

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGICA**



**T E S I S**

**Evaluación del tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal para el  
tratamiento de aguas ácidas de mina del proyecto minero Esperanza en San  
Pedro de Coris, Huancavelica – 2024**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Metalurgista**

**Autores:**

**Bach. Michel VARGAS GOMEZ**

**Bach. Eduardo QUISPE VILLARREAL**

**Asesor:**

**Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ**

**Cerro de Pasco – Perú – 2026**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGICA**



**T E S I S**

**Evaluación del tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal para el  
tratamiento de aguas ácidas de mina del proyecto minero Esperanza en San  
Pedro de Coris, Huancavelica – 2024**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA  
**PRESIDENTE**

---

Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO  
**MIEMBRO**

---

Mg. Edgar Yoni AIRE MENDOZA  
**MIEMBRO**



**Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Unidad de Investigación**

**INFORME DE ORIGINALIDAD N° 291-2025-UNDAC/UIFI**

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**Evaluación del tiempo de contacto y dosificación de lechada  
de cal para el tratamiento de aguas ácidas de mina del  
proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris,  
Huancavelica – 2024**

Apellidos y nombres del tesista

**Bach. Michel, VARGAS GOMEZ**

**Bach. Eduardo, QUISPE VILLARREAL**

Apellidos y nombres del Asesor:

**Mg. Manuel Antonio HUAMÁN DE LA CRUZ**

Escuela de Formación Profesional

**Ingeniería Metalúrgica**

Índice de Similitud

**15 %**

**APROBADO**

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes.

Cerro de Pasco, 23 de junio del 2025



Firmado digitalmente por PALOMINO  
ISIDRO Ruben Edgar FAU  
20154605046 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 23.06.2025 19:11:52 -05:00

## **DEDICATORIA**

Michel VARGAS GOMEZ:

A Dios, por brindarme las fuerzas y la guía constante a través de los años y en cada etapa de preparación hasta este momento.

A mis padres, por su apoyo incondicional y amor constante, por su dedicación a lo largo de los años y por enseñarme que el esfuerzo tiene sus recompensas, y que el respeto y la humildad pueden cambiar el mundo.

A mis hermanos, por exigirme siempre lo mejor de mí.

A mi compañera de vida, por hacerme entender que, por amor, se puede lograr todo.

A mi hijo, por enseñarme que en la vida siempre se aprende, sobre todo con paciencia y amor.

Eduardo QUISPE VILLARREAL:

A mi familia, tenerlos a mi lado es un apoyo continuo e inestimable; son lo mejor que tengo.

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos agradecer a la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión por la formación académica brindada; a la Escuela de Formación Profesional de Metalurgia, que nos enseñó a valorar y honrar la profesión; y a los docentes de la escuela, cuya paciencia, exigencia y vocación han contribuido con nuestro crecimiento como profesionales. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento al personal del proyecto minero Esperanza por el valioso apoyo técnico y logístico proporcionado durante la ejecución de las pruebas experimentales.

## RESUMEN

Las aguas ácidas generadas por actividades mineras del proyecto Esperanza presentan un pH bajo y altos niveles de metales pesados, lo que representa un riesgo ambiental para la comunidad aledaña, por lo cual se planteó el problema de: ¿Cómo evaluar el tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal para el tratamiento de agua ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024?

El objetivo es evaluar el tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024, específicamente de la poza P1-E.

El tipo de investigación es aplicada y nivel analítico, empleándose un método de investigación deductivo e inductivo, con un diseño experimental. Se utilizó una muestra representativa de 1,5 m<sup>3</sup> de agua ácida donde la población fue la poza P1-E de una capacidad de 250 m<sup>3</sup>, que presentaba características específicas: un pH inicial de 3,5; sólidos totales en suspensión (TSS) de 50 mg/L; manganeso a 37 mg/L; zinc a 6,64 mg/L y hierro disuelto a 24 mg/L. El tratamiento de aguas ácidas en el proyecto minero implicó: neutralizar el pH y remover metales pesados para estar alineados con las regulaciones ambientales. Se determinó la ratio el cual fue de 0,51 kg/m<sup>3</sup> de lechada de cal al 15% en peso para alcanzar un pH de 10,5. El floculante MT-6506 dosificado a 1 ppm logró remover el 99,25% de Zn(t) y el 98,94% de Fe(d). Además, las pruebas de alcalinización a pH 10,7 donde se logró una remoción del 99,72% de Mn. Finalmente, las pruebas de acidificación requirieron un consumo de 66,31 g/m<sup>3</sup> para ajustar el pH a 7,8.

**Palabras clave:** TSS, aguas ácidas, lechada de cal, ratio, remoción, ppm, neutralizar.

## ABSTRACT

The acidic water generated by mining activities in the Esperanza project has a low pH and high levels of heavy metals, which represents an environmental risk to the surrounding community, so the problem of how to evaluate the contact time and dosage of the lime slurry for the treatment of acid mine water in the Esperanza mining project in San Pedro de Coris, Huancavelica - 2024 was posed.

The objective of the study was to evaluate the contact time and dosage of the lime slurry in the treatment of acid mine water in the Esperanza mining project in San Pedro de Coris, Huancavelica - 2024, specifically in the P1-E pit of the Esperanza mining project.

The type of research was applied and analytical level, using a deductive and inductive research method, with an experimental design. A representative sample of 1,5 m<sup>3</sup> of acidic water was used, where the population was the P1-E pond with a capacity of 250 m<sup>3</sup>, which presented specific characteristics: an initial pH of 3,5, total suspended solids (TSS) of 50 mg/L, manganese at 37 mg/L, zinc at 6,64 mg/L and dissolved iron at 24 mg/L.

The treatment of acid water in the mining project involved: neutralizing the pH, removing heavy metals, in order to be in line with environmental regulations. After the neutralization, precipitation and flocculation stage, the ratio was determined to be 0,51 kg/m<sup>3</sup> of lime slurry at 15% by weight to achieve a pH of 10,5. The MT-6506 flocculant dosed at 1 ppm was able to remove 99,25% of Zn(t) and 98,94% of Fe(d). In addition, alkalization tests at pH 10,7 achieved a removal of 99,72% of Mn. Finally, the acidification tests required a consumption of 66,31 g/m<sup>3</sup> to adjust the pH to 7,8.

**Keywords:** TSS, acidic water, lime slurry, ratio, removal, ppm, neutralize.

## INTRODUCCIÓN

Las aguas ácidas de mina (AMD, por sus siglas en inglés) son un problema ambiental significativo en muchas regiones mineras en el interior del país. Estas aguas se caracterizan por tener un pH bajo, altas concentraciones de metales disueltos y sulfatos, y pueden tener un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos si no se tratan adecuadamente.

Para abordar este desafío, se han desarrollado diversos métodos de tratamiento, incluyendo procesos pasivos y activos. Los sistemas pasivos, aprovechan procesos naturales para neutralizar la acidez y precipitar los metales. Por otro lado, los sistemas activos utilizan equipos mecánicos y químicos para acelerar el tratamiento.

En este contexto, la realización de pruebas piloto es fundamental para evaluar la eficacia y viabilidad de los diferentes métodos de tratamiento en condiciones específicas.

Pruebas a nivel pilotaje permite probar el proceso a escala reducida antes de implementarlo a gran escala, optimizando el diseño y minimizando los riesgos.

Esta investigación presenta pruebas de tratamiento de aguas ácidas de mina en unas pruebas a nivel de pilotaje, destacando los objetivos como, la metodología y los beneficios de este enfoque, el cual está estructurado de la siguiente manera:

**Capítulo I:** Presenta el problema de investigación, establece los objetivos generales y específicos, destaca la importancia de la investigación y delimita sus alcances.

**Capítulo II:** En este capítulo está conformado por los antecedentes relacionados con la investigación, marco teórico de acuerdo a las variables de estudio y sus indicadores, definición de términos, formulación de hipótesis, identificación de variables y operacionalización.

**Capítulo III:** Pertenece a la metodología y técnicas de investigación, detalle del tipo, nivel, métodos y diseño de la investigación. Se define la población y muestra del estudio presente, el tratamiento estadístico, selección y validación de los instrumentos de investigación.

**Capítulo IV:** Presenta los resultados de la investigación, se realiza el tratamiento

estadístico e interpretación de los datos recopilados, demuestra las hipótesis planteadas y presenta la discusión de los resultados.

## ÍNDICE

### Página.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

|        |                                                   |   |
|--------|---------------------------------------------------|---|
| 1.1.   | Identificación y determinación del problema ..... | 1 |
| 1.2.   | Delimitación de la investigación.....             | 3 |
| 1.2.1. | Delimitación espacial .....                       | 3 |
| 1.2.2. | Delimitación teórica .....                        | 3 |
| 1.3.   | Formulación del problema .....                    | 3 |
| 1.3.1. | Problema general.....                             | 3 |
| 1.3.2. | Problemas específicos .....                       | 3 |
| 1.4.   | Formulación de objetivos.....                     | 4 |
| 1.4.1. | Objetivo general .....                            | 4 |
| 1.4.2. | Objetivos específicos.....                        | 4 |
| 1.5.   | Justificación de la investigación .....           | 4 |
| 1.5.1. | Justificación teórica.....                        | 4 |
| 1.5.2. | Justificación ambiental .....                     | 4 |

|      |                                       |   |
|------|---------------------------------------|---|
| 1.6. | Limitaciones de la investigación..... | 5 |
|------|---------------------------------------|---|

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

|         |                                                                             |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.    | Antecedentes de estudio.....                                                | 6  |
| 2.1.1.  | Antecedentes internacionales .....                                          | 6  |
| 2.1.2.  | Antecedentes nacionales .....                                               | 7  |
| 2.1.3.  | Antecedentes regionales.....                                                | 9  |
| 2.2.    | Bases teóricas – científicas .....                                          | 11 |
| 2.2.1.  | Drenaje ácido de mina.....                                                  | 11 |
| 2.2.2.  | Formación del drenaje ácido de mina .....                                   | 12 |
| 2.2.3.  | Reacciones químicas relacionados con las aguas ácidas de mina .....         | 13 |
| 2.2.4.  | Tratamiento químico activo de aguas ácidas de mina.....                     | 14 |
| 2.2.5.  | Potencial de hidrogeno (pH) en aguas ácidas de mina.....                    | 15 |
| 2.2.6.  | Empleo de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina .....               | 16 |
| 2.2.7.  | Proceso de coagulación en el tratamiento de aguas ácidas .....              | 17 |
| 2.2.8.  | Proceso de clarificación en el tratamiento de aguas ácidas.....             | 18 |
| 2.2.9.  | Proceso de sedimentación de coágulos en el tratamiento de aguas ácidas..... | 19 |
| 2.2.10. | Límites Máximos Permisibles (LMP) .....                                     | 19 |
| 2.2.11. | Estándares de Calidad Ambiental (ECA).....                                  | 20 |
| 2.3.    | Definición de términos básicos.....                                         | 21 |
| 2.4.    | Formulación de hipótesis .....                                              | 23 |
| 2.4.1.  | Hipótesis general .....                                                     | 23 |
| 2.4.2.  | Hipótesis específicas .....                                                 | 24 |
| 2.5.    | Identificación de variables .....                                           | 24 |
| 2.5.1.  | Variables independientes.....                                               | 24 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.2. Variables dependientes.....                           | 24 |
| 2.6. Definición operacional de variables e indicadores ..... | 25 |

