b> |  |
| <b>Productos Combinados</b>    |             |               |                          |             |             |                       |               |               |  |
| <b>Producto</b>                | <b>Peso</b> |               | <b>Ensayos %, *Oz/Tc</b> |             |             | <b>Distribución %</b> |               |               |  |
|                                | <b>T</b>    | <b>%</b>      | <b>Ag</b>                | <b>Cu</b>   | <b>Au</b>   | <b>Ag</b>             | <b>Cu</b>     | <b>Au</b>     |  |
| <b>Concentrado Final</b>       | 23.0        | 7.67          | 12.88                    | 23.55       | 1.69        | 56.01                 | <b>89.07</b>  | 77.82         |  |
| <b>3 Relave Rougher</b>        | 286.6       | 95.53         | 5.48                     | 5.62        | 0.50        | 89.25                 | 80.47         | 83.46         |  |

Nota: Elaboración Propia

Entonces de acuerdo a la tabla 5, se observa que el 64.31% de cobre se recupera procedente de los minerales sulfurados y 24.76% de cobre de minerales de naturaleza oxidada, por lo tanto, la planta de beneficio Jesús S.A.C. presenta una recuperación de **89.07 %** de cobre total.

## **5.2. Presentación, análisis e interpretación de las características del mineral.**

### **5.2.1 Presentación de las características del mineral para flotación.**

#### **a. Análisis químico**

Los análisis químicos se realizaron de la muestra extraída de planta de beneficio Jesús S.A.C. al tratar mineral mixto de cobre procedente del reservorio Santa Lucia, al ser mineral mixto de cobre, el análisis químico a pedir realizar es de Cobre Total (CuT).

**Tabla 6**

*Resultado de Análisis de Cobre Total de Cabeza*

| <b>Muestra</b> | <b>% de CuT</b> |
|----------------|-----------------|
| <b>Cabeza</b>  | 2.03            |

*Nota:* Elaborado por los tesisistas; Laboratorio químico – Insumos y reactivos químicos del Peru S.A.C.

**b. Especies mineralógicas presentes**

La planta de beneficio Jesús S.A.C. realizó un muestreo general del reservorio de Santa Lucia, para realizar su análisis mineralógico de microscopía óptica y barrido electrónico y así determinar si efectivamente se presenta minerales sulfurados de cobre y oxidados de cobre, los minerales presentes se encuentran en la página 1 del Anexo 2.

Los minerales de cobre presentes según la información de planta son los siguientes:

**i. Sulfuros de Cobre:**

- Bornita
- Calcopirita
- Calcosita
- Covelita.

**ii. Óxidos de cobre:**

- Crisocola
- Malaquita
- Cuprita

Entonces los minerales anteriormente mencionados se presentan en la muestra del trabajo de investigación.

**c. Cálculo de gravedad específica del mineral.**

La gravedad específica informada por planta se encuentra entre 3.8g/cc y 4.0g/cc; se homogeneizó y cuarteó bien la muestra y se extrajo cierta cantidad para pruebas de G.E., se realizó prueba en fiolas de 100ml y 200ml, prueba por triplicado, teniendo los siguientes resultados:

**Tabla 7**

*Gravedad Específica del Mineral*

| <b>G.E. (g/cc)</b> |      |
|--------------------|------|
| <b>Test 1</b>      | 3.87 |
| <b>Test 2</b>      | 3.84 |
| <b>Test 3</b>      | 3.85 |

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

Teniendo como gravedad específica los valores de los tres Test, hallamos el promedio, tenemos:

$$\frac{(3.87 + 3.84 + 3.85)}{3} = 3.85\hat{3} \cong 3.85$$

Entonces la gravedad específica del mineral de muestra es de 3.85 g/cc.

Es importante determinar la G.E. del mineral para determinar la correcta dosificación de reactivos.

**d. Análisis granulométrico**

Según lo informado por la planta, la granulometría del mineral a la salida del overflow de los hidrociclones, antes de ingresar al proceso de flotación, se encuentran en 55% -200 Malla (75  $\mu$ m), esto quiere decir que el 55% de peso pasa la abertura de la malla Tyler #200.

La muestra de mineral molido por la chancadora cónica presenta el siguiente análisis granulométrico.

**Tabla 8**

*Análisis Granulométrico Tiempo Cero*

| <b>Tiempo: Cero minutos</b> |                                   |                 |                 |                  |                   |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| <b>Malla</b>                | <b>Abertura</b>                   | <b>Peso</b>     | <b>Peso</b>     | <b>Retenido</b>  | <b>Porcentaje</b> |
|                             | <b>Malla</b>                      | <b>Retenido</b> | <b>Retenido</b> | <b>Acumulado</b> | <b>pasante</b>    |
|                             | <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>(g)</b>      | <b>(%)</b>      | <b>(%)</b>       | <b>(%)</b>        |
| <b>8</b>                    | 2380                              | 193.70          | 19.37           | 19.37            | 80.63             |
| <b>10</b>                   | 1700                              | 176.30          | 17.63           | 37.00            | 63.00             |
| <b>14</b>                   | 1180                              | 118.00          | 11.80           | 48.80            | 51.20             |
| <b>28</b>                   | 600                               | 134.50          | 13.45           | 62.25            | 37.75             |
| <b>65</b>                   | 212                               | 119.50          | 11.95           | 74.20            | 25.80             |
| <b>100</b>                  | 150                               | 37.70           | 3.77            | 77.97            | 22.03             |
| <b>200</b>                  | 75                                | 103.20          | 10.32           | 88.29            | 11.71             |
| <b>-200</b>                 | -75                               | 117.10          | <b>11.71</b>    | 100.00           | 0.00              |

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

Consideraremos la tabla 8 como tiempo de molienda 0 (molienda Cero) ya que no hace uso de la molienda, los datos obtenidos en el cuadro consideran que solo el 11.71 % pasa la malla 200.

**e. Prueba de Moliendabilidad**

Se tomaron 2 kilogramos de la muestra procedente de la chancadora cónica, se utilizó un kilogramo para cada prueba de molienda, a tiempos de 5 minutos y 10 minutos respectivamente haciendo uso del molino de bolas del laboratorio, teniendo como resultado las tablas 9 y 10 como sus análisis granulométricos correspondientes.

**Tabla 9***Molienda 5 Minutos*

| <b>Tiempo: Cinco Minutos</b> |                                   |                 |                 |                  |                   |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| <b>Malla</b>                 | <b>Abertura</b>                   | <b>Peso</b>     | <b>Peso</b>     | <b>Retenido</b>  | <b>Porcentaje</b> |
|                              | <b>Malla</b>                      | <b>Retenido</b> | <b>Retenido</b> | <b>Acumulado</b> | <b>pasante</b>    |
|                              | <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>(g)</b>      | <b>(%)</b>      | <b>(%)</b>       | <b>(%)</b>        |
| <b>10</b>                    | 1700                              | 15.2            | 1.52            | 1.52             | 98.48             |
| <b>14</b>                    | 1180                              | 5.6             | 0.56            | 2.08             | 97.92             |
| <b>28</b>                    | 600                               | 12.3            | 1.23            | 3.31             | 96.69             |
| <b>65</b>                    | 212                               | 167.5           | 16.75           | 20.06            | 79.94             |
| <b>100</b>                   | 150                               | 135.5           | 13.55           | 33.61            | 66.39             |
| <b>150</b>                   | 106                               | 153.5           | 15.35           | 48.96            | 51.04             |
| <b>200</b>                   | 75                                | 171.7           | 17.17           | 66.13            | 33.87             |
| <b>-200</b>                  | -75                               | 338.7           | <b>33.87</b>    | 100              | 0                 |

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

**Tabla 10***Molienda 10 Minutos*

| <b>Tiempo: Diez Minutos</b> |                                   |                 |                 |                  |                   |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| <b>Malla</b>                | <b>Abertura</b>                   | <b>Peso</b>     | <b>Peso</b>     | <b>Retenido</b>  | <b>Porcentaje</b> |
|                             | <b>Malla</b>                      | <b>Retenido</b> | <b>Retenido</b> | <b>Acumulado</b> | <b>pasante</b>    |
|                             | <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>(g)</b>      | <b>(%)</b>      | <b>(%)</b>       | <b>(%)</b>        |
| <b>10</b>                   | 1700                              | 1.7             | 0.17            | 0.17             | 99.83             |
| <b>14</b>                   | 1180                              | 1.2             | 0.12            | 0.29             | 99.71             |
| <b>28</b>                   | 600                               | 1.4             | 0.14            | 0.43             | 99.57             |
| <b>65</b>                   | 212                               | 34.4            | 3.44            | 3.87             | 96.13             |
| <b>100</b>                  | 150                               | 75.2            | 7.52            | 11.39            | 88.61             |
| <b>150</b>                  | 106                               | 140.8           | 14.08           | 25.47            | 74.53             |
| <b>200</b>                  | 75                                | 149             | 14.9            | 40.37            | 59.63             |
| <b>-200</b>                 | -75                               | 596.3           | <b>59.63</b>    | 100              | 0                 |

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

Teniendo los porcentajes de -200 Malla de los 10 minutos, se podrá determinar el tiempo adecuado de molienda, tenemos:

**Tabla 11**

*Tiempo de Molienda de los Tres Test*

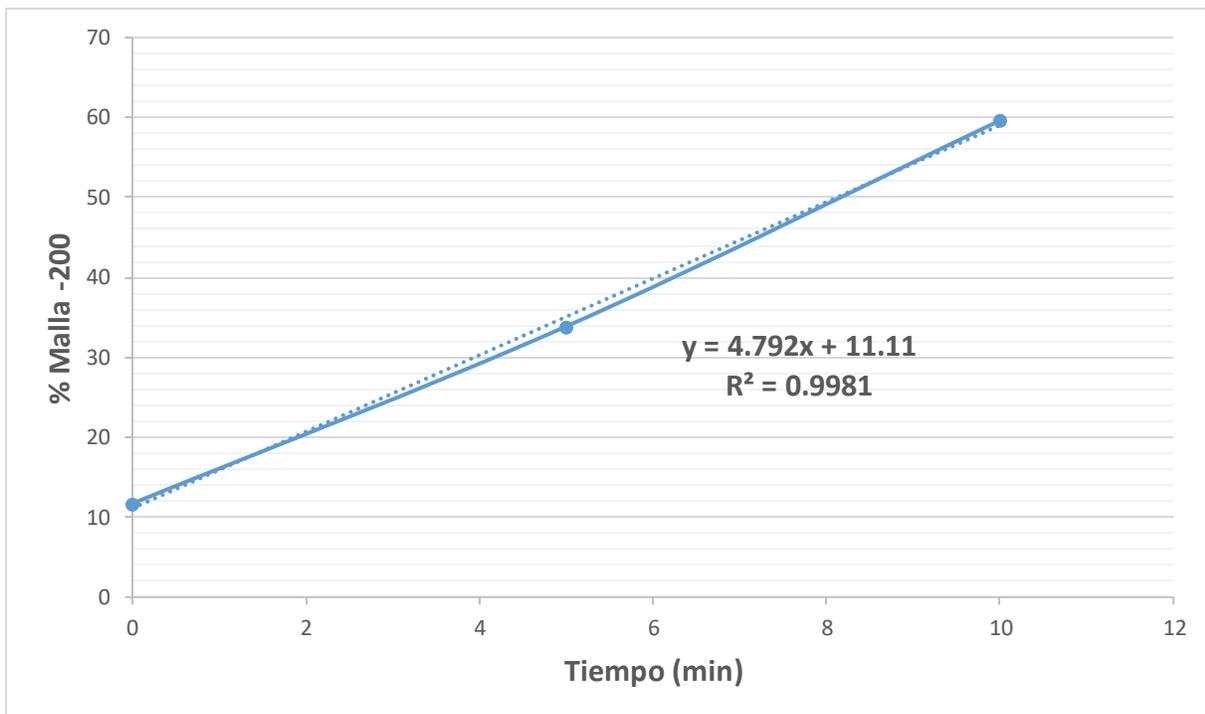
| Tiempo (min) (x) | 0     | 5     | 10    |
|------------------|-------|-------|-------|
| % Malla -200 (y) | 11.71 | 33.87 | 59.63 |

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

Utilizando Microsoft Excel, introducimos los datos anteriores y graficamos los datos, teniendo una línea de tendencia, se inserta la ecuación de la recta y el factor de correlación, teniendo:

**Figura 13**

*Tiempo de Molienda*



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

De la ecuación obtenida por el gráfico, despejando “x” y reemplazando “y” por 55, de esta manera podremos obtener el tiempo de molienda necesario para que la muestra quede a 55% malla -200.

$$y = 4.792x + 11.11$$

Despejando

$$x = \frac{y - 11.11}{4.792}$$

Reemplazando “y” por 55

$$x = \frac{(55) - 11.11}{4.792} = \frac{43.89}{4.792} = 9.159$$

El tiempo necesario de molienda para llegar a una granulometría de 55% -200 Malla en el molino de laboratorio de procesamiento de minerales es de 9 minutos con 10 segundos.