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Tipo de investigación.....                                                       | 26 |
| 3.2. Nivel de investigación.....                                                      | 26 |
| 3.3. Métodos de investigación .....                                                   | 27 |
| 3.4. Diseño de investigación .....                                                    | 27 |
| 3.5. Población y muestra.....                                                         | 29 |
| 3.5.1. Población.....                                                                 | 29 |
| 3.5.2. Muestra.....                                                                   | 29 |
| 3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....                            | 30 |
| 3.6.1. Técnicas de recolección de datos .....                                         | 30 |
| 3.6.2. Instrumentos de recolección de datos.....                                      | 31 |
| 3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación ..... | 32 |
| 3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....                               | 33 |
| 3.9. Tratamiento estadístico .....                                                    | 34 |
| 3.10. Orientación ética filosófica y epistémica.....                                  | 35 |
| 3.10.1. Orientación ética .....                                                       | 35 |
| 3.10.2. Orientación filosófica.....                                                   | 35 |
| 3.10.3. Orientación epistemológica.....                                               | 36 |

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 4.1. Descripción del trabajo de campo.....    | 37 |
| 4.1.1. Descripción del proceso operativo..... | 37 |

|        |                                                                                                              |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.2. | Análisis Granulométrico y % de Cal Útil de Mycal.....                                                        | 39 |
| 4.1.3. | Preparación de reactivos.....                                                                                | 40 |
| 4.1.4. | Pruebas de Consumo de lechada de cal y Cinética de Neutralización .....                                      | 41 |
| 4.1.5. | Pruebas de Selección de Floculante – Laboratorio .....                                                       | 43 |
| 4.1.6. | Pruebas de Optimización de Consumo de Floculante .....                                                       | 44 |
| 4.1.7. | Etapas de Alcalinización.....                                                                                | 46 |
| 4.1.8. | Etapas de Clarificación .....                                                                                | 47 |
| 4.1.9. | Pruebas de acidificación con CO <sub>2</sub> .....                                                           | 49 |
| 4.2.   | Presentación, análisis e interpretación de resultados .....                                                  | 52 |
| 4.2.1. | Resultados de las pruebas preliminares in situ .....                                                         | 52 |
| 4.2.2. | Análisis de Cabeza – Alimentación .....                                                                      | 53 |
| 4.2.3. | Influencia de la dosificación de lechada de cal en el tratamiento de aguas<br>ácidas.....                    | 55 |
| 4.2.4. | Influencia del tiempo de contacto en el tratamiento de aguas ácidas.....                                     | 56 |
| 4.2.5. | Interacción de dosificación de lecha de cal vs tiempo de contacto en el<br>tratamiento de aguas ácidas ..... | 57 |
| 4.3.   | Prueba de hipótesis .....                                                                                    | 61 |
| 4.4.   | Discusión de resultados.....                                                                                 | 65 |

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                           | Página |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Tabla 1.</b> <i>Límites máximos permisibles</i> .....                                                  | 20     |
| <b>Tabla 2.</b> <i>Categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales.</i> .....                        | 21     |
| <b>Tabla 3.</b> <i>Variables e indicadores</i> .....                                                      | 25     |
| <b>Tabla 4.</b> <i>Diagrama de procesos de pruebas</i> .....                                              | 28     |
| <b>Tabla 5.</b> <i>Análisis granulométrico de cal de Mycal</i> .....                                      | 40     |
| <b>Tabla 6.</b> <i>Cinética de alcalinización con distintos agentes neutralizantes</i> .....              | 42     |
| <b>Tabla 7.</b> <i>Evaluación de floculantes</i> .....                                                    | 43     |
| <b>Tabla 8.</b> <i>Optimización de consumo de floculante.</i> .....                                       | 45     |
| <b>Tabla 9.</b> <i>Condiciones operativas de pruebas piloto por batch.</i> .....                          | 47     |
| <b>Tabla 10.</b> <i>Resultados de análisis químico de solución alcalinizados con cal</i> .....            | 48     |
| <b>Tabla 11.</b> <i>Condiciones de pruebas de acidificación en soluciones neutralizadas.</i> .....        | 50     |
| <b>Tabla 12.</b> <i>Resultados de análisis químico de muestras acidificadas por CO<sub>2</sub>.</i> ..... | 51     |
| <b>Tabla 13.</b> <i>Resultados de análisis químico – P1-E comparados con LMP.</i> .....                   | 53     |
| <b>Tabla 14.</b> <i>Resultados de análisis químico de cabeza.</i> .....                                   | 54     |
| <b>Tabla 15.</b> <i>Interacción de tiempo de contacto vs dosificación de lechada de cal</i> .....         | 58     |
| <b>Tabla 16.</b> <i>Análisis de varianza</i> .....                                                        | 62     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                      | <b>Página</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Figura 1.</b> <i>Poza P1-E</i> .....                                                                                                              | 29            |
| <b>Figura 2.</b> <i>Muestreo aleatorio simple</i> .....                                                                                              | 30            |
| <b>Figura 3.</b> <i>Diagrama de flujo de tratamiento de aguas ácidas - proyecto minero Esperanza</i> .....                                           | 39            |
| <b>Figura 4.</b> <i>Preparación de lechada de cal al 15%</i> .....                                                                                   | 41            |
| <b>Figura 5.</b> <i>Cinética de consumo de agente neutralizante a pH alcanzado</i> .....                                                             | 42            |
| <b>Figura 6.</b> <i>Turbidez vs tiempo de sedimentación</i> .....                                                                                    | 44            |
| <b>Figura 7.</b> <i>Optimización del consumo de floculante MT-6506</i> .....                                                                         | 45            |
| <b>Figura 8.</b> <i>Optimización del consumo de Magnafloc 1011</i> . ....                                                                            | 46            |
| <b>Figura 9.</b> <i>Cinética de reacción de pH con CO<sub>2</sub> en un tiempo de 10 minutos</i> .....                                               | 52            |
| <b>Figura 10.</b> <i>Gráfica de porcentaje de remoción de metales vs. dosificación de Ca(OH)<sub>2</sub></i> .....                                   | 56            |
| <b>Figura 11.</b> <i>Gráfica de porcentaje de remoción de metales vs. tiempo de contacto</i> . ....                                                  | 57            |
| <b>Figura 12.</b> <i>Gráfica de porcentaje de remoción de metales vs. interacción del tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal</i> . .... | 58            |
| <b>Figura 13.</b> <i>Diagrama de Pareto</i> .....                                                                                                    | 59            |
| <b>Figura 14.</b> <i>Comportamiento de Hierro en la Planta Piloto</i> .....                                                                          | 60            |
| <b>Figura 15.</b> <i>Comportamiento del Zinc en la Planta Piloto</i> .....                                                                           | 60            |
| <b>Figura 16.</b> <i>Comportamiento de Manganeseo en la Planta Piloto</i> .....                                                                      | 61            |
| <b>Figura 17.</b> <i>Gráfica de distribución</i> .....                                                                                               | 63            |
| <b>Figura 18.</b> <i>Informe de resumen del tratamiento de aguas ácidas de mina</i> . ....                                                           | 64            |

## CAPÍTULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Identificación y determinación del problema

El proyecto minero Esperanza, ubicado en la región de Huancavelica, se centró en la explotación y extracción de minerales polimetálicos, destacando la presencia de plata como mineral valioso. Globalmente, la generación de aguas ácidas de mina es un problema ambiental significativo asociado a la minería, que afecta la calidad del agua y la salud de los ecosistemas. Según estudios de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), se estima que más del 40% de los cuerpos de agua de áreas mineras a nivel mundial están contaminados por drenaje ácido de mina (EPA, 2019).

En el Perú, la situación es igualmente preocupante. Como uno de los principales productores mundiales de minerales, enfrenta graves desafíos ambientales debido a la contaminación por drenaje ácido de minas. Según el Ministerio del Ambiente (MINAM), es aproximado que el 70% de las aguas superficiales en las regiones mineras tienen niveles elevados de acidez y metales pesados (MINAM, 2021). La contaminación por aguas **ácidas** no solo afecta la biodiversidad local sino también la

salud de las comunidades cercanas, las cuales dependen de los recursos hídricos para su consumo y actividades agrícolas.

El proyecto minero Esperanza, situado en la región de San Pedro de Coris, es un claro ejemplo de este desafío. Las actividades mineras requieren agua para su operación, lo que generaba contacto con sulfuros presentes en los minerales explotables, siendo la pirita el sulfuro principal responsable de la generación de aguas ácidas de mina que presentaban un pH bajo de 3,60 a 5,78 y altos niveles de metales pesados (TSS: 5 a 17 mg/l). El proyecto implementó una adecuada captación de las aguas ácidas generadas en los frentes de explotación de la mina subterránea, las cuales son almacenadas en la poza P1-E, evitando así el contacto con los cuerpos de aguas presente alrededor de la zona, permitiendo realizar las operaciones de manera sostenible. **Sin embargo, el problema que se presenta es el colapso de la capacidad de almacenamiento de la poza, debido al bombeo continuo de aguas ácidas de mina. Por este motivo, se tendrá que verter las aguas ácidas hacia el cuerpo receptor, riego de vegetales o bebida de animales. No obstante, para realizar el vertimiento se deben cumplir parámetros y estándares de calidad establecidos por el MINAM.**

Para abordar esta problemática, se buscó realizar el tratamiento de las aguas ácidas captadas con el fin de cumplir con las normativas ambientales. En este contexto, el proyecto minero Esperanza se propuso:

- Realizar la caracterización de las aguas ácidas.
- Determinar la tecnología adecuada para el tratamiento de dichas aguas.

El desarrollo del proyecto se enfocó en la innovación. Para ello se implementó tratamientos para este efluente minero y se consolidó su compromiso con las normativas ambientales para la descarga de efluentes. Por ese motivo se llevó a cabo

una investigación para tratar las aguas ácidas utilizando un agente neutralizante como la lechada de cal y controlando el tiempo de contacto necesario para la precipitación de metales presentes, sulfatos, TSS, entre otros parámetros. Se controló los diversos niveles durante el desarrollo de la investigación. El fin último fue asegurar que estas aguas tratadas cumplieran con los estándares de calidad establecidos para su vertimiento.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

### **1.2.1. Delimitación espacial**

La delimitación espacial se trata de la ubicación del lugar de origen de las aguas ácidas de mina, para el desarrollo del trabajo de investigación el cual es:

- Distrito : San Pedro de Coris
- Provincia : Churcampá
- Departamento : Huancavelica

### **1.2.2. Delimitación teórica**

El trabajo de investigación desarrollado aborda sobre el tratamiento de aguas ácidas de mina, de tal manera el marco teórico está enfocado a las variables de estudio.

## **1.3. Formulación del problema**

### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo evaluar el tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal para el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica–2024?

### **1.3.2. Problemas específicos**

- a. ¿Cómo el tiempo de contacto de lechada de cal influye en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica–2024?

- b. ¿Cómo la dosificación de lechada de cal influye en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024?

## **1.4. Formulación de objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar el tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a. Determinar la dosificación de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.
- b. Determinar el tiempo de contacto de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.

## **1.5. Justificación de la investigación**

### **1.5.1. Justificación teórica**

Los resultados de las investigaciones experimentales permiten el diseño de una ingeniería de detalle, siendo este el siguiente paso para poder realizar la construcción de una planta, en este caso, la construcción de una planta de tratamiento de aguas ácidas de mina (PTAAM) con fines de tratar sus efluentes mineros.