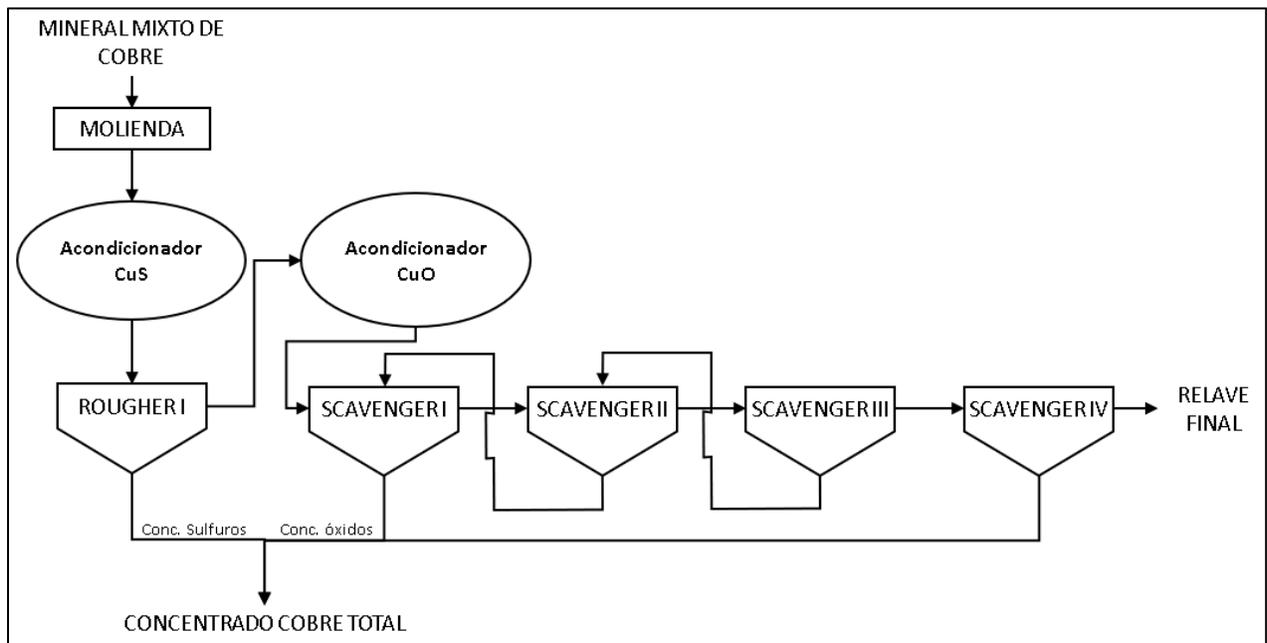
### ***5.2.2 Elaboración de Flowsheet para el proceso de flotación a nivel de laboratorio***

El flowsheet de flotación es importante para poder observar las etapas de flotación en el que el mineral se procesa y más aún cuando se desea realizar pruebas experimentales a nivel de laboratorio, la planta de beneficio Jesús S.A.C. maneja un circuito abierto, con una etapa rougher y 4 scavengers, en la figura 14 se puede observar el flowsheet manejado por planta. Según el manual de Cytec (2015), las etapas en el proceso de flotación se agrupan según si tipo siempre y cuando los relaves o concentrados de estos no retornen a alguna etapa diferente, lo que comprometería un circuito cerrado. En este caso la figura 14 presenta retornos de relave del scavenger II a I y del scavenger III al II, pero en ninguna de las etapas retorna a una etapa diferente, realizando un análisis visual, se concluye que, al solo haber un rougher se considera el

mismo rougher; los cuatro scavengers posteriores se agrupan en uno solo, los concentrados procedentes de rougher, scavenger I y scavenger IV se juntan en un solo concentrado que denominaremos concentrado mixto o concentrado final, el relave de rougher ingresa como alimento para el scavenger agrupado y finalmente el relave del scavenger agrupado nombraremos como relave final, teniendo como resultado de la elaboración el diagrama de flujo a nivel de laboratorio en la figura 15.

**Figura 14**

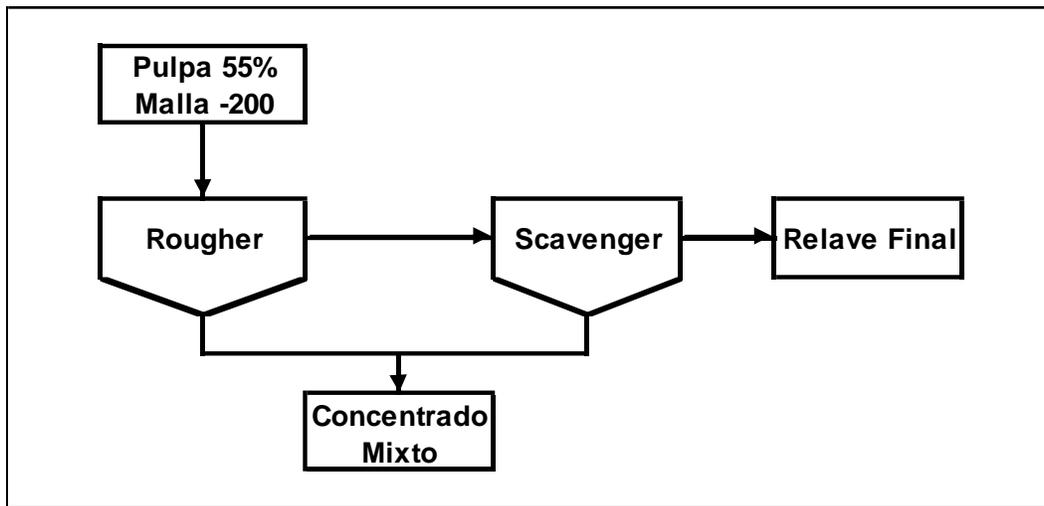
*Diagrama de Flujo de Flotación, Planta de Beneficio Jesús S.A.C.*



*Nota:* Modificado del anexo 2.

**Figura 15**

*Diagrama de Flujo de Flotación – Laboratorio*



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

### **5.2.3 Preparación de pulpas para flotación.**

La mezcla procedente del molino de bolas con el tiempo recomendado, sale con una densidad de 1590 g/L, se deposita la pulpa en una celda de flotación de 2 litros y se agrega 800 mililitros de agua, obteniendo una pulpa con 1326 g/L de densidad, esta densidad es muy cercana a la trabajada en la planta en la etapa rougher, ya que es de 1330 g/L. Esta pulpa en la celda se utilizará para la etapa rougher a nivel de laboratorio.

Una vez separado el concentrado de rougher, se procede a aumentar la cantidad de agua en la celda con el relave el cual llamaremos celda scavenger, se aumenta la cantidad necesaria para bajar el pH, que inicialmente se encontraba en pH 12 con ayuda de cal, hasta llegar a pH 9. Se agrega 400 mililitros de agua y de esta manera la densidad calculada es de 1220 g/L aproximadamente.

Las densidades, porcentajes de sólidos y diluciones de las pulpas se agrupan en la tabla 12, que indica las condiciones en la que la planta maneja la pulpa de mineral mixto de cobre y como se manejará a nivel de laboratorio.

**Tabla 12**

***Preparación de pulpas, planta y laboratorio***

|                  |                         | <b>Planta</b> | <b>1Kg Laboratorio</b> |
|------------------|-------------------------|---------------|------------------------|
| <b>ROUGHER</b>   | <b>Densidad (g/L)</b>   | 1330          | 1326                   |
|                  | <b>Dilución (PI/Ps)</b> | 2             | 2.01                   |
|                  | <b>% Sólidos</b>        | 33.37         | 33.21                  |
| <b>SCAVENGER</b> | <b>Densidad (g/L)</b>   | 1220          | 1220                   |
|                  | <b>Dilución (PI/Ps)</b> | 2.96          | 3.05                   |
|                  | <b>% Sólidos</b>        | 25.25         | 25.05                  |

Nota: Elaboración propia.

***5.2.4 Dosificación de reactivos de forma industrial a nivel de laboratorio***

La dosificación de reactivos a nivel de planta se da en mililitros por minuto, como se muestra en la Tabla 13, esta información fue brindada por planta en el Anexo 2.

Según Sergio Castro en el libro Flotación fundamentos y aplicaciones, el tiempo de flotación de laboratorio se debe multiplicar por un factor (1.6 – 1.8 ó 2) para obtener el tiempo de residencia a escala industrial. Si el circuito rougher, tiene en el laboratorio un tiempo de 2 minutos, el tiempo de residencia en planta debe ser de 4 minutos (2 x 2'). Entonces de acuerdo al escalamiento sugerido por el mencionado anteriormente, el tiempo en laboratorio será la mitad del tiempo de flotación en planta, en las etapas rougher y scavenger.

**Tabla 13***Dosificación de Reactivos a Nivel de Planta – Estándar*

| Etapas                    | Condiciones                |              |       |       |        |      | Tiempo, min |       | pH |
|---------------------------|----------------------------|--------------|-------|-------|--------|------|-------------|-------|----|
|                           | Reactivos Añadidos, ml/min |              |       |       |        |      | Acond.      | Flot. |    |
|                           | Na <sub>2</sub> S<br>(10%) | Z-6<br>(10%) | A-208 | A-404 | A-3418 | MIBC |             |       |    |
| <b>Acondicionador CuS</b> | 300                        | 60           | 4     | 4     | 2      | 4    | 4           |       | 12 |
| <b>Rougher</b>            |                            | 40           | 2     | 4     | 2      | 8    | 1           | 6     |    |
| <b>Acondicionador CuO</b> | 800                        |              |       |       |        |      | 5           |       |    |
| <b>Scavenger I</b>        | 200                        | 20           | 2     | 2     |        | 4    | 0.5         | 1     |    |
| <b>Scavenger II</b>       |                            | 20           | 2     |       |        |      | 0.5         | 1     | 9  |
| <b>Scavenger III</b>      |                            | 10           | 2     |       |        | 2    | 0.5         | 1     |    |
| <b>Scavenger IV</b>       |                            | 10           | 2     |       |        |      | 0.5         | 1     |    |

*Nota:* Elaboración propia – Laboratorio de procesamiento de minerales, el tiempo de acondicionamiento de cada etapa scavenger es de 30 segundos, considerado 0.5 minutos

De acuerdo al flowsheet a nivel de laboratorio, se deben agrupar las dosificaciones, teniendo:

**Tabla 14***Dosificación Agrupada de Reactivos a Nivel de Planta*

| Etapas           | Reactivos Añadidos, ml/min |           |       |       |        |      | Tiempo, min |       | pH |
|------------------|----------------------------|-----------|-------|-------|--------|------|-------------|-------|----|
|                  | Na <sub>2</sub> S<br>(10%) | Z-6 (10%) | A-208 | A-404 | A-3418 | MIBC | Acond.      | Flot. |    |
| <b>Rougher</b>   | 300                        | 100       | 6     | 8     | 4      | 12   | 4           | 3     | 12 |
| <b>Scavenger</b> | 1000                       | 60        | 8     | 2     |        | 6    | 5           | 2     | 9  |

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

Al ser dos etapas, se considera el mayor tiempo de acondicionamiento y flotación.

Entonces a nivel de laboratorio, debemos transformar la dosificación de mililitros por minuto a gramos por tonelada, teniendo como dato que la planta de beneficio Jesús S.A.C. trata 300 toneladas por día y la tabla 13. A continuación, se presenta las transformaciones de cada reactivo para la flotación estándar que maneja la empresa.

Ya que se trata 300 toneladas por día, transformaremos a cuantos kilogramos por minuto fluye en el circuito de flotación.

Tenemos:

$$\frac{300 \text{ Tn}}{1 \text{ día}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \times \frac{\text{h}}{60 \text{ min}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{Tn}} = 208.3 \text{ Kg/min}$$

Entonces decimos que fluye 208.3 Kg de mineral por minuto en el circuito de flotación, calculamos la dosificación de reactivos adecuado en gramos por tonelada de mineral.

Tenemos los reactivos a calcular:

**a) Na<sub>2</sub>S concentrado al 10% de concentración:**

La dosificación en planta es de: rougher 30 ml/min y en scavenger 100 ml/min, a partir de aquí empezaremos la transformación de dosificación.