### **1.5.2. Justificación ambiental**

La generación de aguas ácidas de minas es el producto de un proceso que cambia las características físicas y químicas, generándose de manera muy frecuente, el cual

daña el medio ambiente, generando el descenso del pH, esto sucede cuando estas aguas tienen contacto otros cuerpos de aguas.

El tratamiento de estos efluentes es una forma de evitar este problema ambiental y, por otra parte, llevar el agua a un estándar de calidad ambiental para un determinado uso, el cual puede ser riego de vegetales o bebida de animales, etc., y realizar una minería responsable.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación**

Las limitaciones que presentó en la investigación fueron los análisis de las muestras tratadas de las aguas ácidas de mina, así como de equipo y tecnología. La investigación en tratamiento de aguas requiere el uso de equipos especializados como filtros, reactivos químicos, equipos de medición de pH, materiales e instrumentos. Estos equipos suelen ser costosos y representaron una limitación para llevar a cabo la investigación.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

Zamora & Trujillo (2016) en su investigación “Planta de Tratamiento en Interior Mina de las Aguas Ácidas de la Mina San José-Oruro-Bolivia”, estudió la mina San José ubicada en la ciudad de Oruro. La mina genera drenaje ácido con un pH de 1,2 a 2,5, que es bombeado a una tasa de 8 litros por segundo sin tratamiento y vertido al medio ambiente. Estas aguas ácidas se desembocan en el lago Urú-Urú. La carga anual de metales disueltos es de 1 kg de Cd, 11 kg de Cu, 761 kg de Fe, 14 kg de Pb, 13 kg de As, 0,3 kg de Sb y 22 kg de Zn.

El objetivo del presente trabajo de investigación es estudiar técnica, económica, ambiental y socialmente las alternativas de tratamiento de las aguas ácidas de la Mina San José a partir de pruebas en laboratorio y planta piloto. Las alternativas estudiadas fueron Evaporación-Cristalización, Neutralización-Precipitación con cal en superficie; Drenes de Caliza Anoxicos y Neutralización-Precipitación con cal en interior mina. Los

resultados de la evaluación técnica, económica, ambiental y social concluyeron que la última alternativa es la más adecuada.

El estanque de tratamiento y separación sólido/líquido en el interior de la mina consta de una galería abandonada de 104 m de largo, 2 m de ancho y una altura de 1,8 m. Este estanque permitirá el tratamiento de 691,2 m<sup>3</sup>/día de agua ácida. El consumo de cal como lechada requerida es de 6,9 toneladas por día. Las aguas de rebose del estanque de tratamiento serán bombeadas al exterior a un pH de descarga de 6,7, cumpliendo con la acidez de descarga y, en gran medida, los límites permisibles de descarga de metales pesados. La descarga de los lodos generados será discontinua mediante una bomba lamera y se dispondrán en los rajes abandonados, a 150 m del punto de descarga del estanque de tratamiento.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Rabanal Valenza (2021) en su tesis intitulado “Operación en la planta de tratamiento de aguas ácidas en la UM Anabi S.A.C.” tuvo como propósito describir la operación de remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina a través de la neutralización activo con lechada de cal y dosificación de floculante vital para sedimentar los lodos formados, de la Unidad Minera Anabi S.A.C, derivados del botadero y tajo.

El modelo descrito empieza con el ingreso del agua ácida derivada del tajo y botadero, almacenados en un pozo de recolección, que posteriormente será derivado a la planta mediante el canal que cuantifica el caudal y el nivel de pH. Al término de dicho proceso, el agua ácida es dirigida al reactor; luego, es guiada por una tubería puesta en la parte superior, ingresando a la elaboración de lechada de cal, lugar donde se neutraliza el agua ácida hasta lograr un valor del pH que oscila entre 10 y 10,5, logrando formar hidróxidos de hierro, cobre. En siguiente reactor se añade floculante,

con el objetivo de remover el factor de metales pesados en el efluente. Los agitadores son para garantizar la homogenización del proceso y el tiempo de residencia de la misma cuando pasa a los reactores siguientes.

Como conclusiones fue que la ratio de cal fue de  $0,74 - 1,85 \text{ kg/m}^3$ . El floculante fue Chemlok 20919 preparado al 0,1%. El tiempo de residencia de la solución en las ácidas pruebas fue de 60 minutos en la etapa de neutralización y de 5 minutos en la etapa de floculación.

España Chamorro (2022) en su tesis “Remoción de metales en efluentes de relaveras para alcanzar agua de categoría 3 de la provincia de Caravelí 2020”, señala que los efluentes de las relaveras son motivo de gran preocupación debido a los impactos negativos que pueden tener en el medio ambiente y los ecosistemas, en algunos casos por un tratamiento y/o manejo ambiental inadecuado. Ante esta problemática, la investigación tuvo como objetivo generar conocimientos locales que contribuyan a encontrar soluciones a estos problemas ambientales.

La tesis se desarrolló con el objetivo de determinar el efecto que tiene la remoción de metales en los efluentes de relaveras para lograr que el agua alcance la categoría 3 en la provincia de Caravelí, en 2020. Se utilizó una metodología analítica deductiva, siendo una investigación aplicada de nivel explicativo con un diseño preexperimental.

La población de estudio fueron los efluentes de relavera de Caravelí. Los resultados mostraron que estos efluentes presentaban concentraciones iniciales de cobre, zinc y plomo superiores a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para la categoría 3. Al aplicar un tratamiento de neutralización con cal a un pH de 8,5, se logró reducir las concentraciones de cobre, zinc, hierro y plomo a valores inferiores a los requeridos en el D.S. 004-2017-MINAM, Estándar de Calidad para Agua Categoría 3,

y en el D.S. 010-2010-MINAM, Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero- metalúrgicas.

En conclusión, la tesis estableció que la remoción de metales en efluentes de relaveras tiene un efecto significativo para lograr que el agua alcance la categoría 3 en la provincia de Caravelí en 2020.

### **2.1.3. Antecedentes regionales**

Mateo Cruz (2022), en su tesis intitulado “Reducción de manganeso mediante la dosificación de lechada de cal en el agua de mina de la Unidad Minera Huaron”, evaluó la reducción de manganeso presente en el agua de mina de la unidad minera Huaron, mediante la dosificación de lechada de cal en la Planta de Tratamiento de Aguas de mina – PTAM, para cumplimiento del Plan Integral para la Adecuación e Implementación a los Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas y a los Estándares de Calidad Ambiental, en cumplimiento de los dispositivos y normas emitidas por el Ministerio de Energía y Minas.

Presentó como objetivos “evaluar qué la reducción de manganeso se logre mediante la dosificación de lechada de cal en el agua de mina de la Unidad Minera Huaron – 2019”, “determinar el pH apropiado para la reducción de manganeso en el agua de mina” y “determinar el impacto de la prueba sobre la concentración de manganeso en el cuerpo receptor (río San José)”. Utilizo los métodos: analítico - inductivo de tipo: experimental cuantitativo y diseño: experimental basado en el Plan de trabajo a nivel piloto que se elaboró en la unidad, presento el método aplicado de acuerdo al tratamiento del agua de mina fue la reducción de Mn mediante la alcalinización con lechada de cal. Como resultados se logró la reducción de manganeso, dando como resultado la concentración de manganeso promedio en el agua sin tratar de

46,07 ppm y en el agua tratada 0,098 ppm. Concluyó que la dosificación de lechada de cal tiene efectos positivos en la reducción de manganeso en el agua de mina de la unidad Huarón 2019; el cual fue de un 99,76% promedio, concentración de Mn = 0,098 ppm promedio, pH de 10,5 a más que es el óptimo y un caudal de dosificación de lechada de cal de 3.3 l/seg (que equivale a 165 g/seg de cal).

Tucto Ambrosio (2019) en su tesis intitulado “Optimización del consumo del floculante para el tratamiento del aluminio y manganeso del agua de mina Unidad Minera Orcopampa - Buenaventura - Arequipa, 2019”, se realizó con los objetivos de determinar la optimización del consumo del floculante para el tratamiento del aluminio y manganeso del agua de mina, evaluar y determinar la concentración del floculante para el tratamiento del aluminio y manganeso, y determinar el valor del pH para el tratamiento del aluminio y manganeso del agua de mina a partir del efluente Nazareno de la Unidad minera Orcopampa, Compañía de mina buenaventura.

Para cumplir con los objetivos del presente estudio se empleó la investigación de tipo analítico y explicativo. El diseño utilizado para evaluar las distintas concentraciones de floculante para el tratamiento del Aluminio y Manganeso del agua de mina es el diseño experimental.

Iniciaron con la homogenización y toma de muestras representativas del efluente de su muestra que se realizaron en una serie de pruebas en diferentes etapas, empezando por neutralización para precipitar el aluminio donde el pH es llevado a (6,5–7), donde no se usó coagulante por la presencia de sólidos en suspensión (SST), en una cantidad considerable y nuevamente alcalinizar a un pH mayor (10,5–11) para dosificar coagulante teniendo un tiempo de acondicionamiento y aplicar el floculante a diferentes dosificaciones de 0,3 ppm, 0,5 ppm y 0,8 ppm.

Los resultados en la disminución de la turbidez de las aguas ácidas de la unidad minera Orcopampa: se utilizó la lechada de cal al 10 %, a una revolución de 100 rpm; coagulante, el cloruro férrico a 0,05 ml/L, a una revolución de 100 rpm; y floculante, el Magnafloc 1011 a una dosificación de 0,5 ppm a una revolución de 50 rpm para no romper los flóculos. La turbidez de la muestra inicial fue 250 NTU y la turbidez final para 5 minutos es 0,45 NTU.

## **2.2. Bases teóricas – científicas**

### **2.2.1. Drenaje ácido de mina**

El drenaje ácido de minas (DAM) es la formación de aguas ácidas, ricas en sulfatos y metales pesados, resultado de la oxidación de sulfuros minerales en contacto con el oxígeno y el agua. Este proceso puede persistir durante décadas o incluso cientos de años, siendo una importante fuente de contaminación para aguas superficiales y subterráneas. El DAM puede ser clasificado en Drenajes Mineros Ácidos (DMA) con pH menor a 6 y altos contenidos de sulfatos y metales disueltos, y Drenajes Mineros Neutros (DMN) con pH mayor a 6 y concentración elevada de metales en solución cercanos al neutro.

El drenaje ácido de minas (DAM) se produce principalmente por la oxidación de minerales sulfurosos cuando entran en contacto con el aire y el agua. Este proceso puede ser resultado de la oxidación directa, donde el sulfuro mineral reacciona con oxígeno y agua para formar sulfatos y generar acidez. Además, la oxidación biótica, que implica la acción de bacterias que aceleran la oxidación de los sulfuros, también contribuye a la formación del DAM.

La generación del potencial ácido en el DAM se refiere a la predicción y caracterización de la generación de aguas ácidas en las minas, considerando factores como la explotación minera y diversas fuentes generadoras de drenaje ácido.

Para prevenir y controlar el DAM, es fundamental definir el tipo de drenaje presente en un depósito mineral, modelar la generación del potencial ácido, aplicar alternativas para prevención, control y tratamiento, realizar monitoreo y vigilancia, gestionar el riesgo y seguir buenas prácticas. (Fernandez et al. 2001, pág. 125)

### **2.2.2. Formación del drenaje ácido de mina**

El drenaje ácido de mina se forma por la oxidación natural de minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y al agua. Estos drenajes son caracterizados por tener un bajo pH y contener una gran cantidad de sólidos en suspensión con un alto contenido en sulfato y metales pesados, como hierro, aluminio, manganeso y zinc.

Su formación conlleva la generación de aguas ácidas, ricas en sulfatos y metales pesados, lo que representa una de las principales problemáticas ambientales asociadas a la industria minera.

La formación de aguas ácidas en minas, que contienen hierro (Fe), manganeso (Mn) y aluminio (Al), se debe a la oxidación de sulfuros presentes en los minerales. Esta oxidación, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana, conduce a la generación de aguas con pH menor a 4,5 y altas concentraciones de carga metálica, lo que las hace ácidas. La presencia de Fe, Al y Mn disueltos en estas aguas contribuye a su acidez a través de reacciones de oxidación e hidrólisis. El tratamiento de estas aguas ácidas de mina requiere la determinación de curvas de acidez del agua para ajustar la eficiencia del sistema de tratamiento, y la elección de un sistema de tratamiento adecuado depende de la caracterización de la acidez protónica y mineral del agua. Además, se realizan ensayos de neutralización en laboratorio para determinar los rangos de movilización de los elementos mayoritarios presentes en las aguas ácidas de mina y el consumo de reactivos de neutralización. El proceso de neutralización busca retirar del agua los contenidos de Fe, Al y Zn en forma de fases sólidas para reducir la acidez

y los costos de tratamiento. La generación de aguas ácidas de mina también está influenciada por factores como el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución de la piritita en los minerales presentes en la mina. (Fernandez Rubio , Baquero Ubeda, Lorca Fernández, & Verdejo Serrano, 2001, pág. 78)

### **2.2.3. Reacciones químicas relacionados con las aguas ácidas de mina**

En el contexto de las aguas ácidas de mina, los diferentes metales pesados presentes pueden reaccionar de diversas formas. Por ejemplo, los sulfuros de metales como plomo, zinc o cobre suelen ser menos reactivos que los sulfuros de hierro debido a la mayor estabilidad de su estructura. Esta diferencia en la reactividad tiene implicaciones en el tratamiento de aguas ácidas, ya que permite optimizar el uso de recursos como la cal en el proceso de neutralización y facilita la recuperación de metales de los lodos resultantes, lo que contribuye a hacer los tratamientos más eficientes, económicos y ambientalmente controlados. (Aduvire, 2006, pág. 17)

En el caso específico del tratamiento físico-químico de drenajes ácidos de mina, se han identificado diferentes metales pesados presentes en estas aguas, como arsénico, cadmio, cobre, hierro, plomo y zinc. Estos metales pueden estar disueltos en concentraciones que superan los límites permisibles, lo que representa un desafío ambiental significativo. Por ejemplo, la precipitación de cadmio, zinc y hierro ocurre generalmente a pH por encima de 8,5 en estos procesos de tratamiento, las reacciones químicas de los diferentes metales pesados relacionados con las aguas ácidas de mina varían en función de su composición y reactividad. La comprensión de estas interacciones es crucial para diseñar estrategias efectivas de tratamiento que permitan neutralizar la acidez y precipitar los metales pesados presentes en estos efluentes contaminantes. (Díaz et al. 2022, pág. 6)

Las reacciones químicas de los metales pesados en el tratamiento de aguas ácidas de mina tienen un impacto significativo en la efectividad de los procesos de neutralización y precipitación. Por ejemplo, la adición controlada de cal está directamente relacionada con el pH del agua a tratar, lo que influye en la precipitación de metales pesados como cadmio, zinc y hierro. Se ha observado que la precipitación de estos metales ocurre generalmente a pH por encima de 8,5 en los procesos de tratamiento físico-químico de drenajes ácidos de mina. La comprensión de las reacciones químicas de los metales pesados presentes, como arsénico, cadmio, cobre, hierro, plomo y zinc, es crucial para diseñar estrategias efectivas de tratamiento. Estas reacciones varían en función de la composición y reactividad de cada metal, lo que permite optimizar el uso de recursos como la cal en el proceso de neutralización y facilita la recuperación de metales de los lodos resultantes.

En consecuencia, estas interacciones químicas son fundamentales para mejorar la eficiencia, reducir costos y garantizar un mayor control ambiental en el tratamiento de aguas ácidas contaminadas por metales pesados. (Shun & Vilcazan, 2021)

#### **2.2.4. Tratamiento químico activo de aguas ácidas de mina**

El tratamiento de aguas ácidas en minería es crucial debido a la contaminación que generan en las aguas superficiales y subterráneas. Estas aguas ácidas se originan por la oxidación química y biológica de la pirita y contienen metales disueltos que aportan toxicidad al efluente. Para tratar estas aguas, se emplean tecnologías como procesos físico-químicos y biológicos, filtración por membranas o granular, balsas de evaporación con sistema de atomización y separación mediante decantación o coagulación.

Es fundamental combinar varios métodos de tratamiento, ya que en ocasiones un solo procedimiento puede resultar insuficiente para depurar completamente las

aguas ácidas. Además, es esencial implementar medidas preventivas para minimizar la generación de aguas ácidas, detectar posibles focos de contaminación y concentrar los efluentes para aislarlos del entorno. (Tuset, 2024, pág. 3)

El método de separación mediante decantación o coagulación en el tratamiento de aguas ácidas de mina consiste en dos procesos principales: coagulación y floculación. La coagulación es el proceso de neutralización de cargas eléctricas en las partículas sólidas suspendidas en el agua, lo que permite la formación de flóculos más grandes y más fáciles de sedimentar o filtrar. La floculación, por otro lado, es el proceso de agitación suave de las partículas coaguladas, lo que facilita su unión y sedimentación.

En el tratamiento de aguas ácidas de mina, la coagulación y la floculación pueden ser utilizadas antes de un proceso físico de separación, como sedimentación o filtración, para mejorar la capacidad de eliminación de partículas. Estos procesos pueden ser aplicados antes de un proceso de neutralización para reducir la acidez y eliminar metales disueltos (Rodríguez & López, 2023, pág. 12)

#### **2.2.5. Potencial de hidrogeno (pH) en aguas ácidas de mina**

El Potencial de Hidrógeno (pH) en aguas ácidas de mina es una medida que indica la acidez o alcalinidad del agua, determinada por la concentración de iones de hidrógeno presentes en la solución. Matemáticamente, el pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno. En el contexto del tratamiento de aguas ácidas de mina, el pH es un parámetro crucial que influye en la efectividad de los procesos de neutralización y precipitación de metales pesados presentes en estos efluentes.

En el tratamiento de drenajes ácidos de mina, se ha demostrado que la adición de cal está directamente relacionada con el pH del agua a tratar. Por ejemplo, se ha

determinado que se requieren aproximadamente 5,92 gramos de cal por litro de agua ácida de mina para lograr un tratamiento efectivo. Este proceso ayuda a elevar el pH del agua, lo que facilita la precipitación de metales y la reducción de la acidez, contribuyendo así a mejorar la calidad ambiental del efluente.

En resumen, el pH en aguas ácidas de mina es un indicador fundamental para evaluar su nivel de acidez y alcalinidad, siendo crucial en los procesos de tratamiento donde la adición controlada de cal juega un papel clave en la neutralización y mejora de estas aguas contaminadas. (Aduvire, 2006, pág. 5)

#### **2.2.6. Empleo de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina**

La cal es un aliado fundamental en el tratamiento de aguas ácidas de mina. Se utiliza para neutralizar los ácidos y metales pesados presentes en estas aguas, mejorando su calidad y reduciendo su impacto ambiental. En las minas, se generan drenajes ácidos que se combaten con la aplicación de la cal, aumentando el pH para promover la precipitación de los metales. La cal se emplea en diversos procesos como el tratamiento de desechos ácidos de mina, el secado de jales mineros y el tratamiento de aguas residuales en operaciones mineras.

El dimensionado de sistemas de tratamiento activo o químico con cal se basa en ensayos experimentales de neutralización para elegir el sistema más eficiente según la acidez protónica y mineral del agua a tratar. La caracterización de las aguas ácidas es crucial para seleccionar el tratamiento más idóneo, considerando aspectos como la acidez protónica y mineral, lo cual ayuda a determinar las zonas de tamponamiento o hidrólisis de los elementos presentes.

El uso de la cal en el tratamiento de aguas ácidas mineras es fundamental para mitigar el impacto ambiental generado por estos efluentes. Su versatilidad, bajo costo y propiedades físicas útiles hacen que sea un recurso ampliamente utilizado en la

industria minera para mejorar la calidad del agua, reducir residuos sólidos y controlar la contaminación generada por los procesos mineros. En ese sentido, ( Fernández & Pérez, 2023, pág. 8) señalan que el tratamiento de aguas acidas de mina mediante la dosificación de lechada de cal logró un elevado nivel de eficiencia, mayor al 95% en la remoción de metales.

#### **2.2.7. Proceso de coagulación en el tratamiento de aguas ácidas**

En el tratamiento de aguas ácidas de mina, el proceso de coagulación desempeña un papel crucial para la eliminación de metales pesados y la mejora de la calidad del agua. La coagulación es una etapa importante en el tratamiento físico-químico de estos efluentes, donde se utilizan productos como la cal (hidróxido de calcio) como coagulante/floculante para promover la precipitación de los metales presentes en el agua ácida.

Este proceso implica la formación de flóculos que atrapan partículas suspendidas y metales, facilitando su posterior separación del agua.

La adición de cal como coagulante en el tratamiento de aguas ácidas permite mejorar la eficiencia del proceso al reducir la carga metálica presente en el efluente. La cal actúa elevando el pH del agua, lo que favorece la formación de hidróxidos metálicos insolubles que pueden ser eliminados mediante procesos de sedimentación o filtración. Esta estrategia no solo contribuye a la remoción de metales pesados, sino que también ayuda a controlar la acidez del agua tratada, mejorando su calidad ambiental. (Martínez, & González,, 2023, pág. 10)

El proceso de coagulación con cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina es fundamental para la eliminación eficaz de metales pesados y la mejora de la calidad del agua, permitiendo una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes y una reducción significativa del impacto ambiental asociado a estos efluentes, el proceso de

coagulación en el tratamiento de aguas ácidas de mina se lleva a cabo mediante la adición de productos como la cal (hidróxido de calcio) como coagulante/floculante. Esta etapa es fundamental para promover la precipitación de metales pesados presentes en el agua ácida. La cal eleva el pH del agua, lo que favorece la formación de hidróxidos metálicos insolubles que pueden ser eliminados mediante procesos de sedimentación o filtración. La coagulación con cal contribuye a reducir la carga metálica en el efluente y controlar la acidez del agua tratada, mejorando su calidad ambiental. (Martínez, & González,, 2023, pág. 10)

### **2.2.8. Proceso de clarificación en el tratamiento de aguas ácidas**

El proceso de clarificación de lodos en el tratamiento de aguas ácidas implica varias etapas y tecnologías activas. Una de las tecnologías comunes es el proceso de Lodos de Alta Densidad (HDS), que se caracteriza por el uso de lechada de cal, aire para oxidación y recirculación parcial de los sedimentados en un clarificador, logrando concentraciones de sólidos del 20 al 40%. En la clarificación primaria, también conocida como sedimentación, se eliminan sólidos en suspensión, aceite y grasa antes de proceder con la clarificación final. Para tratar adecuadamente los lodos generados, se pueden emplear procesos como el compostaje o la digestión aeróbica autotérmica termófila, que ayudan a cumplir con regulaciones ambientales y optimizar la gestión de residuos. El tratamiento de aguas ácidas mediante clarificación de lodos implica tecnologías activas como el proceso HDS, seguido de etapas de sedimentación y clarificación final para eliminar partículas y materia orgánica antes de desechar el agua tratada en la naturaleza. Además, es crucial considerar el acondicionamiento químico y la deshidratación adecuada de los lodos para minimizar impactos ambientales y cumplir con normativas vigentes. (Castillo, 2024, pág. 4)

### **2.2.9. Proceso de sedimentación de coágulos en el tratamiento de aguas ácidas**

El proceso de sedimentación de coágulos en el tratamiento de aguas ácidas implica la adición de coagulantes, como sales de hierro y aluminio, para neutralizar las cargas eléctricas de las partículas coloidales y formar flóculos; estos flóculos son aglomeraciones de partículas más grandes que pueden sedimentar más rápidamente. La coagulación es el tratamiento más eficaz para la eliminación de impurezas en el agua, y la dosis de coagulante es crítica para lograr una buena sedimentación. El proceso de sedimentación se realiza en unidades de sedimentación, donde las partículas coloidales se aglutinan y sedimentan debido a su mayor tamaño y densidad. La sedimentación es un proceso físico que no requiere energía adicional, y es eficiente para eliminar partículas sólidas y materia orgánica.