Datos:

- Densidad Sulfuro de Sodio: 1.86g/cc
- Concentración de Preparación: 10%
- Flujo de mineral: 208.3 Kg/min

$$\text{Rougher} \rightarrow \frac{30 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{10 \text{ g reac}}{100 \text{ ml}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{10^3 \text{ Kg}}{\text{TN}} = 144 \text{ g reac/TN}$$

$$Scavenger \rightarrow \frac{1000 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{10 \text{ g reac}}{100 \text{ ml}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{10^3 \text{ Kg}}{\text{TN}} = 480 \text{ g reac}/\text{TN}$$

Transformando la dosificación obtenida a una dosificación de solución concentrada al 10% en mililitros por kilogramo de mineral, tenemos:

$$Rougher \rightarrow 144 \frac{\text{g reac}}{\text{TN}} \times \frac{100 \text{ ml}}{10 \text{ g reac}} \times \frac{\text{TN}}{1000 \text{ Kg}} = 1.44 \text{ ml}/\text{Kg}$$

$$Scavenger \rightarrow 480 \frac{\text{g reac}}{\text{TN}} \times \frac{100 \text{ ml}}{10 \text{ g reac}} \times \frac{\text{TN}}{1000 \text{ Kg}} = 4.80 \text{ ml}/\text{Kg}$$

**b) Z-6 (Xantato Amílico de Potasio), en planta se prepara al 10% de concentración**

La dosificación en planta en la etapa rougher es de 100 ml/min y en scavenger es de 60 ml/min, en laboratorio trabajaremos con una concentración de 10%, igual al que se trabaja en planta, tenemos:

Datos:

- Concentración de preparación: 10%
- Dosificación Rougher: 100ml/min
- Dosificación Scavenger: 60ml/min
- Flujo de mineral: 208.3 Kg/min

$$Rougher \rightarrow \frac{100 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{10 \text{ g reac}}{100 \text{ ml}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{10^3 \text{ Kg}}{\text{TN}} = 48.0 \text{ g reac}/\text{TN}$$

$$Scavenger \rightarrow \frac{60 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{10 \text{ g reac}}{100 \text{ ml}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{10^3 \text{ Kg}}{\text{TN}} = 28.8 \text{ g reac}/\text{TN}$$

Debido a que la dosificación es en líquido, debemos llevar la dosificación a mililitros por kilogramo y a una concentración de 10%.

$$Rougher \rightarrow 48 \frac{\text{g reac}}{\text{Kg}} \times \frac{100 \text{ ml}}{10 \text{ g reac}} \times \frac{\text{TN}}{1000 \text{ Kg}} = 0.48 \text{ ml}/\text{Kg}$$

$$Scavenger \rightarrow 28.8 \frac{g \text{ reac}}{Kg} \times \frac{100 \text{ ml}}{10 \text{ g reac}} \times \frac{TN}{1000Kg} = 0.288 \text{ ml/Kg}$$

**c) Aerofloat 208 (A-208)**

En la planta se dosifica en las etapas Rougher y Scavenger 6 y 8 mililitros por minuto correspondientemente, en laboratorio deseamos una dosificación de gramos por tonelada de mineral, entonces:

Datos:

- Dosificación Rougher: 6ml/min
- Dosificación Scavenger: 8ml/min
- Gravedad Especifica A-208: 1.1175 g/ml
- Flujo de mineral: 208.3 Kg/min

$$Rougher \rightarrow \frac{6ml}{min} \times \frac{min}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{10^3 Kg}{TN} \times \frac{1.1175 \text{ g}}{ml} = 32.18 \frac{gr}{TN} = \frac{28.8ml}{TN}$$

$$Scavenger \rightarrow \frac{8ml}{min} \times \frac{min}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{10^3 Kg}{TN} \times \frac{1.1175g}{ml} = 42.91 \frac{gr}{TN} = \frac{38.4ml}{TN}$$

**d) Aeropromoter 404 (A-404)**

En planta dosifican 8 ml/min en la etapa Rougher y 2 ml/min en la etapa Scavenger, en laboratorio deseamos una dosificación de gramos por tonelada de mineral, tenemos:

Datos:

- Dosificación Rougher: 8ml/min
- Dosificación Scavenger: 2ml/min
- Gravedad Especifica: 1.166 g/ml
- Flujo de mineral: 208.3 Kg/min

$$\text{Rougher} \rightarrow \frac{8\text{ml}}{\text{min}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{TN}} \div \frac{1.166\text{gr}}{\text{ml}} = 44.78 \frac{\text{g}}{\text{TN}} = \frac{38.4\text{ml}}{\text{TN}}$$

$$\text{Scavenger} \rightarrow \frac{2\text{ml}}{\text{min}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{TN}} \times \frac{1.166\text{gr}}{\text{ml}} = 11.20 \frac{\text{g}}{\text{TN}} = \frac{9.6\text{ml}}{\text{TN}}$$

**e) Aerophine 3418 (A-3418)**

En planta únicamente se dosifica en la etapa de Rougher 4 ml/min. Este reactivo es el que deseamos evaluar disminuyendo o reemplazando su dosificación por el colector Z-6. En laboratorio deseamos hallar su dosificación en gramos por tonelada de mineral, entonces:

Datos:

- Dosificación Rougher: 4ml/min
- Flujo de mineral: 208.3 Kg/min
- Gravedad Específica: 1.07 g/ml

$$\text{Rougher} \rightarrow \frac{4\text{ml}}{\text{min}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{Tn}} \times \frac{1.07\text{g}}{\text{ml}} = 20.54 \frac{\text{gr}}{\text{TN}} = 19.2 \frac{\text{ml}}{\text{TN}}$$

En la prueba estándar (Test 3) se utilizará 20.54 g/t, redondeando se utilizará 20 g/t de A-3418.

**f) Mef/il Isobutil Carbonil (MIBC)**

Es el espumante utilizado por la planta de beneficio Jesús S.A.C., la dosificación en la etapa rougher y scavenger es de 12 y 6 ml/min. En laboratorio deseamos hallar su dosificación en gramos por tonelada de mineral, tenemos:

Datos:

- Dosificación Rougher: 12ml/min
- Dosificación Scavenger: 6 ml/min
- Gravedad Específica: 0.807 g/ml

- Flujo de mineral: 208.3 Kg/min

$$\text{Rougher} \rightarrow \frac{12\text{ml}}{\text{min}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{TN}} \times \frac{0.807\text{gr}}{\text{ml}} = 46.49 \frac{\text{gr}}{\text{TN}} = 57.61 \frac{\text{ml}}{\text{TN}}$$

$$\text{Scavenger} \rightarrow \frac{6\text{ml}}{\text{min}} \times \frac{\text{min}}{208.3 \text{ Kg}} \times \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{TN}} \times \frac{0.807\text{gr}}{\text{ml}} = 23.25 \frac{\text{gr}}{\text{TN}} = 28.80 \frac{\text{ml}}{\text{TN}}$$

De la transformación de la tabla 13 a gramos por tonelada, realizamos la tabla 14 para la prueba estándar.

**Tabla 15**

*Dosificación de Reactivos a Nivel de Laboratorio – Estándar*

| Etapas           | Reactivos, g/t    |       |       |       |        |       | Tiempo, min |      |
|------------------|-------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------------|------|
|                  | Na <sub>2</sub> S | Z-6   | A-208 | A-404 | A-3418 | MIBC  | Acond       | Flot |
| <b>Rougher</b>   | 144               | 48.00 | 32.18 | 44.78 | 20.00  | 46.49 | 5           | 3    |
| <b>Scavenger</b> | 480               | 28.80 | 42.91 | 11.20 |        | 23.25 | 4           | 2    |

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

### 5.2.5 Pruebas a realizar de flotación a nivel de laboratorio

Para las pruebas experimentales a nivel de laboratorio se tomará las dosificaciones de la tabla 15, tomando en cuenta que las variables a evaluar son las dosificaciones de los colectores A-3418 y del Z-6, entonces por lo ya visto en la tabla 3 se tiene que:

El reactivo A-3418 en el proceso de flotación se utiliza desde 5 g/t hasta 30 g/t de manera industrial debido a que es un reactivo bien selectivo y caro para el proceso, de manera estándar se utiliza 20g/t, considerando este como máxima dosificación y la mitad la mínima dosificación, o sea 10 g/t, tenemos:

- A-3418 Max: 20 g/t
- A-3418 Min: 10 g/t

El reactivo Z-6 tiene un rango de dosificación de 45 a 90 g/t, en este caso en la prueba estándar en la etapa rougher se utiliza 48 g/t, cerca al mínimo, entonces al quitar el mínimo de A-3418 que son 10 g/t se reemplazaría en el Z-6, teniendo entonces:

- Z-6 Max: 58 g/t
- Z-6 Min: 48 g/t

Los productos medios serían el promedio del máximo y mínimo:

- A-3418 Med: 15 g/t
- Z-6 Med: 53 g/t

Tenemos las pruebas experimentales a realizar:

**Tabla 16**

*Dosificación de Reactivos a Nivel de Laboratorio – Evaluando Reactivos*

|        | Etapas    | Reactivos, g/t    |           |       |       |           | MIBC  |
|--------|-----------|-------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|
|        |           | Na <sub>2</sub> S | Z-6       | A-208 | A-404 | A-3418    |       |
| Test 1 | Rougher   | 144               | <b>48</b> | 32.18 | 44.78 | <b>10</b> | 46.49 |
|        | Scavenger | 480               | 28.8      | 42.91 | 11.2  |           | 23.25 |
| Test 2 | Rougher   | 144               | <b>58</b> | 32.18 | 44.78 | <b>10</b> | 46.49 |
|        | Scavenger | 480               | 28.8      | 42.91 | 11.2  |           | 23.25 |
| Test 3 | Rougher   | 144               | <b>48</b> | 32.18 | 44.78 | <b>20</b> | 46.49 |
|        | Scavenger | 480               | 28.8      | 42.91 | 11.2  |           | 23.25 |
| Test 4 | Rougher   | 144               | <b>58</b> | 32.18 | 44.78 | <b>20</b> | 46.49 |
|        | Scavenger | 480               | 28.8      | 42.91 | 11.2  |           | 23.25 |
| Test 5 | Rougher   | 144               | <b>53</b> | 32.18 | 44.78 | <b>15</b> | 46.49 |
|        | Scavenger | 480               | 28.8      | 42.91 | 11.2  |           | 23.25 |
| Test 6 | Rougher   | 144               | <b>53</b> | 32.18 | 44.78 | <b>15</b> | 46.49 |
|        | Scavenger | 480               | 28.8      | 42.91 | 11.2  |           | 23.25 |

*Nota:* Elaborado por los tesisistas; realizado en el laboratorio de procesamiento de Minerales, **la información resaltada en negrita** son las dosificaciones a evaluar de A-3418 y Z-6.

El Test 3 vendría a ser la prueba con los datos estándar, tal cual se mantiene en planta.

### 5.2.6 Flotación de mineral mixto de cobre estándar y evaluando los reactivos

La flotación estándar como las pruebas donde se evalúan diferentes reactivos se llevan a las mismas condiciones de temperatura, pH, tiempos de acondicionamiento y de flotación, densidad, entre otros; lo único que varía es la dosificación del colector A-3418 y Z-6.

El pH para la etapa Rougher se elevó cuidadosamente con lechada de Cal, hasta llegar a 12 de pH, la lechada de cal se preparó al 20% de concentración y se dosificó 18 mililitros para cada prueba. En la etapa Scavenger se necesita bajar el pH a 9 para lo cual se aumenta agua al relave del Rougher, aproximadamente se aumentó entre 450 ml a 500 ml de agua para cada prueba, la dosificación de reactivos para las pruebas se utilizó la tabla 15.

Los concentrados y relaves de cada prueba, fueron secados y pesados para sus análisis químicos y sus balances metalúrgicos.

**Tabla 17**

*Pesos de Concentrados y Relaves*

| <b>Muestra</b> | <b>Peso (g)</b> |
|----------------|-----------------|
| <b>Conc 1</b>  | 80.30           |
| <b>Conc 2</b>  | 82.90           |
| <b>Conc 3</b>  | 77.80           |
| <b>Conc 4</b>  | 82.90           |
| <b>Conc 5</b>  | 79.70           |
| <b>Conc 6</b>  | 80.20           |
| <b>Rel 1</b>   | 919.70          |
| <b>Rel 2</b>   | 917.10          |
| <b>Rel 3</b>   | 922.20          |
| <b>Rel 4</b>   | 917.10          |
| <b>Rel 5</b>   | 920.30          |
| <b>Rel 6</b>   | 919.80          |

*Nota:* Elaborado por los tesisistas; realizado en el laboratorio de procesamiento de Minerales, El conc 1 y Rel 1 vienen a ser el concentrado y relave del Test 1, lo correspondiente para los demás.

**Tabla 18***Análisis Químico de Cobre Total*

| <b>Muestra</b> | <b>Ley CuT (%)</b> |
|----------------|--------------------|
| <b>Conc 1</b>  | 22.18              |
| <b>Conc 2</b>  | 21.86              |
| <b>Conc 3</b>  | 22.97              |
| <b>Conc 4</b>  | 21.65              |
| <b>Conc 5</b>  | 22.55              |
| <b>Conc 6</b>  | 22.48              |
| <b>Rel 1</b>   | 0.27               |
| <b>Rel 2</b>   | 0.23               |
| <b>Rel 3</b>   | 0.26               |
| <b>Rel 4</b>   | 0.26               |
| <b>Rel 5</b>   | 0.24               |
| <b>Rel 6</b>   | 0.24               |

*Nota:* INSUMOS y REACTIVOS QUÍMICOS DEL PERÚ S.A.C.

**Tabla 19***Balance Metalúrgico Test 1*

| <b>Test 1</b>    | <b>Peso</b> |          | <b>Leyes</b> | <b>Cont. Metálico</b> | <b>%</b>            |
|------------------|-------------|----------|--------------|-----------------------|---------------------|
|                  | <b>g</b>    | <b>%</b> | <b>Cu</b>    | <b>Cu</b>             | <b>Recuperación</b> |
| <b>Conc.</b>     | 80.30       | 8.03%    | <b>22.18</b> | 17.81                 | <b>87.76</b>        |
| <b>Relave</b>    | 919.70      | 91.97%   | 0.27         | 2.48                  | 12.24               |
| <b>Cab. Cal.</b> | 1,000.00    | 100.00%  | 2.03         | 20.29                 | 100.00              |

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

Del balance metalúrgico del Test 1 -se demuestra una recuperación de 87.76% de cobre, con una ley de cobre de 22.18%, utilizando 10g/t de A-3418 y 48 g/t de Z-6.