(Mamani Canqui, 2024, pág. 5)

### **2.2.10. Límites Máximos Permisibles (LMP)**

El DS N° 010-2010 MINAM señala los Límites Máximos Permisibles (LMP) las cuales son regulaciones que establecen la concentración máxima de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que pueden ser liberados al medio ambiente sin causar daños a la salud humana y al ecosistema. Busca promover el uso de tecnologías de tratamiento de aguas ácidas eficientes y sostenibles, garantizando que las empresas mineras cumplan con su responsabilidad ambiental y contribuyan a la protección del medio ambiente en el Perú. (Ministerio del Ambiente del Perú, 2010, pág. 2)

**Tabla 1. Límites máximos permisibles**

| PARÁMETRO         | Unidad | Límite en cualquier momento | Límite para el promedio anual |
|-------------------|--------|-----------------------------|-------------------------------|
| pH                | -      | 6 – 9                       | 6 - 9                         |
| TSS               | mg/l   | 50                          | 25                            |
| Aceites y grasas  | mg/l   | 20                          | 16                            |
| Cianuro total     | mg/l   | 1                           | 0,8                           |
| Arsénico total    | mg/l   | 0,1                         | 0,08                          |
| Cadmio total      | mg/l   | 0,05                        | 0,04                          |
| Cromo hexavalente | mg/l   | 0,1                         | 0,08                          |
| Cobre total       | mg/l   | 0,5                         | 0,4                           |
| Hierro (disuelto) | mg/l   | 2                           | 1,6                           |
| Plomo total       | mg/l   | 0,2                         | 0,16                          |
| Mercurio total    | mg/l   | 0,0016                      | 0,0016                        |
| Zinc total        | mg/l   | 1,5                         | 1,2                           |

Nota: (Ministerio del Ambiente del Perú, 2010, pág. 2)

#### **2.2.11. Estándares de Calidad Ambiental (ECA)**

El Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM es una normativa ambiental que establece estándares de calidad ambiental (ECA) para el agua en Perú, este decreto fue aprobado por el Ministerio de Ambiente del Perú (MINAM). El decreto establece estándares de calidad ambiental para diferentes categorías de agua, como agua superficial, agua subterránea y agua residual. Además, establece requisitos para la gestión y control de la calidad del agua en diferentes sectores, como la agricultura, la industria y la minería. El decreto también establece responsabilidades y obligaciones para las empresas y organismos públicos en cuanto a la protección y conservación del agua en el Perú.

El propósito del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM es aprobar Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua y establecer disposiciones complementarias en Perú. Este decreto tiene como objetivo establecer estándares de calidad ambiental para diferentes categorías de agua, como agua superficial, agua subterránea y agua

residual. Además, busca regular la gestión y control de la calidad del agua en diversos sectores, como la agricultura, la industria y la minería.

El Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM tiene un alcance que abarca la aprobación de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua y establece disposiciones complementarias en Perú. Este decreto se enfoca en compilar las disposiciones aprobadas mediante el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, modificando y eliminando algunos valores, parámetros, categorías y subcategorías de los ECA, manteniendo otros aprobados por decretos anteriores. (Ministerio del Ambiente (MINAM) del Perú, 2017, pág. 6)

**Tabla 2.** *Categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales.*

| PARÁMETRO   | Unidad | D1: Riego de Vegetales | D2: Bebida de animales |
|-------------|--------|------------------------|------------------------|
| Aluminio    | mg/l   | 5                      | 5                      |
| Arsénico    | mg/l   | 0.1                    | 0.2                    |
| Bario       | mg/l   | 0.7                    | **                     |
| Berilio     | mg/l   | 0.1                    | 0.1                    |
| Boro        | mg/l   | 1                      | 5                      |
| Cadmio      | mg/l   | 0.01                   | 0.05                   |
| Cobre       | mg/l   | 0.2                    | 0.5                    |
| Cobalto     | mg/l   | 0.05                   | 1                      |
| Cromo Total | mg/l   | 0.1                    | 1                      |
| Hierro      | mg/l   | 5                      | **                     |
| Litio       | mg/l   | 2.5                    | 2.5                    |
| Magnesio    | mg/l   | **                     | 250                    |
| Manganeso   | mg/l   | 0.2                    | 0.2                    |
| Mercurio    | mg/l   | 0.001                  | 0.01                   |
| Níquel      | mg/l   | 0.2                    | 1                      |
| Plomo       | mg/l   | 0.05                   | 0.05                   |
| Selenio     | mg/l   | 0.02                   | 0.05                   |
| Zinc        | mg/l   | 2                      | 24                     |

Nota: (Ministerio del Ambiente (MINAM) del Perú, 2017, pág. 6)

### 2.3. Definición de términos básicos

- **Cal:** La cal es un término que se refiere comúnmente a óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) o hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), utilizados en diversos procesos industriales, agrícolas y de tratamiento de aguas para neutralizar la acidez, mejorar la calidad del suelo, entre otros usos.

- **Peachimetro:** Un peachímetro es un dispositivo utilizado para medir la acidez o alcalinidad de una solución, especialmente en aplicaciones como la industria alimentaria, química y ambiental.
- **Electrodo:** Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para establecer contacto con una parte no metálica de un circuito, como en el caso de electrodos utilizados en mediciones de pH, conductividad eléctrica u otras propiedades en soluciones.
- **Agitador:** Un agitador es un dispositivo mecánico utilizado para mezclar líquidos o sustancias en recipientes, comúnmente utilizado en laboratorios, plantas industriales y procesos químicos para homogeneizar mezclas.
- **Contenedor IBC:** Un contenedor IBC (Intermediate Bulk Container) es un recipiente utilizado para el almacenamiento y transporte de líquidos a granel, con capacidades que varían entre 450 y 1,000 litros, comúnmente empleados en la industria química.
- **Turbidímetro:** Un turbidímetro es un instrumento utilizado para medir la turbidez de una muestra líquida, que indica la cantidad de partículas suspendidas presentes en el agua u otras soluciones, siendo crucial en el control de calidad del agua potable.
- **Floculante:** Un floculante es una sustancia química utilizada para inducir la formación de flóculos o agregados en una suspensión coloidal, facilitando su separación del líquido circundante mediante procesos como la sedimentación o filtración.
- **pH:** El pH es una medida que indica la acidez o alcalinidad de una solución acuosa, determinada por la concentración de iones hidrógeno presentes. Se expresa en una

escala numérica de 0 a 14, donde valores menores a 7 indican acidez, 7 neutralidad y valores mayores a 7 alcalinidad.

- **Análisis ICP:** El análisis ICP (Inductively Coupled Plasma) es una técnica analítica utilizada para determinar la composición elemental de muestras mediante la generación de plasma acoplado inductivamente. Permite detectar trazas de metales y otros elementos con alta sensibilidad y precisión.
- **Acidez:** La acidez se refiere a la propiedad química que caracteriza a las sustancias capaces de ceder protones (iones  $H^+$ ) en solución acuosa. Se mide mediante el pH y está presente en diversas aplicaciones industriales, alimentarias y ambientales.
- **Turbidez:** La turbidez es una medida que indica el grado de opacidad o claridad visual de una muestra líquida debido a la presencia de partículas suspendidas. Se evalúa con instrumentos como el turbidímetro y es relevante en el control de calidad del agua y procesos industriales.
- **Muestras:** Las En el contexto analítico, las muestras son porciones representativas tomadas de un material o sustancia para su análisis. Estas muestras pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas y se utilizan en diversos campos como la investigación científica, control de calidad e inspección ambiental.

## 2.4. Formulación de hipótesis

### 2.4.1. Hipótesis general

La evaluación del tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal influye significativamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.

#### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a. El tiempo de contacto de lechada de cal influye directamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.
- b. La dosificación de lechada de cal influye directamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.

### **2.5. Identificación de variables**

#### **2.5.1. Variables independientes**

Evaluación del tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal

INDICADORES

- Dosificación de lechada de cal
- Tiempo

#### **2.5.2. Variables dependientes**

Tratamiento de aguas ácidas de mina

INDICADORES

- pH
- % Remoción de metales

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

**Tabla 3. Variables e indicadores**

| Variables                                                                                                                                    | Definición                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Dimensiones                                                    | Indicadores                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Variable Independiente                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                |                             |
| Evaluación del tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal<br><b>INDICADORES</b><br><br>- Dosificación de lechada de cal<br>- Tiempo | El proceso de tratamiento de aguas ácidas de mina consiste en la eliminación de metales presentes de las aguas, evaluando la dosificación de lechada de cal, tiempo y controlando el pH; así como concentraciones de metales de acuerdo con la normativa ambientales.                                                                     | Dosificación de lechada de cal                                 | Kg/m³                       |
|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Tiempo                                                         | Minutos                     |
| Variable dependiente                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                |                             |
| Tratamiento de aguas ácidas de mina<br><br><b>INDICADORES</b><br>% Remoción de metales                                                       | Es la razón entre la diferencia entre la concentración inicial menos la concentración final y la concentración inicial de metales presente en aguas ácidas de mina.                                                                                                                                                                       | % Remocion de Metales<br><br>$= \frac{Co - Cf}{Co} \times 100$ | Co = Concentración inicial. |
|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                | Cf = Concentración final.   |
|                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                | % de Remoción de metales    |
| pH                                                                                                                                           | Es el parámetro fisicoquímico, entendido como la medida logarítmica de la concentración de iones de hidrogeno (H <sup>+</sup> ) presentes en una solución acuosa, utilizada para determinar su grado de acidez o alcalinidad. Permite evaluar la efectividad del proceso de neutralización durante el tratamiento de aguas acidas de mina | Potencial de hidrogeno (pH)                                    | Unidades de pH              |

Nota: Autoría Propia

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

El tipo de investigación desarrollada es aplicada. Según (Arias, 2012), la investigación aplicada se define como un tipo de investigación cuyo propósito es dar solución a problemas prácticos. En este enfoque, el interés principal está en las consecuencias y aplicaciones prácticas del problema y su solución, buscando llevar los resultados a la práctica para beneficiar a la sociedad.

La investigación es aplicada debido a que se evaluará las dos variables: el tiempo de contacto y la dosificación de lechada de cal, con el objetivo de determinar la efectividad del tratamiento, dando su solución práctica para tratar el agua acida generado en el proyecto minero Esperanza.

#### **3.2. Nivel de investigación**

El nivel de investigación es analítico. (Arias, 2012) señala que el método analítico es un proceso cognoscitivo que consiste en descomponer un objeto de estudio, separando cada una de las partes del todo para estudiarlas en forma individual. El nivel de investigación analítico se aplicará mediante la identificación y evaluación de las

relaciones causales entre el tiempo de contacto y la dosificación de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas. Debido que la naturaleza de este enfoque implica descomponer el problema en sus elementos fundamentales, analizando datos empíricos para validar hipótesis y mejorar la comprensión del fenómeno estudiado.

### **3.3. Métodos de investigación**

El método de investigación empleado fue el método deductivo e inductivo. La metodología deductiva e inductiva son enfoques fundamentales en la investigación científica. La metodología deductiva implica partir de una teoría o hipótesis previa para luego probar su validez a través de observaciones y recolección de datos, utilizando un método descendente de lo general a lo particular. Por otro lado, la metodología inductiva consiste en realizar observaciones detalladas del fenómeno estudiado, analizar los datos en busca de patrones y relaciones, y desarrollar teorías e ideas a partir de los datos recopilados, utilizando un método ascendente de lo particular a lo general.

### **3.4. Diseño de investigación**

La investigación desarrolla un diseño de investigación experimental. De acuerdo a (Hernandes et al. 1997) el diseño de investigación experimental se caracteriza por:

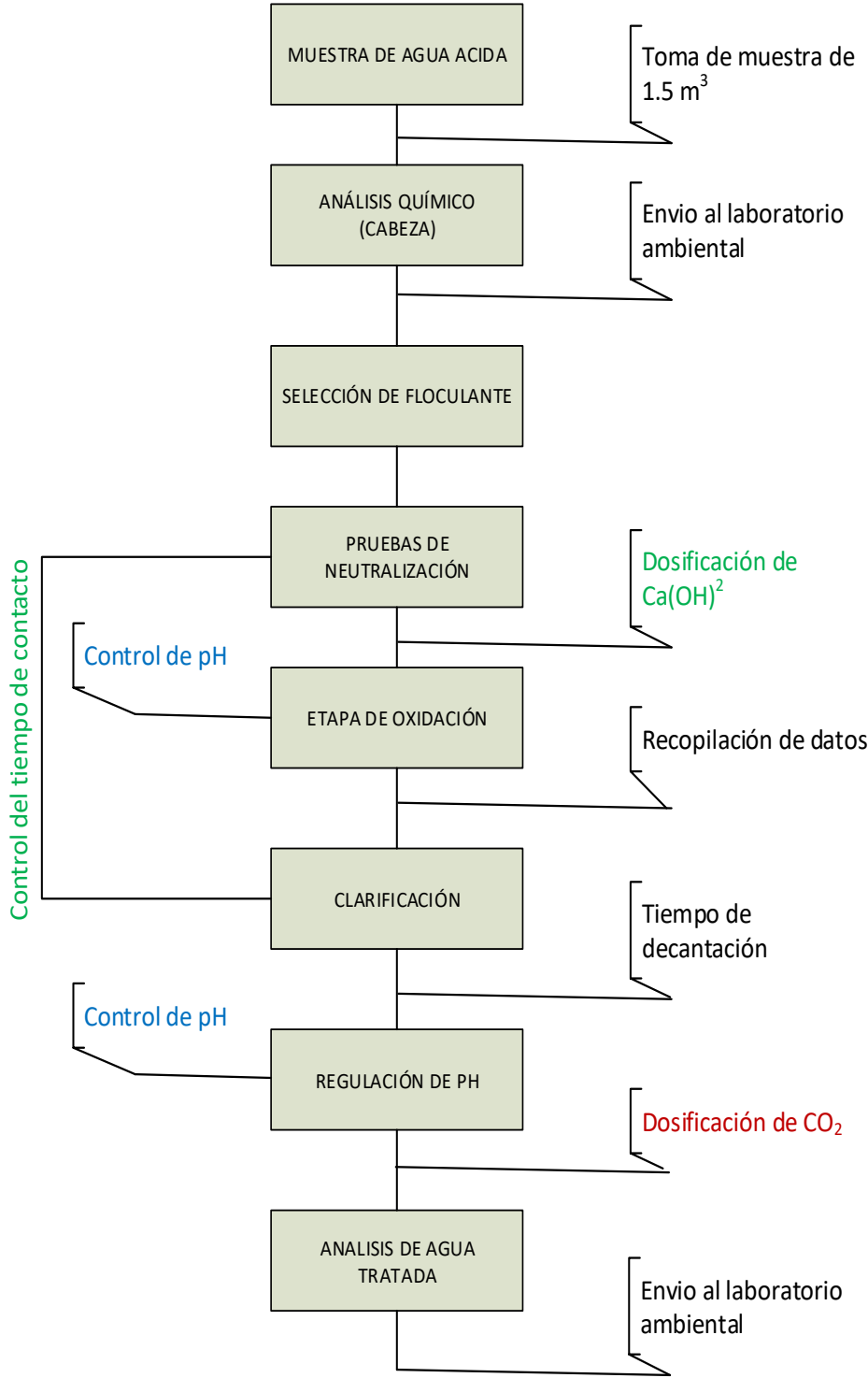
Manipulación intencional de una o más variables independientes para analizar sus efectos sobre una o más variables dependientes.

Asignación aleatoria de los participantes a los diferentes grupos (experimental y de control).

Existencia de un grupo de control que no recibe el tratamiento experimental, permitiendo la comparación de resultados.

Medición de la variable dependiente antes y después de la intervención experimental.

Tabla 4. Diagrama de procesos de pruebas



Nota: Autoría Propia

### 3.5. Población y muestra

#### 3.5.1. Población

(Arias, 2012) menciona que la población es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para las cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Ésta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio. En el estudio de investigación desarrollado la población son las aguas ácidas del proyecto minero Esperanza la población es de  $150 \text{ m}^3$ .

**Figura 1.** *Poza P1-E*



Nota: Fotografía tomada de la poza P1-E

#### 3.5.2. Muestra

(Arias, 2012) define la muestra como "un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible" con el objetivo de hacer inferencias o generalizar los resultados al resto de la población con un margen de error conocido. Indica también que una muestra representativa, por su tamaño y similitud con el conjunto, permite realizar estas generalizaciones de manera precisa en la investigación. Con esta definición podemos definir que la muestra está constituida por  $1,5 \text{ m}^3$  de agua ácida de mina de muestra para realizar las pruebas.

En el muestreo probabilístico, cada miembro de la población tiene la misma oportunidad de ser seleccionado para la muestra. Esto permite obtener resultados generalizables y elimina sesgos. Algunos tipos de muestreo probabilístico son:

**Muestreo aleatorio simple:** Cada miembro se elige al azar por cada cuadrícula, para poder obtener 1,5 m<sup>3</sup> para realizar la muestra.

**Figura 2.** *Muestreo aleatorio simple.*



Nota: Fotografía tomada del muestreo realizado.

### 3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### 3.6.1. Técnicas de recolección de datos

La técnica para la recolección de datos fue la observación a través de dos métodos los cuales son:

**Observación:** La observación se llevó a cabo en el visualizar las características de las aguas ácidas de mina, donde se registraron parámetros clave como el pH, la conductividad y la turbidez. Para mejorar esta técnica, se realizó la observación in situ, facilitando la recolección de datos en tiempo real. Además, se implementó un sistema de registro digital para documentar observaciones y resultados, lo que facilitó el análisis posterior y la comparación de datos.

**Entrevista libre:** La entrevista libre se realizó con ingenieros y técnicos involucrados en el proyecto minero Esperanza. Para optimizar esta técnica, se estructuraron las entrevistas con un conjunto de preguntas guía que abordaron aspectos

específicos del tratamiento de aguas ácidas, como los tipos de sulfuros presentes en la mina, esto permitió obtener información fidedigna.

**Fuentes primarias:** Se obtuvieron a partir de los reportes de análisis químico de laboratorio de la muestra de cabeza. Para enriquecer esta técnica, se complementaron los datos obtenidos con registros históricos sobre el tratamiento de aguas ácidas en estudios similares. Esto no solo proporcionó un contexto más amplio, sino que también permitió identificar tendencias y patrones en los resultados obtenidos a lo largo del tiempo.

### **3.6.2. Instrumentos de recolección de datos**

Para realizar las pruebas de tratamiento de aguas ácidas de mina, se utilizarán diversos equipos de medición y materiales, incluyendo:

**Ensayes químicos:** Para los análisis químicos, se llevaron a cabo ensayos químicos que permitieron determinar la composición del agua tratada, así como la ley de cabeza del agua a tratar.

**Cuaderno de campo:** Para registrar observaciones detalladas y anotaciones sobre las condiciones del entorno durante las mediciones

**Peachímetros y potenciómetros:** para medir y controlar el pH durante las pruebas.

**Turbidímetros:** para medir la turbidez del agua

**Cronometro:** fundamental para medir el tiempo de reacción en ensayos químicos y otros procesos relevantes.

**Probetas graduadas:** Permitieron medir volúmenes específicos de líquidos con precisión. Con las marcas que indican diferentes capacidades volumétricas, se registró cada dosificación mínima.

**Matraces aforados:** Utilizados para preparar soluciones a un volumen exacto. Estos matraces tienen una única marca que indica el volumen al que deben llenarse.

**Pipetas:** Instrumentos volumétricos utilizados para transferir un volumen específico de líquido con alta precisión.

**Densímetros:** Utilizados para la lectura de la densidad de los reactivos basándose, permitiendo evaluar la concentración y pureza del agua tratada.

**Botellas de plástico:** Utilizados para la recepción de agua tratada para su análisis, así como el agua de ingreso a tratar.

### 3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

Para incrementar la información sobre las pruebas de tratamiento de aguas ácidas de mina, se seguirán los siguientes pasos:

**Obtención de datos:** Los datos serán obtenidos de los reportes metalúrgicos del laboratorio, los cuales proporcionarán información detallada sobre las características químicas y físicas de las aguas ácidas de mina, incluyendo pH, conductividad, concentración de metales pesados, y otros parámetros relevantes.

**Análisis de datos:** El análisis de datos se aplicará a las tablas y gráficos generados en Microsoft Excel. Este análisis incluirá la evaluación de los resultados en relación con los objetivos del tratamiento de aguas ácidas de mina, como la reducción de la toxicidad y la mejora de la calidad del agua.

**Interpretación de resultados:** Los resultados del análisis de datos serán interpretados en función de los objetivos del tratamiento de aguas ácidas de mina. Esto permitirá determinar la efectividad de los métodos de tratamiento utilizados e identificar áreas de mejora para futuras mejoras.

**Presentación de resultados:** Los resultados del análisis de datos serán presentados en un formato claro y conciso, utilizando tablas, gráficos y diagramas para

facilitar la comprensión de los resultados. Esto permitirá una comunicación efectiva de los resultados con otros profesionales y stakeholders involucrados en el estudio.