**Tabla 20**

*Balance Metalúrgico Test 2*

| Test 2           | Peso     |         | Leyes        | Cont. Metálico | % Recuperación |
|------------------|----------|---------|--------------|----------------|----------------|
|                  | g        | %       |              |                |                |
| <b>Conc.</b>     | 82.90    | 8.29%   | <b>21.86</b> | 18.12          | <b>89.57</b>   |
| <b>Relave</b>    | 917.10   | 91.71%  | 0.23         | 2.11           | 10.43          |
| <b>Cab. Cal.</b> | 1,000.00 | 100.00% | 2.02         | 20.23          | 100.00         |

*Nota:* Elaborado por los tesistas.

Del balance metalúrgico evaluando la dosificación de 58 g/t de Z-6 y sólo 10g/t de A-3418, se llega a obtener una recuperación de 89.57% de cobre, con una ley de 21.86%.

**Tabla 21**

*Balance Metalúrgico Test 3 (estándar)*

| Test 3           | Peso     |         | Leyes        | Cont. Metálico | % Recuperación |
|------------------|----------|---------|--------------|----------------|----------------|
|                  | g        | %       |              |                |                |
| <b>Conc.</b>     | 77.80    | 7.78%   | <b>22.97</b> | 17.87          | <b>88.17</b>   |
| <b>Relave</b>    | 922.20   | 92.22%  | 0.26         | 2.40           | 11.83          |
| <b>Cab. Cal.</b> | 1,000.00 | 100.00% | 2.03         | 20.27          | 100.00         |

*Nota:* Elaborado por los tesistas.

Del balance metalúrgico estándar-, se obtiene una recuperación de 88.17 % de cobre, con una ley de 22.97%, usando 20 g/t de A-3418 y 48 g/t de Z-6.

**Tabla 22***Balance Metalúrgico Test 4*

| <b>Test 4</b>    | <b>Peso</b> |          | <b>Leyes</b> | <b>Cont. Metálico</b> | <b>% Recuperación</b> |
|------------------|-------------|----------|--------------|-----------------------|-----------------------|
|                  | <b>g</b>    | <b>%</b> | <b>Cu</b>    | <b>Cu</b>             | <b>Cu</b>             |
| <b>Conc.</b>     | 82.90       | 8.29%    | <b>21.65</b> | 17.95                 | <b>88.27</b>          |
| <b>Relave</b>    | 917.10      | 91.71%   | 0.26         | 2.38                  | 11.73                 |
| <b>Cab. Cal.</b> | 1,000.00    | 100.00%  | 2.03         | 20.33                 | 100.00                |

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

Del balance metalúrgico del Test 4, produce una recuperación de 88.27% de Cu, y una ley de concentrado de 21.65% usando 20 g/t de A-3418 y 58 g/t de Z-6.

**Tabla 23***Balance Metalúrgico Test 5*

| <b>Test 5</b>    | <b>Peso</b> |          | <b>Leyes</b> | <b>Cont. Metálico</b> | <b>% Recuperación</b> |
|------------------|-------------|----------|--------------|-----------------------|-----------------------|
|                  | <b>g</b>    | <b>%</b> | <b>Cu</b>    | <b>Cu</b>             | <b>Cu</b>             |
| <b>Conc.</b>     | 79.70       | 7.97%    | <b>22.55</b> | 17.97                 | <b>89.06</b>          |
| <b>Relave</b>    | 920.30      | 92.03%   | 0.24         | 2.21                  | 10.94                 |
| <b>Cab. Cal.</b> | 1,000.00    | 100.00%  | 2.02         | 20.18                 | 100.00                |

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

Del balance metalúrgico del Test 5, produce una recuperación de 89.06% de Cu, y una ley de concentrado de 22.55% usando 15 g/t de A-3418 y 53 g/t de Z-6.

**Tabla 24***Balance Metalúrgico Test 6*

| Test 6           | Peso     |         | Leyes        | Cont. Metálico | % Recuperación |
|------------------|----------|---------|--------------|----------------|----------------|
|                  | g        | %       | Cu           | Cu             | Cu             |
| <b>Conc.</b>     | 80.20    | 8.02%   | <b>22.48</b> | 18.03          | <b>89.09</b>   |
| <b>Relave</b>    | 919.80   | 91.98%  | 0.24         | 2.21           | 10.91          |
| <b>Cab. Cal.</b> | 1,000.00 | 100.00% | 2.02         | 20.24          | 100.00         |

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

Del balance metalúrgico del Test 6, produce una recuperación de 89.09% de Cu, y una ley de concentrado de 22.48% usando 15 g/t de A-3418 y 53 g/t de Z-6, los Test 5 y 6 utilizan las mismas dosificaciones, sus porcentajes de recuperaciones y leyes de cobre son prácticamente iguales.

De las tablas 19, 20, 21, 22, 23 y 24 se elabora la comparación de Ley y porcentaje de recuperación de Cobre Total, Tenemos:

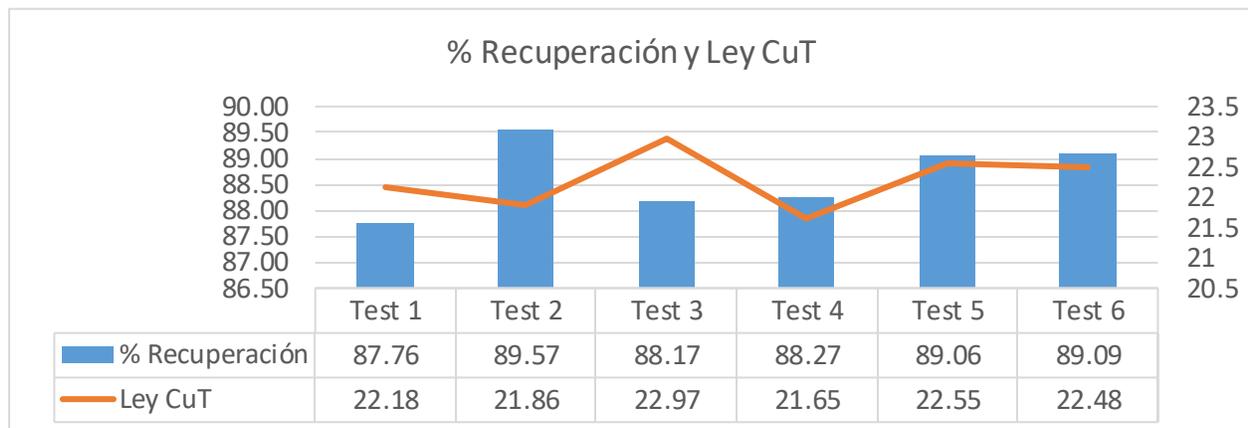
**Tabla 25***Recuperación y ley de Cobre*

|                          | %<br>Recuperación | Ley CuT |
|--------------------------|-------------------|---------|
| <b>Test 1</b>            | 87.76             | 22.18   |
| <b>Test 2</b>            | 89.57             | 21.86   |
| <b>Test 3 (estándar)</b> | 88.17             | 22.97   |
| <b>Test 4</b>            | 88.27             | 21.65   |
| <b>Test 5</b>            | 89.06             | 22.55   |
| <b>Test 6</b>            | 89.09             | 22.48   |

*Nota:* Elaborado por los tesisistas.

**Figura 16**

*% Recuperación y Ley de Cobre Total*



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

En la figura 16, el Test 3 vendría a ser la prueba estándar, tiene una recuperación de 88.17% de cobre total, los Test 2, 4, 5 y 6 tienen mayor recuperación que el estándar, pero sus leyes de CuT son menores. La ley de CuT del estándar es de 22.97% a nivel de laboratorio, todos los demás Test no superan en Ley a la prueba estándar. Este fenómeno es posible debido a que el reactivo A-3418 es muy selectivo y por eso la ley es mayor a los demás, en cambio el Z-6 es más energético, por ende, llega a concentrar con más fuerzas, pero no solo minerales de Cu sino también impurezas y otros elementos no deseados, bajando a cierto grado la ley de CuT.

### *5.2.7 Evaluación económica de contenido metálico vs costo de reactivos.*

Debido al fenómeno de mayor ley y menor concentración, para evaluar el efecto económico de los cambios de concentración y leyes al evaluar los colectores de la tesis, se debe realizar una evaluación económica de cada prueba que contenga mayor porcentaje de recuperación que la prueba estándar, esto quiere decir de los Test 2, 4, 5 y 6; y la misma prueba estándar (Test 3) como punto para comparar.

La evaluación económica se dará con el contenido metálico de cobre obtenido y los costos de los reactivos, ya que son los reactivos los que estamos evaluando. los costos de los reactivos son por información brindada son:

- 1 Kg de A-3418                      \$ 16.54 (dieciséis dólares con cincuenta y cuatro centavos)
- 1 Kg de Z-6                            \$ 4.14 (cuatro dólares con catorce centavos)

La planta de beneficio Jesús S.A.C. trata 300 toneladas al día, se evaluará entonces con 300 t/día.

El cálculo de contenido metálico de CuT es el siguiente:

$$\text{Contenido Metálico} = \frac{\text{Peso del Concentrado} \times \text{Ley de CuT}}{100}$$

El precio del cobre durante el último año ha variado entre 3.50 a 4.88 dólares americanos por libra, su incremento fluctúa entre 0.055% a 1.80% por día, con bajadas de hasta 1.51% durante los últimos meses de noviembre y dos primeras semanas de diciembre, el precio del dólar fluctuó entre \$ 4.4517 a \$ 4.2021 por libra, según la página del banco de reservas del Perú: <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/diarias/resultados/PD04701XD/html>.

Para el trabajo de investigación, el precio de cobre por libra será el promedio de los últimos meses, tenemos entonces:

$$\frac{\$ 4.4517 + \$ 4.2021}{2} = \$ 4.3269$$

El precio de cobre con que realizaremos la evaluación económica será de \$ 4.3269 por libra.

Tenemos entonces:

**Tabla 26**

*Contenido metálico y cantidad de reactivo utilizado a nivel de laboratorio*

| <b>Test</b>              | <b>Ley CuT (%)</b> | <b>Concentrado (t/día)</b> | <b>Cont. Met. (t/día)</b> | <b>A-3418/día (Kg)</b> | <b>Z-6/día (Kg)</b> |
|--------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|
| <b>Test1</b>             | 22.18              | 24.09                      | 5.34                      | 3.00                   | 14.40               |
| <b>Test 2</b>            | 21.86              | 24.87                      | 5.44                      | 3.00                   | 17.40               |
| <b>Test 3 (estándar)</b> | 22.97              | 23.34                      | 5.36                      | 6.00                   | 14.40               |
| <b>Test 4</b>            | 21.65              | 24.87                      | 5.38                      | 6.00                   | 17.40               |
| <b>Test 5</b>            | 22.55              | 23.91                      | 5.39                      | 4.50                   | 15.90               |
| <b>Test 6</b>            | 22.48              | 24.06                      | 5.41                      | 4.50                   | 15.90               |

Nota: El Test 3 es la prueba estándar, es punto de comparación frente a las otras pruebas.

**Tabla 27**

*Costos y beneficios evaluados de las pruebas.*

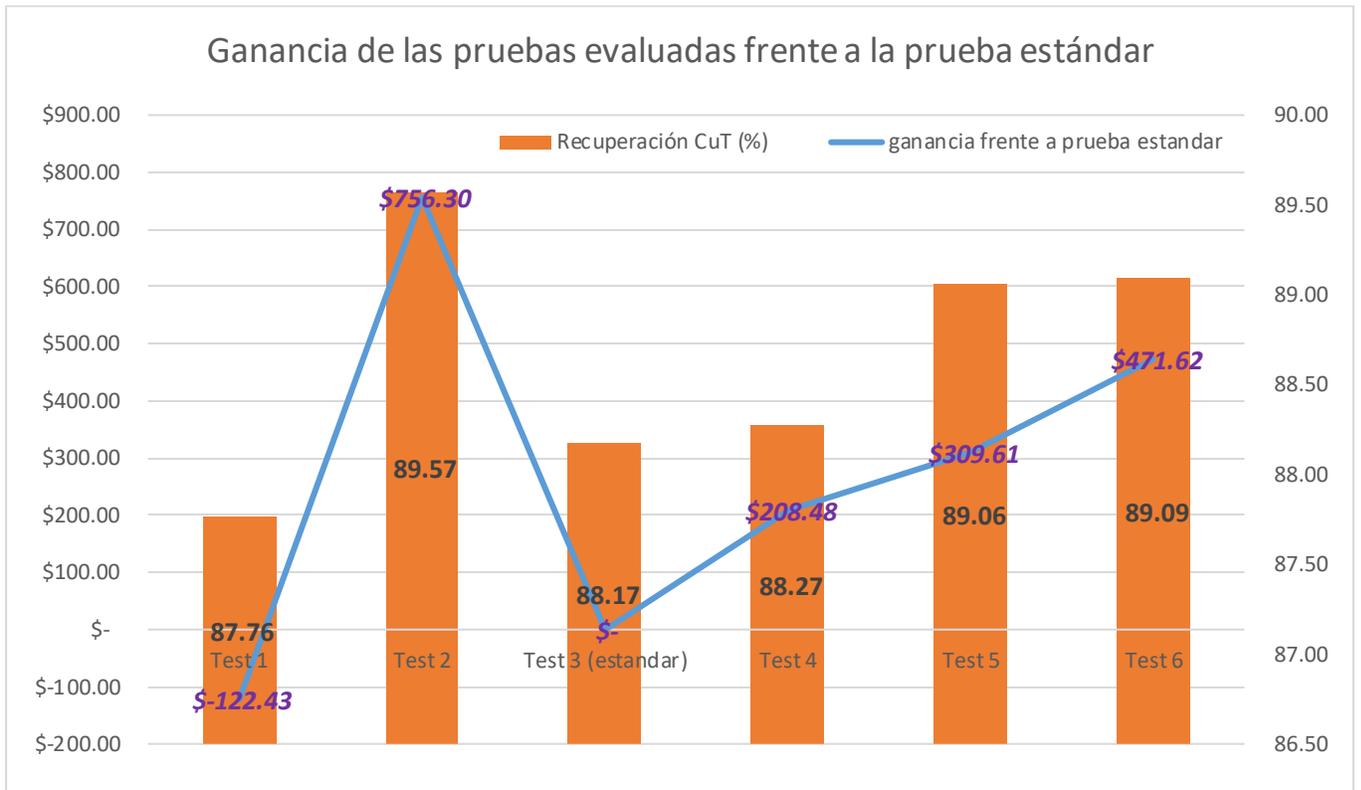
| <b>Test</b>              | <b>Costo/día (\$)</b> |            | <b>Cont Met. (lb)</b> | <b>Beneficio CuT. (\$)</b> | <b>Beneficio CuT - Costos (A-3418 y Z-6)</b> | <b>ganancia frente a prueba estándar</b> |
|--------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|----------------------------|--|--|
|                          | <b>A-3418</b>         | <b>Z-6</b> |                       |                            |  |  |
| <b>Test 1</b>            | 49.62                 | 59.62      | 11,779.64             | 50,969.33                  | \$ 50,860.10                                 | \$ -122.43                               |
| <b>Test 2</b>            | 49.62                 | 72.04      | 11,985.60             | 51,860.48                  | \$ 51,738.83                                 | \$ 756.30                                |
| <b>Test 3 (estándar)</b> | 99.24                 | 59.62      | 11,819.40             | 51,141.38                  | \$ 50,982.52                                 | \$ -                                     |
| <b>Test 4</b>            | 99.24                 | 72.04      | 11,870.46             | 51,362.28                  | \$ 51,191.00                                 | \$ 208.48                                |
| <b>Test 5</b>            | 74.43                 | 65.83      | 11,886.66             | 51,432.39                  | \$ 51,292.14                                 | \$ 309.61                                |
| <b>Test 6</b>            | 74.43                 | 65.83      | 11,924.10             | 51,594.40                  | \$ 51,454.14                                 | \$ 471.62                                |

Nota: El Test 3 es la prueba estándar, es punto de comparación frente a las otras pruebas.

De la tabla 26, la evaluación económica únicamente evaluando el contenido metálico de Cobre y los costos de los reactivos A-3418 y Z-6, tiene como ganancia de la prueba estándar \$ 50,982.52, y el test 2 presente la mayor ganancia frente a la prueba estándar, superándolo por \$ 756.30

**Figura 17**

*Ganancia de cada prueba*



Nota: Elaborado por los tesisistas.

## Capítulo VI

### Análisis y Discusión de Resultados

#### 6.1 Resultados obtenidos.

##### Datos de la prueba es estándar (Test 3):

- Ley del cobre total = 22.97%
- % de recuperación de cobre = 88.17%
- Evaluación económica simple = \$ 50,982.52

##### Datos del Test 1:

- Ley del cobre total = 22.18%
- % de recuperación de cobre = 87.76%
- Evaluación económica simple = \$50,860.10

Tanto la ley de cobre total como el porcentaje de recuperación son menores que la prueba estándar, se pierde \$ 122.43 frente a la prueba estándar.

##### Datos del Test 2:

- Ley del cobre total = 21.86%
- % de recuperación de cobre = 89.57%
- Evaluación económica simple = \$ 51,738.83

La ley de cobre total es menor que el estándar, pero su recuperación es mayor al igual que genera \$ 756.30 de más frente a la prueba estándar.

##### Datos del Test 4:

- Ley del cobre total = 21.65%

- % de recuperación de cobre = 88.27%
- Evaluación económica simple = \$ 51,191.00

Presenta menor ley y ligeramente mayor ley que la prueba estándar, su ganancia es \$ 208.48 mayor que el estándar.

#### **Datos del Test 5:**

- Ley del cobre total = 22.55%
- % de recuperación de cobre = 89.06%
- Evaluación económica simple = \$ 51,292.14

Presenta menor ley de CuT y mayor recuperación que la prueba estándar, su ganancia es \$ 309.61 mayor que el estándar.

#### **Datos del Test 6:**

- Ley del cobre total = 22.48%
- % de recuperación de cobre = 89.09%
- Evaluación económica simple = \$ 51,191.00

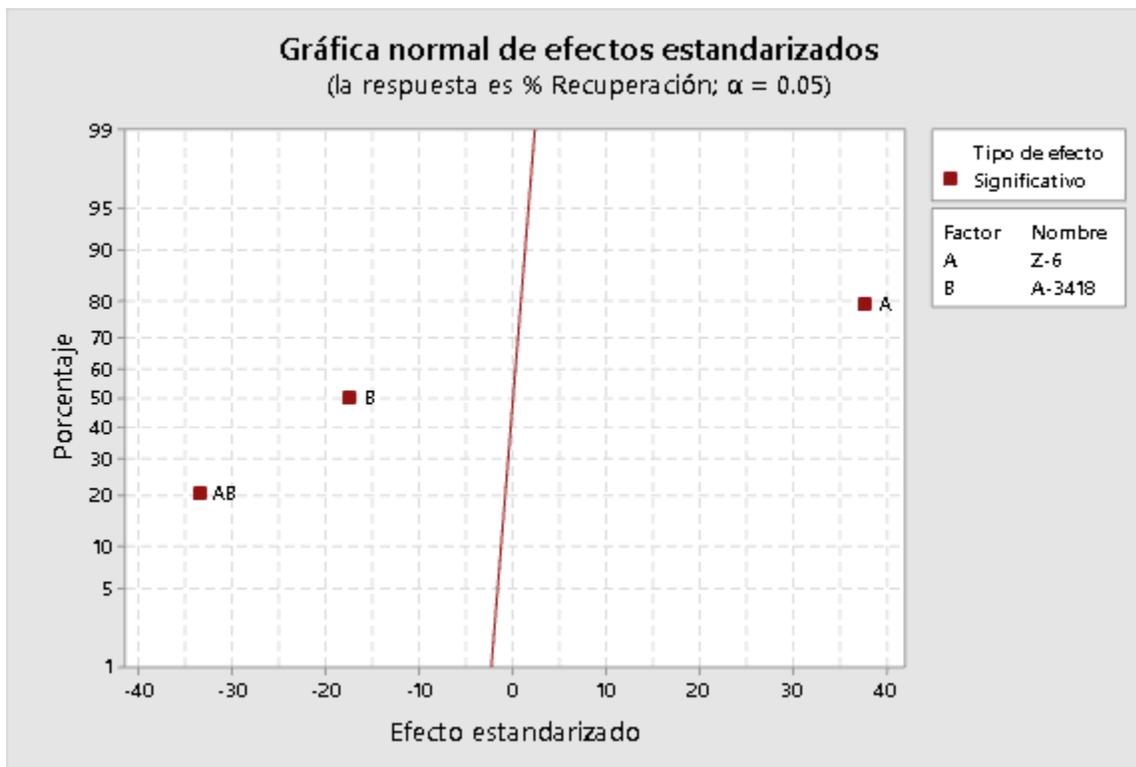
Presenta menor ley de CuT y mayor recuperación que la prueba estándar, su ganancia es \$ 471.62 mayor que el estándar.

## **6.2 Resultados del diseño experimental**

Después de realizar las combinaciones respectivas, se obtiene el Figura 18 de análisis de diseño factorial  $2^2$  con dos intermedios adicionales, en la gráfica se puede identificar las variables más significativas en el porcentaje de recuperación de cobre, como también los no significativos.

**Figura 18**

*Resultados del análisis de diseño factorial*

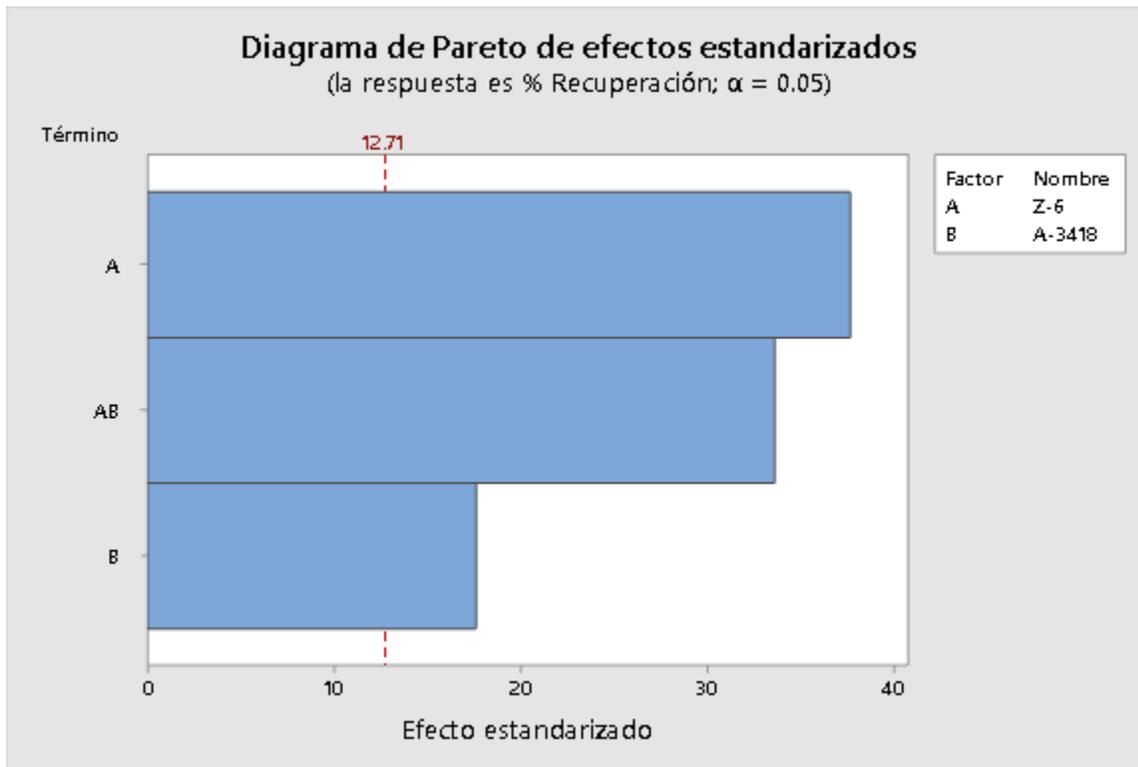


Nota: Elaborado en MINITAB.

En la figura 18, se observa que las variables y la combinación de estas, están alejadas del punto cero, por lo que tienen un efecto significativo. Entonces la dosificación de Z-6 y de A-3418 son significativos para el diseño factorial.

**Figura 19**

**Diagrama de Pareto de los efectos**

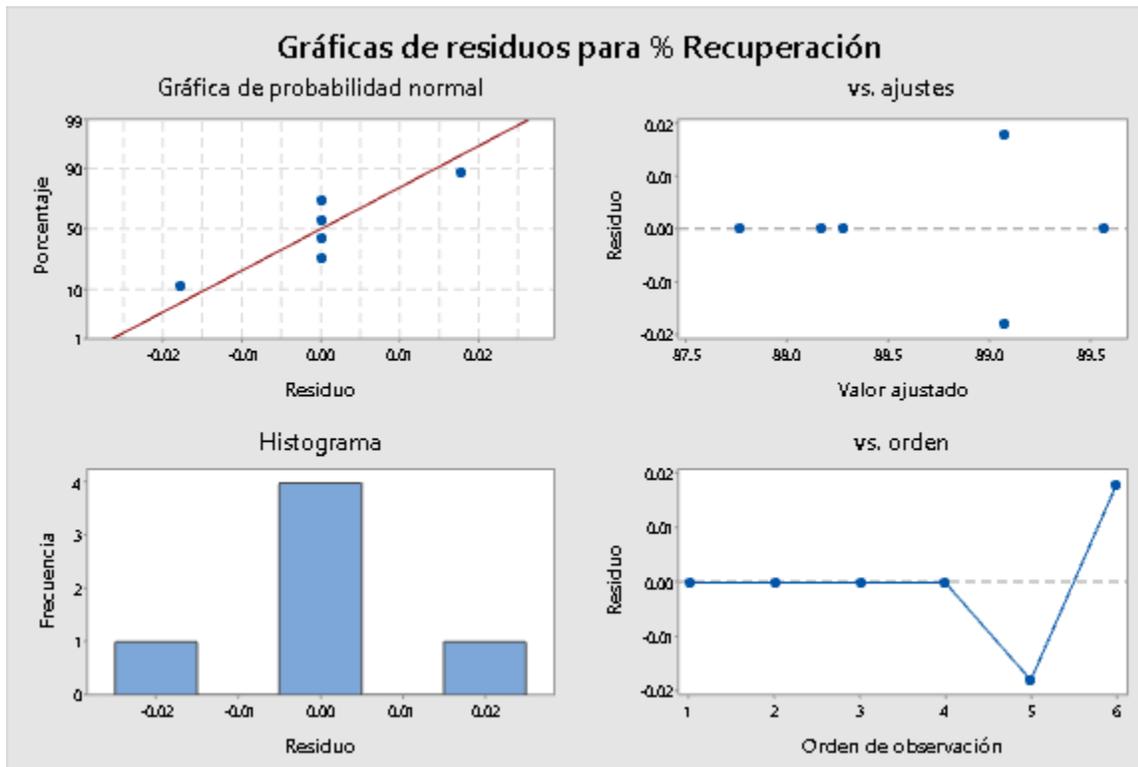


Nota: Elaborado en MINITAB.