**Revisión y ajuste:** Los resultados del análisis de datos serán revisados y ajustados según sea necesario, asegurando que los métodos de tratamiento de aguas ácidas de mina sean efectivos y seguros.

**Implementación de mejoras:** Las mejoras identificadas en el análisis de datos serán implementadas en el tratamiento de aguas ácidas de mina, asegurando que los métodos sean cada vez más efectivos y seguros.

**Monitoreo y seguimiento:** El tratamiento de aguas ácidas de mina será monitoreado y seguido de cerca para asegurarse de que los métodos sean efectivos y seguros a largo plazo.

**Documentación y registro:** Todos los resultados del análisis de datos, incluyendo los reportes de laboratorio, las tablas y gráficos, y los resultados del análisis, serán documentados y registrados para futuras referencias y evaluaciones.

La validación y confiabilidad de los instrumentos fue realizada por Ofilab PERÚ S.A.C., el cual realizó la calibración de los equipos (ver anexos, ilustraciones 19, 20, 21, 22)

### **3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Según los reportes proporcionados, las principales técnicas de procesamiento y análisis de datos utilizados en las pruebas de tratamiento de aguas ácidas de mina son:

**Obtención de datos de reportes metalúrgicos del laboratorio:** Los datos sobre las características químicas y físicas de las aguas ácidas de mina, como pH, conductividad, concentración de metales pesados, entre otros parámetros relevantes, se obtienen de los reportes metalúrgicos del laboratorio.

**Procesamiento de datos en Microsoft Excel:** Los datos obtenidos se procesan y organizan en tablas y gráficos utilizando el software Microsoft Excel. Esto permite una visualización clara de los resultados y facilita la identificación de tendencias y patrones.

**Análisis de datos en tablas y gráficos:** El análisis de los datos se aplica a las tablas y gráficos generados en Excel. Este análisis evalúa los resultados en relación con los objetivos del tratamiento de aguas ácidas, como la reducción de la toxicidad y la mejora de la calidad del agua.

**Aplicación de pruebas estadísticas:** Se aplican pruebas estadísticas, como pruebas de hipótesis, para determinar la significancia de las diferencias y relaciones observadas en los datos. Esto se desarrolla a través de un diseño experimental durante las pruebas.

**Interpretación de resultados:** Los resultados del análisis de datos se interpretan en función de los objetivos del tratamiento de aguas ácidas, lo que permite determinar la efectividad de los métodos utilizados e identificar áreas de mejora.

**Documentación y presentación de resultados:** Los resultados del análisis de datos se documentan y presentan en un informe que incluye observaciones, análisis y conclusiones. Esto se realiza para comunicar los hallazgos a los profesionales y partes interesadas involucradas en el estudio.

### **3.9. Tratamiento estadístico**

El tratamiento estadístico es una parte importante en el análisis de los resultados de una prueba piloto de tratamiento de aguas ácidas de mina. Algunos aspectos clave incluyen:

**Caracterización fisicoquímica del agua de mina** antes y después del tratamiento, incluyendo parámetros como pH, metales pesados, etc.

**Análisis estadístico de los resultados usando software** como Excel y SPSS para determinar diferencias significativas entre grupos de tratamiento

**Pruebas de hipótesis** para aceptar o rechazar hipótesis nulas sobre la eficacia del tratamiento

**Análisis de la relación entre variables** como pH, dosis de reactivos y porcentaje de remoción de metales

**Técnicas de optimización** para determinar las condiciones óptimas de operación que maximicen la remoción de metales y minimicen el consumo de reactivos

Interpretación de resultados apoyada en gráficos y tablas generados con hojas de cálculo y software estadístico

### **3.10. Orientación ética filosófica y epistémica**

#### **3.10.1. Orientación ética**

La orientación ética se refiere a la consideración de los valores y principios morales que deben guiar la investigación. Esta orientación presenta un efecto respecto de las decisiones tomadas durante el proceso de investigación, como la obtención de consentimiento informado, la protección de los participantes, la transparencia en la presentación de los resultados y la responsabilidad en la utilización de los datos recopilados.

#### **3.10.2. Orientación filosófica**

Este trabajo de investigación presenta la orientación filosófica en la aplicación de consultas. Recordemos que el término "orientación filosófica" describe un intercambio dialógico entre un filósofo y un consultado, que tiene lugar a partir de una cuestión presentada por el segundo y orquestada mediante el diálogo. La orientación establecida durante el desarrollo de la investigación fue comprender y clarificar

problema planteado, a través de las herramientas filosóficas como el análisis crítico y la reflexión.

### **3.10.3. Orientación epistemológica**

La orientación epistemológica se enfoca en la naturaleza del conocimiento y la forma en que se obtiene. En el contexto de la investigación, esta orientación implicó la reflexión sobre las perspectivas epistemológicas que influyeron en la forma en que se abordaron los problemas y fue desarrollando la investigación. Por ejemplo, la orientación epistemológica influyó en la elección de la metodología, la forma en que se recopilaron y analizaron los datos e interpretación de los resultados. (Bunge, 2002)

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

##### **4.1.1. Descripción del proceso operativo**

El proceso consta de los siguientes procesos unitarios: preparación de reactivos, contacto entre la solución ácida y alcalinización, floculación, sedimentación, acidificación y filtración. Para lo cual, se usó 5 tanques y 2 IBC como clarificadores en la prueba piloto.

La preparación de reactivos se subdivide en dos tipos de reactivos, lechada de cal y floculante, para lo cual se cuenta con 2 tanques de 120 litros aproximadamente, para cada reactivo (tanque de preparación y dosificación). La lechada de cal es preparada al 15% de sólidos y el floculante a una concentración de 0,1 % (1000 ppm).

La mezcla de la solución ácida y la lechada de cal se dan en el tanque de contacto. El agua ácida ingresa usando una bomba centrífuga desde el tanque de recepción de agua ácida (proporcionada por la empresa minera) hacia el tanque de contacto, y la lechada de cal por medio de una bomba peristáltica desde el tanque de dosificación de lechada de cal.

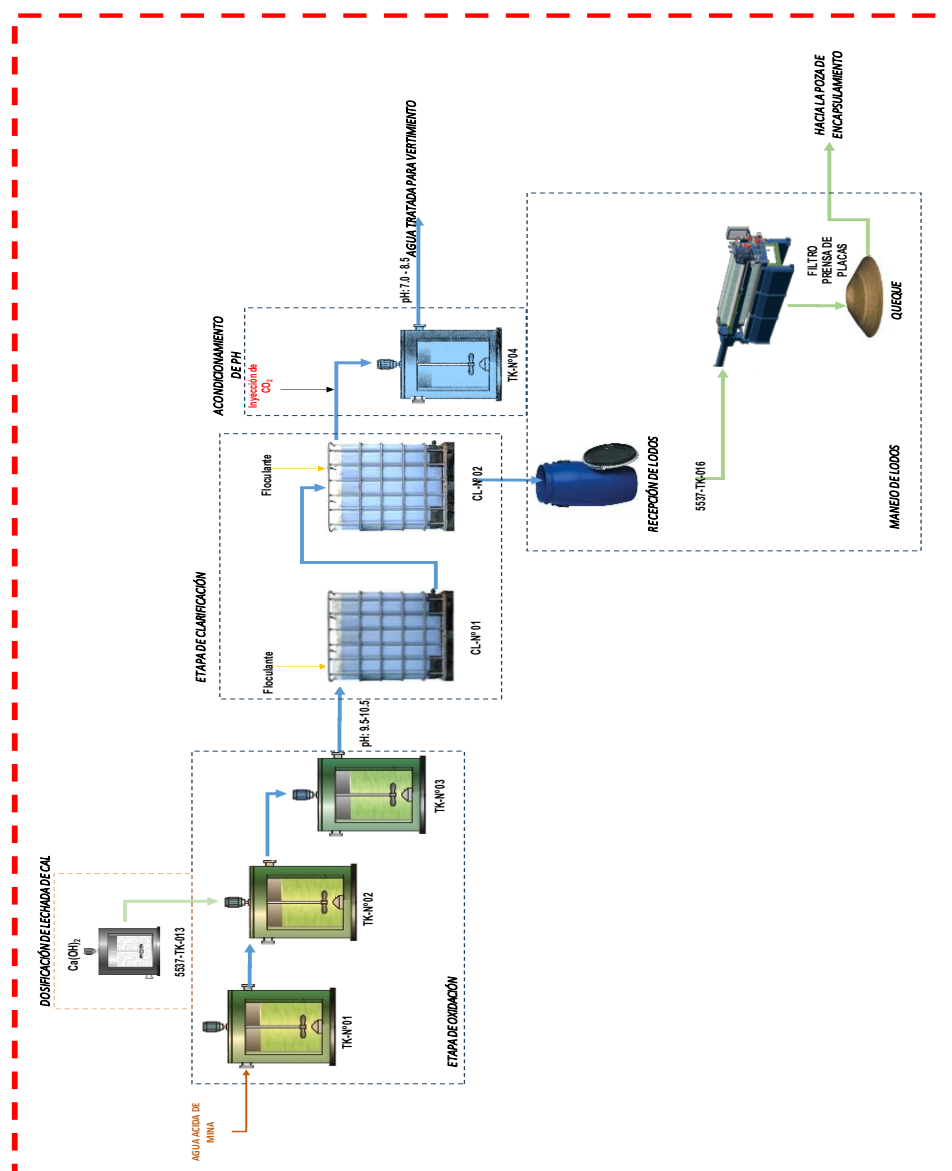
La mezcla realizada en el tanque de contacto es trasvasada mediante una bomba centrífuga a un tanque contiguo, denominado tanque de alcalinización, el cual tiene que una capacidad de  $0,25 \text{ m}^3$ . En este tanque cumple un tiempo de residencia determinado para reaccionar y abatir los metales contenidos en la solución inicial, llevando el pH a niveles de 10,5 aproximadamente, en la salida del tanque.

Posteriormente, por rebose, la solución es trasvasada hacia el tanque de floculación, donde entra en contacto con el floculante MT-6506, transportado por una bomba peristáltica desde el tanque de dosificación de floculante, y se forman flóculos, los cuales son fundamentales para la etapa de separación sólido-líquido. La floculación tiene lugar en un tanque de aproximadamente 250 litros de capacidad. Este tanque también recibe la recirculación de lodos provenientes de una etapa posterior.

Floculado la mezcla, es trasvasada hacia el reactor clarificador, haciendo uso de una bomba centrífuga. El reactor tiene dos productos: underflow y overflow. El underflow es recirculado en parte, y lo restante es almacenado para posteriores pruebas. El overflow es trasvasado por rebose al holding tank del filtro bolsa, que, haciendo uso de una bomba centrífuga, filtra los últimos residuos de sólidos presentes en la solución de rebose del clarificador, para luego ser transportado hacia un contenedor para proceder la acidificación, haciendo uso de  $\text{CO}_2$ .

Todos los tanques cuentan con variadores de frecuencia individuales y agitadores que permiten regular la velocidad de giro de los agitadores. Adicionalmente, el flujo de ingreso de la bomba se regula haciendo uso del rotámetro y las válvulas de salida de las bombas.

**Figura 3.** Diagrama de flujo de tratamiento de aguas ácidas - proyecto minero Esperanza



Nota: Flowsheet del proceso operativo.