El diagrama de Pareto se utiliza para determinar la magnitud y la importancia de los efectos de las variables. Las barras que cruzan la línea de referencia son estadísticamente significativas. En la figura 19, las barras que representan los factores A, AB y B cruzan la línea de referencia que está en 12.71, de los cuales se puede concluir que en el experimento la variable más predominante es el Z-6, porque es el más energético. Y la combinación de ambos reactivos también es de importancia. Estos factores son estadísticamente significativos en el nivel de 0,05 con los términos actuales del modelo.

**Figura 20**

**Gráfica de residuos para % Recuperación**



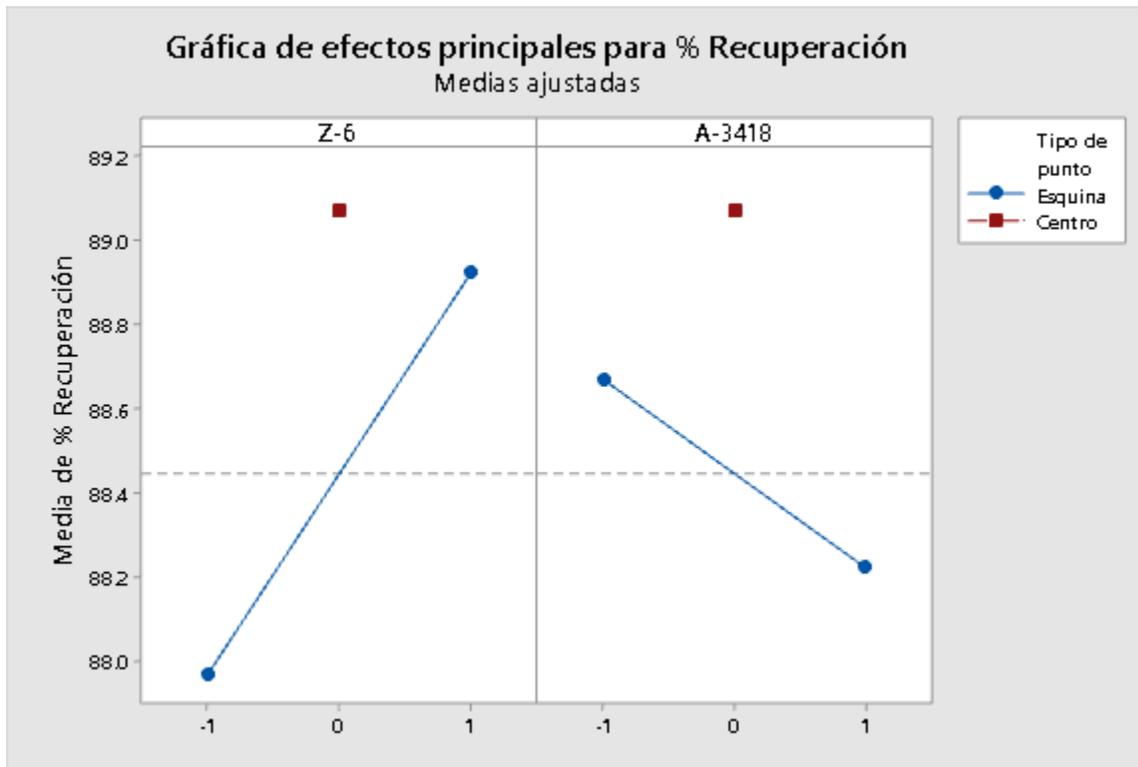
Nota: Elaborado en MINITAB.

Gráfica de probabilidad normal, indica que tiene una distribución normal ya que la línea es recta ascendente, el histograma se utiliza para determinar si los datos son asimétricos o incluyen valores atípicos. El histograma en este caso tiene 3 valores por lo que no contiene suficientes puntos para revelar datos de simetría o valores atípicos. En el gráfico de Residuo vs Orden de observación no presenta sesgos lo cual indica que en un proceso no es común presentar la misma recuperación para cada corrida aun así se utilice la misma dosificación de reactivos.

En la figura 21, se observa las rectas con pendientes pronunciadas representando a los factores que se encuentran dentro del modelo, caso no estarían pronunciadas, estarían fuera del modelo. En este caso la variable de dosificación de Z-6 es más significativo que el de A-3418

**Figura 21**

*Gráfica de efectos principales de % Recuperación.*



Nota: Elaborado por MINITAB.

**Tabla 28**

*Análisis de Varianza*

| Fuente                      | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|-----------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Modelo                      | 4  | 2.37023   | 0.592558  | 919.68  | 0.025   |
| Lineal                      | 2  | 1.11472   | 0.557360  | 865.05  | 0.024   |
| Z-6                         | 1  | 0.91448   | 0.914478  | 1419.32 | 0.017   |
| A-3418                      | 1  | 0.20024   | 0.200242  | 310.79  | 0.036   |
| Interacciones de 2 términos | 1  | 0.72910   | 0.729096  | 1131.59 | 0.019   |
| Z-6*A-3418                  | 1  | 0.72910   | 0.729096  | 1131.59 | 0.019   |
| Curvatura                   | 1  | 0.52642   | 0.526418  | 817.03  | 0.022   |
| Error                       | 1  | 0.00064   | 0.000644  |         |         |
| Total                       | 5  | 2.37088   |           |         |         |

Nota: Elaborado por MINITAB.

La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media, en el análisis de varianza, se presenta la tabla 27, donde nos indica que el valor p (Pearson) del modelo y la interacción de las dos variables no supera el 0.05, por lo que se confirma que las variables son significativas para el proceso.

La ecuación de regresión obtenida por el programa es:

$$\% \text{ Recuperación} = 88.4451 + 0.4781 Z-6 - 0.2237 A-3418 - 0.4269 Z-6 * A-3418 + 0.6283 \text{ Pt Ctral}$$

Donde nos indica las variables en dosificación de g/t y el Pt Ctral, viene a ser el promedio de las dosificaciones utilizadas de los reactivos.

### **6.3 Discusión de Resultados.**

a. Con respecto a la ley de cobre total, en planta procesando el mismo mineral, se obtuvo un concentrado de 23.63% de cobre total y una recuperación de 89.07%, en la prueba estándar (Test 3) a nivel de laboratorio arrojó 22.97% de cobre con una recuperación de 88.17%. La variación de cobre total se genera por las variables no consideradas en el proceso de flotación, como son la carga circulante de reactivos que se presenta en el proceso, la calidad de agua para el proceso de flotación y molienda, ya que en planta el agua es industrial y en laboratorio el agua es potable. En general, los resultados obtenidos en laboratorio deberán aproximarse a los resultados de forma industrial, tenemos por experiencia que el porcentaje de error de un resultado de una prueba a nivel de laboratorio no debe superar el 5% de error frente al resultado de una prueba a nivel de planta, tenemos:

**Tabla 29***Margen de error (Prueba planta vs Prueba laboratorio)*

|                             | <b>Ley CuT (%)</b> | <b>Recuperación (%)</b> |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------|
| <b>Nivel de laboratorio</b> | 22.97              | 88.17                   |
| <b>Nivel de planta</b>      | 23.63              | 89.07                   |
| <b>% de error</b>           | <b>2.79</b>        | <b>1.01</b>             |

Nota: Elaboración propia

Como se observa, ambos porcentajes de error no superan el 5% admisible, por lo que los resultados a nivel de laboratorio son aceptados para su evaluación y trabajo.

**b.** En las pruebas realizadas, con respecto a la ley y porcentaje de recuperación de cobre total:

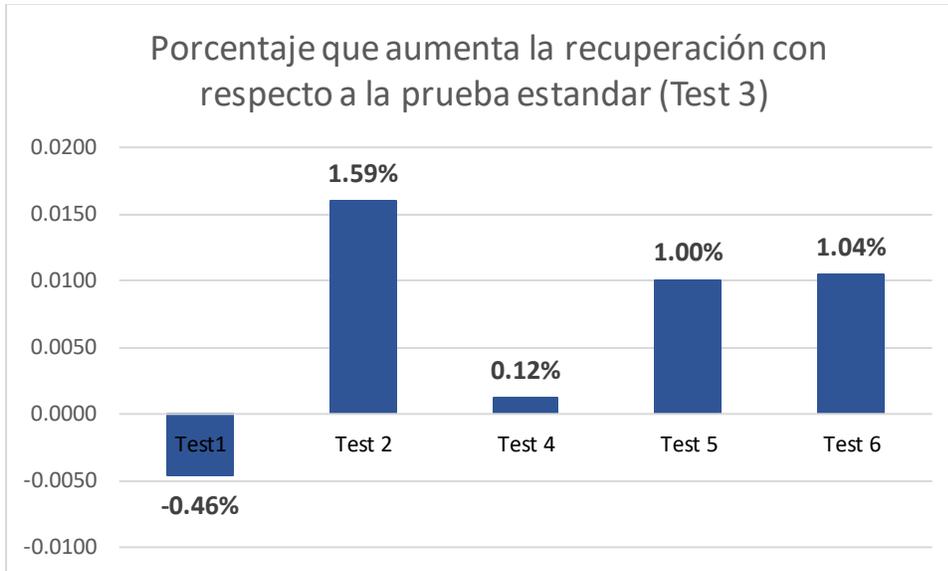
- Ley de CuT (%): Test 3 > Test 5 > Test 6 > Test 1 > Test 2 > Test 4
- % de Recuperación: Test 2 > Test 6 > Test 5 > Test 4 > Test 3 > Test 1

El Test 3 que viene a ser la prueba estándar presenta la mayor ley de CuT con 22.97% a nivel de laboratorio, ningún otro Test supera en ley de CuT a la prueba estándar.

Con respecto a la recuperación de cobre, el Test 2 genera la mayor recuperación 89.57% a nivel de laboratorio, los Test 3, 4, 5 y 6 también presentan mayor recuperación, tenemos:

**Figura 22**

*Porcentaje que aumenta la recuperación frente a la prueba estándar (Test 3)*



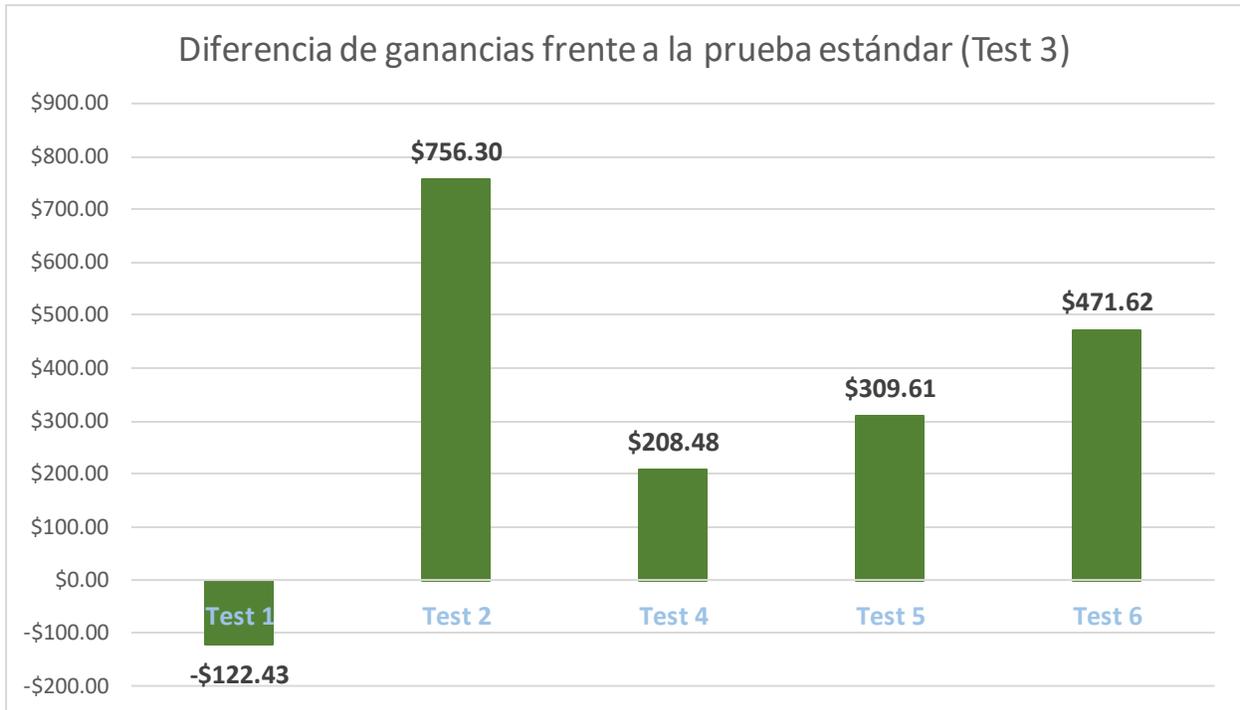
Nota: Elaboración propia, -046% quiere decir que la recuperación disminuye un 0.46%

La prueba estándar presenta 88.17% de recuperación de cobre, el Test 2 tiene 89.57% de recuperación que son 1.4 puntos de más, a nivel estadístico representa 1.59% de aumento de recuperación.

c. Con respecto a la evaluación económica tomando únicamente el contenido metálico por día y el costo de reactivos evaluados, tenemos que la prueba estándar genera \$ 50,982.52. se toma este dato como punto de comparación frente a las demás Tests, tenemos:

### Figura 23 Diferencia de ganancias frente a la prueba estándar

*Diferencia de ganancias frente a la prueba estándar (Test 3)*



Nota: Elaborado por los tesistas, -\$122.43 quiere decir que se la ganancia disminuye \$122.43

La mayor ganancia la presenta el Test 2 con \$756.30 más que el estándar, en otras palabras, el test 2 es el más rentable para reemplazar a la prueba estándar, ya que también presenta la mayor recuperación de cobre.

## Conclusiones

- Realizando la evaluación de colectores en el proceso de flotación a nivel de laboratorio, aumentando la dosificación del Z-6 en 10 g/t y disminuir la dosificación de A-3418 en 10 g/t, genera la mayor recuperación de cobre posible respecto a la prueba estándar, dando un incremento de 1.40% de cobre en el concentrado
- De la evaluación realizada en el laboratorio de procesamiento de minerales, se logra determinar que las características mineralógicas del mineral mixto de cobre son favorables para el proceso de flotación.
- Al aumentar la dosificación de Z-6 y disminuir la del A-3418, la recuperación aumenta con respecto a la prueba estándar, si ambas dosificaciones disminuyen, la recuperación también disminuye. Si ambas recuperaciones aumentan, la recuperación de cobre en el concentrado no aumenta en gran escala, se mantiene casi igual a la prueba estándar.
- Al obtenerse mayor porcentaje de recuperación de cobre, la evaluación económica es positiva para el proceso de flotación, debido a que se obtiene mayor contenido metálico y menor consumo del reactivo A-3418 que es costoso, lo cual es beneficioso para la planta de beneficio Jesús S.A.C.
- Se usó el diseño experimental con el software MINITAB, cuyo modelo matemático explica el gran comportamiento de las variables significativas que se detalla en la ecuación

$$\% \text{ Recuperación} = 88.4451 + 0.4781 \text{ Z-6} - 0.2237 \text{ A-3418} - 0.4269 \text{ Z-6} * \text{A-3418} + 0.6283 \text{ Pt Ctral}$$

Con lo que se pudo determinar que el reactivo Z-6 y la combinación de ambos reactivos tienen mayor influencia en la recuperación de cobre del proceso.

## Recomendaciones

- Realizar pruebas de los comportamientos mineralógicos de los minerales para mejorar las pruebas de flotación y de esta manera obtener mejor recuperación del cobre y calidad de grado.
- Realizar pruebas de flotación a nivel de laboratorio con muestras procedentes de la salida del overflow del hidrociclón, utilizando agua recirculada del proceso de la planta de Beneficio Jesús S.A.C.
- Continuar evaluando diferentes reactivos de flotación con la finalidad de seguir mejorando la recuperación, calidad del concentrado y disminución de costos.
- Realizar investigaciones para flotación de minerales de cobre mixto utilizando los reactivos Cytec promotores de línea 800 y aminos experimentales.

## BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Ayala Mina, J. y Pardo Mercado, R. (1995) *Optimización Por Diseños Experimentales*. Ed. Lima - Perú.
- ✓ Azareño Ortiz, A. (2015) *Flotación y Concentración de Minerales*, Ed. colecciones Jóvic, Lima – Perú
- ✓ Baelo Alvarez, M. (2018) *Guía práctica para redactar y exponer trabajos académicos*. Ed. Tirant lo Blach – España.
- ✓ Ballester, A. (1994). *Introducción a la Flotación de Minerales "Diseño de Experimentos"*. Ed. Síntesis, S.A. Madrid-España.
- ✓ Bravo Gálvez, A. C. (2004). *Manual de Flotación*. Casapalca – Perú.
- ✓ Caicedo F., (1968) *Diseño Experimental con Aplicaciones a Metalurgia Extractiva*. Edición. 24.
- ✓ Castro S. (1983), *Fundamentos Físico Químicos de la Flotación, Curso Panamericano de Metalurgia Extractiva, Programa Regional de la OEA, Chile*.
- ✓ Castro, S. Y Garcia, J. A. (2003) *Fundamentos de la Flotación y Aplicaciones*. Chile
- ✓ Condo L y Pazmiño J. (2015) *Diseño Experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias*, Tomo 1. Editorial caracoles. Ecuador.
- ✓ Conejeros Trujillo, V. (2003) *Procesamiento De Minerales, Antofagasta - Chile*".
- ✓ CYTEC INDUSTRIES INC., (2015), *Manual de productos químicos para minería*, Ed. Revisada C.I.
- ✓ Eco, U. (1997) *Como se hace una tesis*. Ed. Gedisa – Italia.
- ✓ Errol. K. G. y Spottiswood D. J., *Introduction to Mineral Processing*, Ed. Limusa. Mexico.
- ✓ Guevara, M. (2001). *Modelamiento en Flotación*. Chile.

- ✓ Gutiérrez Pulido, H. (2004). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Editorial Caz prensa Digital, S.A. México
- ✓ Hernández Sampieri, R. y Mendoza Torres, P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A
- ✓ Hitoshi K., (1993) *Herramientas Estadísticas Básicas para el Mejoramiento de la calidad*, Ed. Norma 1993- Lima.
- ✓ López; H. y Ipanaqué; O. (2008), en el trabajo de investigación, *Caracterización y optimización de flotación a nivel laboratorio del mineral de cobre de la minera candelaria*, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- ✓ Magne, L., (1998), *Procesamiento de Minerales*. Chile.
- ✓ Molina V. (2017), *Estudio Del Efecto De La Aplicación De Espumantes En El Proceso De Flotación De Mineral Mixto De Cobre*, Pontificia Universidad Católica De Chile.
- ✓ Montgomery, D. C., (1992) *Diseño y Análisis de Experimentos*, Ed. Iberoamérica.
- ✓ Muñoz Razo, C. (1998). *Como elaborar y asesorar una investigación de tesis*. Ed. Prentice Hall - Mexico.
- ✓ Murphy T., (1977), *Design and Analysis of Industrial Experiments. Chemical Engineering*.
- ✓ Pavez O., y Rivera Zeballos J. H. (2003). *Compendio de Conminución* Ed. UNMSM. Lima Perú
- ✓ Porras Castilla, D. (2006) *Concentración De Minerales y procesamiento de minerales*. Cerro de Paseo-Perú.
- ✓ Salage, J.L. y Forgiarini, A. (2007), *Fundamentos de la Flotación*, Universidad de los Andes, Venezuela.

- ✓ Somasundaran P., *Optimization of a Flotation Operation using Statistical Methods*. AIME, December 1969.
- ✓ Sutulov A. (1968), *Flotación de Minerales*, Universidad de Concepción, Chile.
- ✓ Torres B, Mamani Vidal W., y Alvarado E., Astucuri, T. Venancio (1994), *Introducción a la Flotación de Minerales*, Lima Perú.
- ✓ Uribe L. (2017), en la tesis *Efecto del Agua de Mar en la Recuperación de Minerales de Cobre-Molibdeno por Procesos de Flotación*. Universidad de Concepción Chile.
- ✓ Vara Horna, Aristides (2015). *7 Pasos Para Elaborar Una Tesis*. Ed. Macro, Perú.

#### **REFERENCIA DE TESIS**

- ✓ Artica; M. y Rivera; J. (2015), en la tesis *Optimización del proceso de flotación de la calcopirita en presencia de la pirita en la pulpa en la concentradora amistad CIA minera argentum*, Universidad Nacional del Centro del Perú.
- ✓ Castro Chamorro, J. A.,(2005) Tesis de pre – grado en *Optimización del proceso de flotación de concentrado de zinc en la compañía Minera “Yauliyacu” S.A. mediante diseños factoriales*. UNMSM – EAP IM. Lima.
- ✓ Figueroa, L. Y Aquiles, M. (2005), Tesis de post - grado en *Celda de flotación de nueva generación, prototipo, pilotaje y evaluación*. UNMSM – EAP IM. Lima
- ✓ Lupo; W. y Utani; W. (2014), la tesis *Recuperación del cobre por flotación de los minerales sulfurados del yacimiento Sulfubamba Apurímac*, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco.

## PAGINAS WEB

- ✓ Sánchez, C. (05 de febrero de 2020). *¿Cómo citar una Página Web?*. Normas APA (7ma edición). <https://normas-apa.org/referencias/citar-pagina-web/> Recuperado de: <https://normas-apa.org/>
- ✓ [https://chile.pochteca.net/wp-content/uploads/2021/06/HT\\_MIBC.pdf](https://chile.pochteca.net/wp-content/uploads/2021/06/HT_MIBC.pdf) .
- ✓ <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/diarias/resultados/PD04701XD/html>.
- ✓ <https://www.monografias.com/trabajos103/reativos-flotacion/reativos-flotacion.html>.
- ✓ <https://Procesosbio.wikispaces.com>.

# ANEXOS

### ANEXO N° 01 Matriz de Consistencia

#### EVALUACIÓN DE LOS COLECTORES A-3418 Y Z-6 PARA RECUPERAR EL COBRE DE LOS MINERALES MIXTOS DE LA PLANTA DE BENEFICIOS JESÚS S.A.C- NAZCA

| PROBLEMA GENERAL  | OBJETIVO GENERAL   | HIPÓTESIS GENERAL  | VARIABLES | INDICADORES  | METODOLOGÍA         |   |
|---|--|--|-----------|--|---------------------|---|
| ¿Cuál será el reactivo colector que posibilite mayor recuperación de cobre a partir de los minerales mixtos de cobre a nivel de laboratorio?                | Evaluar los colectores A-3418 y Z-6; para aumentar la recuperación de cobre en el proceso de flotación a nivel de laboratorio.       | Disminuyendo la dosificación de A-3418 y aumentando el Z-6 se logra mayor recuperación de cobre en el proceso de flotación a nivel de laboratorio          |           | DEPENDIENTE<br>Recuperación de cobre total                   | Porcentaje de cobre | <b>Tipo de investigación tecnológica</b><br>tecnológica experimental.<br><b>Nivel de Investigación</b><br>descriptivo y explicativo causa - efecto.<br><b>Métodos de la investigación</b><br>Se aplicó el método de carácter experimental.<br><b>Diseño experimental</b><br>Es de 2 <sup>2</sup> con software MINITAB |
| PROBLEMAS ESPECÍFICOS   | OBJETIVOS ESPECÍFICOS  | HIPÓTESIS ESPECÍFICOS  |           |  |                     |   |
| ¿Las características mineralógicas que presentan los minerales mixtos de la planta de beneficio Jesús S.A.C. serán favorables para el proceso de flotación? | Determinar las características mineralógicas para la flotabilidad de los minerales mixtos de la planta de beneficio Jesús S.A.C.     | Las características mineralógicas del mineral mixto de la planta de beneficio Jesús S.A.C., son favorables para la flotabilidad y recuperación del cobre.  |           | INDEPENDIENTE<br>- Dosificación A-3418<br>- Dosificación Z-6 | - g/t               |   |
| ¿Cuál será la recuperación de cobre en el concentrado modificando la dosificación de los colectores Z-6 y A-3418?   | Lograr la dosificación adecuada de los colectores A-3418 y Z-6 para obtener la mejor recuperación posible.                           | La recuperación de cobre aumenta al disminuir la dosificación del colector A-3418 a la mitad y reemplazando lo quitado de A-3418 por Z-6.                  |           | INTERVINIENTES<br>- Ley del Mineral<br>- insolubles          |                     |   |
| ¿Cómo influye los beneficios-costos respecto al contenido metálico de cobre obtenido con el costo de los reactivos evaluados?                               | Realizar una evaluación económica con el contenido metálico de cobre con los costos de los reactivos evaluados                       | Al aumentar el contenido metálico y disminuir el consumo de A-3418, se logra aumentar las ganancias en el proceso.   |           |  |                     |   |
| ¿De qué modo se evaluará el comportamiento de las variables de operación para hallar un modelo matemático que explique el proceso de flotación?             | Evaluar las variables utilizando el software MINITAB para obtener el modelo matemático que explique este comportamiento del proceso. | Con el uso del software MINITAB, se halla el modelo matemático que explica el comportamiento de las variables más significativas del proceso de flotación. |           |  |                     |   |

## ANEXO N°02: Información Mineralógica.



**PLANTA DE BENEFICIO JESUS**

"Decenio De La Igualdad De Oportunidades Para Mujeres Y Hombres"  
"Año del Bicentenario del Perú"

Nazca, 24 de abril del 2021

Se autoriza la extracción de 25 Kg de muestra de mineral de cobre mixto para los Sres. Cristian Riquelme Gutierrez y Shiomara Torre Quispe de nuestra "PLANTA DE BENEFICIO JESUSUTO", para que puedan realizar pruebas metalúrgicas con el fin de trabajar su respectiva tesis.

El mineral concedido proviene de la salida de la chancadora de quijada, la muestra extraída pertenece al mineral de cobre mixto de la reserva Santa Lucia, que por entonces se estaba procesando en el turno día del 20/04/2021.

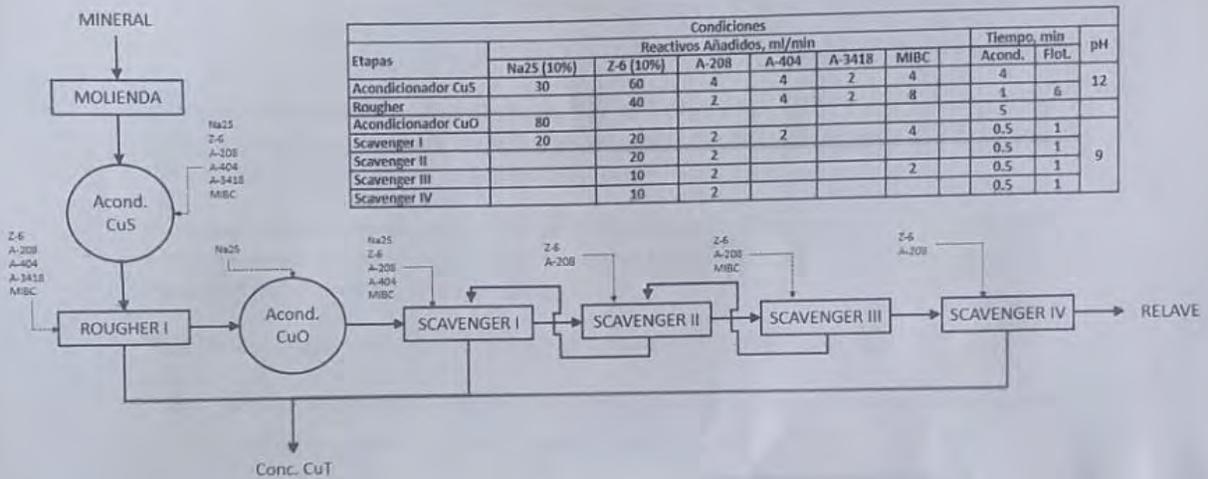
Toda la información requerida por los señores tesisistas se presentan a continuación:

- Mineral de cobre mixto de Santa Lucia presenta los siguientes minerales de cobre según análisis de microscopía óptica y de barrido electrónico:
  - Bornita
  - Calcopirita
  - Calcosita
  - Covelita
  - Crisocola
  - Cuprita
  - Malaquita
- Ley de cabeza, de 1.98% de CuT a 2.09% de CuT
- Porcentaje de Humedad, 1.4%
- Gravedad específica del mineral, de 3.8 a 4.0
- P80 Molienda, 120 micrones
- Tamaño de partícula overflow, 55% -200 Malla
- Densidad de rougher, 1.33 Kg/L
- Flowsheet de flotación y dosificación,



**PLANTA DE BENEFICIO JESUS**

"Decenio De La Igualdad De Oportunidades Para Mujeres Y Hombres"  
 "Año del Bicentenario del Perú"



- El sulfuro de sodio como el PAX se preparan a 10% de concentración por separado.
- Ley de Concentrado, a la fecha se culminó con la corrida del mineral de santa lucía, el informe de ensayo procedente de LABPERÚ arroja 24.32% de CuT en el CONCENTRADO.

De acuerdo a lo brindado, se espera que su proyecto de tesis sea beneficioso para la empresa, estaremos para brindarle el apoyo e información que requiera.

**PLANTA DE BENEFICIO JESUS**

*[Handwritten Signature]*  
**Manolo A. Esponda Preciado**  
 GERENTE GENERAL

## ANEXON° 03: Análisis químico planta, Densidades y costo de reactivos.



"Decenio De La Igualdad De Oportunidades Para Mujeres Y Hombres"  
"Año del Bicentenario del Perú"

Nazca, 15 diciembre del 2021

La información requerida por los señores tesisistas se presenta a continuación:

- Leyes plata, cobre y oro de mineral mixto de cobre, reservorio de Santa Lucía.

Fecha 20/04/2021

|                              | Ag (Oz/TN) | Cu (%) | Au (Oz/TN) |
|------------------------------|------------|--------|------------|
| <b>Cabeza</b>                | 1.76       | 2.03   | 0.17       |
| <b>Concentrado rougher</b>   | 14.12      | 29.18  | 2.12       |
| <b>Concentrado scavenger</b> | 11.15      | 15.68  | 1.09       |
| <b>Concentrado final</b>     | 12.88      | 23.64  | 1.69       |
| <b>Relave final</b>          | 0.84       | 0.24   | 0.04       |
| <b>Relave rougher</b>        | 5.48       | 5.62   | 0.50       |

- Ratio de concentración: 13.1
- Densidad de overflow, 1.50 Kg/L
- Densidad de underflow, 1.60 Kg/L
- Densidad de rougher, 1.33 Kg/L
- Densidad de acond. Scavenger, 1.22 Kg/L

Costos reactivos:

- A-3418 16.54 dólares / Kilogramo
- Z-6 4.14 dólares / Kilogramo

ANEXON° 04: Resultados de Análisis Químico.



**INSUMOS Y REACTIVOS QUIMICOS DEL PERU SAC**

**INFORME DE ENSAYO**

|                          |                             |
|--------------------------|-----------------------------|
| Análisis solicitado por: | CRISTIAN RAQUELME GUTIERREZ |
| Dirección:               |                             |
| Asunto:                  | ANÁLISIS QUÍMICO            |
| Instrucciones de Ensayo: | Tipo Cu /RECONOCIMIENTO     |
| Características:         | En sobre                    |
| Recepción de Muestras:   | Molida                      |
| Lugar de Recepción:      | Nazca                       |
| Cantidad Muestras:       | 13                          |
| Fecha de Recepción:      | 15/12/2021                  |
| Fecha de Ensayo:         | 15/12/2021                  |

| I.R.A     | CÓDIGO DE MUESTRA | ELEMENTOS |
|-----------|-------------------|-----------|
|           |                   | Cu T %    |
| 001-78/1  | CABEZA            | 2.03      |
| 001-78/2  | CONCENTRADO 1     | 22.18     |
| 001-78/3  | CONCENTRADO 2     | 21.91     |
| 001-78/4  | CONCENTRADO 3     | 22.97     |
| 001-78/5  | CONCENTRADO 4     | 21.65     |
| 001-78/6  | CONCENTRADO 5     | 22.55     |
| 001-78/7  | CONCENTRADO 6     | 22.48     |
| 001-78/8  | RELAVE 1          | 0.27      |
| 001-78/9  | RELAVE 2          | 0.24      |
| 001-78/10 | RELAVE 3          | 0.26      |
| 001-78/11 | RELAVE 4          | 0.26      |
| 001-78/12 | RELAVE 5          | 0.24      |
| 001-78/13 | RELAVE 6          | 0.24      |

**OBSERVACIONES:**

Elemento: Cu  
Método: Volumetrica

**Nota:**  
Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada.

Nazca, 15 de Diciembre del 2021

Diego Armando Bermúdez Marín  
INGENIERO QUÍMICO  
C.I.P. N° 262394

**ANEXON° 05: Planta de Beneficios Jesús S.A.C.**



**ANEXON° 06: Procedimientos en el laboratorio de procesamiento de minerales de la UNSAAC**

|  |  |
|--|--|
|  A wide-angle photograph of a laboratory room with large windows, various pieces of equipment, and a table with a green bucket and other items. | <p>Laboratorio de procesamiento de minerales de la UNSAAC.</p>                     |
|  A close-up view of a green cone crusher with a large metal bowl, processing a dark mineral sample.  | <p>Conminución de la muestra del mineral por chancadora cónica.</p>                |
|  A person in a white lab coat and mask is operating a piece of machinery, likely used for quartering and separating samples.                  | <p>Uso de herramientas para cuartear y separar las muestras en partes iguales.</p> |
|  A wooden table with several circular sieves or pans arranged on it, used for granulometric analysis.   | <p>Análisis granulométrico para un kilogramo de mineral.</p>                       |

|   |   |
|---|---|
|    | <p>Determinación de la gravedad específica del mineral por el método de la fiola.</p> |
|    | <p>Molino de bolas del laboratorio de procesamiento de minerales.</p>                 |
|  | <p>Flotador Denver del laboratorio de procesamiento de minerales.</p>                 |
|  | <p>Dosificación de reactivos con ayuda de micropipeta.</p>                            |

|  |  |
|--|--|
|   | <p>Colchón de espumas de la etapa Rougher</p>  |
|   | <p>Decantación del agua de los concentrados y relaves obtenidos luego de la flotación por espuma</p> |
|  | <p>Muestras secas listas para ser pesadas y pulverizadas</p>   |



Flotación de minerales por espuma.

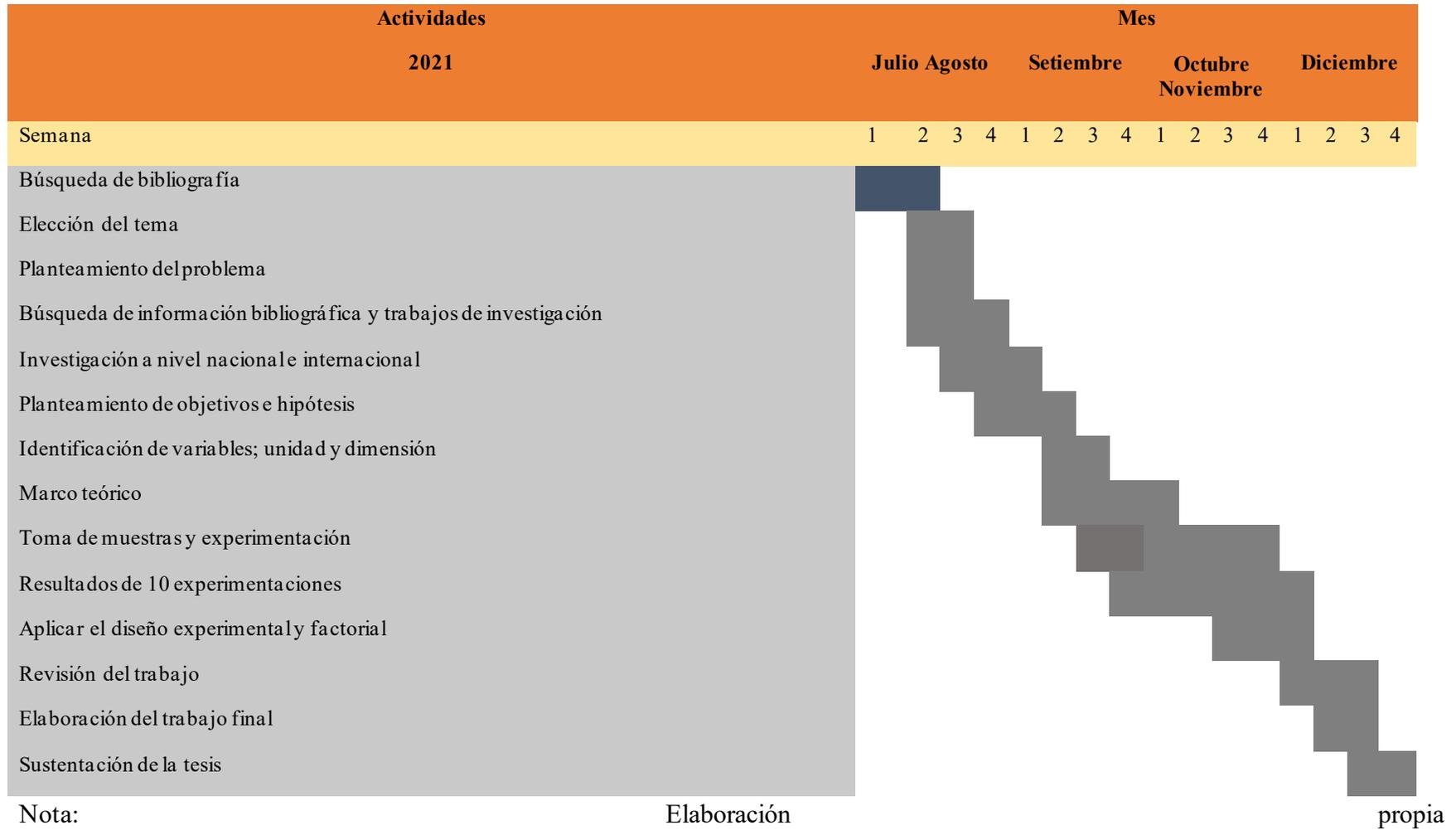


Muestras para análisis químico.

## ANEXO N° 07: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

**Tabla 30**

*Cronograma De Actividades*



## ANEXO N° 08: Presupuesto

**Tabla 31**

*Presupuesto*

| <b>ACTIVIDADES</b>        | <b>Costo en soles</b> |
|---------------------------|-----------------------|
| Compra de libros          | 600                   |
| Materiales y Herramientas | 450                   |
| Compra de reactivos       | 100                   |
| Consultoría               | 3400                  |
| Pasajes y estadía         | 800                   |
| Fotocopias                | 100                   |
| Aditivos                  | 400                   |
| Análisis Químico          | 2800                  |
| <b>Total</b>              | <b>8650</b>           |

Nota: Elaboración propia