#### 4.1.2. Análisis Granulométrico y % de Cal Útil de Mycal

Con el objetivo de identificar el contenido pasante de cal viva Mycal que se utilizó en las pruebas piloto, se realizó el análisis granulométrico, el cual fue 42% - 200m. Se identificaron también fracciones gruesas de cal no calcinadas.

Según los reportes de contenido de cal útil, la muestra de cal Mycal presentó una pureza de 65 % CaO.

**Tabla 5. Análisis granulométrico de cal de Mycal**

| Tamaño Tamiz | Masa Retenida Acum. | % Retenido | % Pasante |
|--------------|---------------------|------------|-----------|
| No. 4        | 0,0                 | 0,0        | 100       |
| No. 10       | 11,0                | 11,0       | 89,0      |
| No. 20       | 27,0                | 27,0       | 73,0      |
| No. 40       | 34,0                | 34,0       | 66,0      |
| No. 60       | 40,0                | 40,0       | 60,0      |
| No. 140      | 50,0                | 50,0       | 50,0      |
| No. 200      | 58,0                | 58,0       | 42,0      |
| Fondo        | 103,0               | -          | -         |

Nota: Autoría Propia

Es importante resaltar que cualquier tipo de variación en la composición química (% cal útil), contenido de impurezas y perfil granulométrico de la muestra de cal, puede ocasionar desviaciones en el consumo de cal para el proceso de alcalinización; de los cuales, esta granulometría gruesa no es favorable para el proceso de preparación de lechada de cal, por cuanto, puede impactar en el sistema de bombeo de lechada de cal (atoros de líneas y deterioro de bombas).

#### **4.1.3. Preparación de reactivos**

La preparación de lechada de cal y floculante para el inicio de las pruebas piloto fue realizada para inicio de las pruebas piloto. La cal se preparó al 15 % de sólidos en masa (65% CaO y granulometría 42% -m200) en tanques de 120 litros, en el tanque de preparación de lechada de cal, con un tiempo de preparación de 30 minutos, manteniéndose en constante agitación para evitar la segregación de las partículas en suspensión. La cal preparada fue con la Mycal Perú (cabe mencionar que esta cal presenta gran tamaño de partículas).

**Figura 4.** *Preparación de lechada de cal al 15%*



Nota: Fotografía tomada durante la preparación de cal

El floculante preparado fue el MT-6506 a una concentración de 0,1% peso, en el tanque de preparación de floculante, con un tiempo de contacto de 1 hora en agitación constante.

#### **4.1.4. Pruebas de Consumo de lechada de cal y Cinética de Neutralización**

Se realizó la preparación de reactivos como hidróxido de sodio a una concentración de 13% y 15%, respectivamente, y lechada de cal al 15% en peso de tipos de cal como: Mycal, cal de Minera Summa Gold e Hidrocal.

Asimismo, se realizaron pruebas de alcalinización a pH entre 10.4–10.8 a fin de encontrar o hallar los ratios de consumo de agente neutralizante y evaluar el tiempo de residencia. Las condiciones de trabajo se presentan en la siguiente tabla:

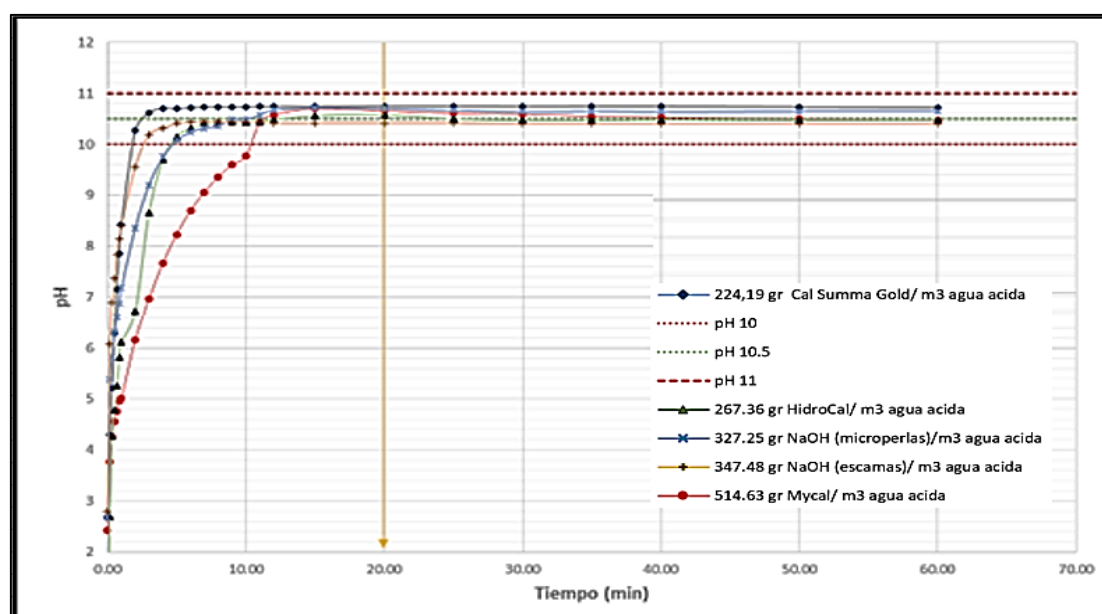
**Tabla 6.** Cinética de alcalinización con distintos agentes neutralizantes

| Código de Muestra     | Peso (g) | pH Inicial | Tiempo de Agitación (min) | Densidad Agente Neutraliz. g/ml | ETAPA DE ALCALINIZACIÓN |         |         | pH Final |
|-----------------------|----------|------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------|---------|----------|
|                       |          |            |                           |                                 | Lechada de Cal          |         |         |          |
|                       |          |            |                           |                                 | Conc.                   | Adición | Consumo |          |
|                       |          |            |                           |                                 | %                       | ml      | g/m³    |          |
| NaOH (escamas)        | 5000     | 2,79       | 20                        | 1,1500                          | 13                      | 10,0    | 347,48  | 10,40    |
| HidroCal              | 5000     | 2,69       | 20                        | 1,0812                          | 15                      | 9,5     | 267,36  | 10,47    |
| Mycal                 | 5000     | 2,69       | 20                        | 1,0960                          | 15                      | 34,0    | 514,63  | 10,62    |
| NaOH (microperlas)    | 5000     | 2,67       | 20                        | 1,1364                          | 15                      | 11,0    | 327,25  | 10,64    |
| Cal Minera Summa Gold | 5000     | 2,68       | 20                        | 1,1390                          | 15                      | 7,5     | 224,19  | 10,75    |

Nota: Autoría Propia

Los consumos de agente neutralizante para llegar a pH como 10,4; 10,5; 10,6; 10,7 y 10,8, fueron 0,347 kg/m<sup>3</sup> de NaOH (escamas); 0,267 kg/m<sup>3</sup> de Hidrocal; 0,51 kg/m<sup>3</sup> de cal Mycal; 0,327 kg/m<sup>3</sup> de NaOH (microperlas) y 0,224 kg/m<sup>3</sup> de cal Minera Summa Gold, respectivamente. A continuación, se presenta la cinética de comportamiento de agentes neutralizantes para llegar a pH entre 10,4–10,8:

**Figura 5.** Cinética de consumo de agente neutralizante a pH alcanzado.



Nota: Curva de neutralización.

La data muestra el consumo necesario para que llegue al pH requerido de 10,5 utilizando unos álcalis al 15% de sólidos.

La aplicación del agente neutralizante para la alcalinización del agua ácida de la poza de aguas ácidas de mina provee un tiempo de contacto de 20 minutos para alcanzarrangos de pH entre 10,4–10,7. El tiempo de residencia para llegar al pH alcanzado para este tipo de agua ácida son necesarios 20 minutos.

#### 4.1.5. Pruebas de Selección de Floculante – Laboratorio

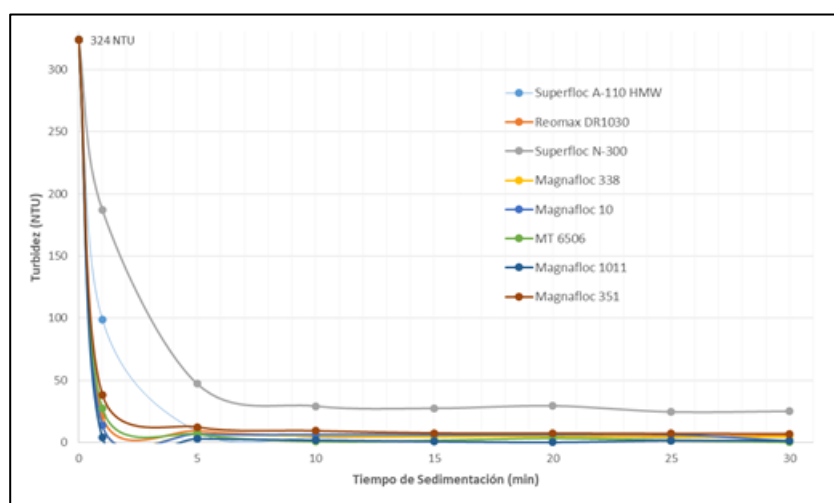
Con el fin de evaluar el polímero que arroje el menor grado de turbidez bajo un ratio establecido en la etapa de clarificación en una solución alcalinizada a pH 10,62 con cal Mycal, se realizó pruebas de evaluación de floculantes como: floculante MT-6506, Superfloc A-110, Reomax DR1030, Superfloc N-300, Magnafloc 351, Magnafloc 338, Magnafloc 10 y Magnafloc 1011. Las condiciones de trabajo para estas pruebas se muestran a continuación:

**Tabla 7.** Evaluación de floculantes

| Tipos de Floculante / Proveedor |                       |           | Dosis | Agit. | Contenido de Turbidez (NTU's) |       |        |        |
|---------------------------------|-----------------------|-----------|-------|-------|-------------------------------|-------|--------|--------|
|                                 |                       |           | mg/l  | Min   | 1 min                         | 5 min | 10 min | 30 min |
| Superfloc A-110                 | Aniónico              | Kemira    | 1,0   | 3     | 98,83                         | 8,59  | 3,73   | 5,59   |
| Reomax DR1030                   | Modificador reológico | BASF      | 1,0   | 3     | 21,26                         | 9,43  | 5,05   | 5,49   |
| Superfloc N-300                 | Aniónico              | Kemira    | 1,0   | 3     | 187,0                         | 47,2  | 29,22  | 25,13  |
| Magnafloc 338                   | Aniónico              | BASF      | 1,0   | 3     | 13,72                         | 7,15  | 5,29   | 4,40   |
| Magnafloc 10                    | Aniónico              | BASF      | 1,0   | 3     | 13,76                         | 6,84  | 6,36   | 1,16   |
| Floc. MT-6506                   | Aniónico              | Mercantil | 1,0   | 3     | 27,38                         | 6,66  | 0,84   | 0,22   |
| Magnafloc 1011                  | Aniónico              | BASF      | 1,0   | 3     | 3,92                          | 3,00  | 1,68   | 1,31   |
| Magnafloc 351                   | Aniónico              | BASF      | 1,0   | 3     | 38,46                         | 12,39 | 9,40   | 7,02   |

Nota: Autoría Propia

**Figura 6.** *Turbidez vs tiempo de sedimentación*



Nota: Selección de floculante.

Según la evaluación de floculantes después de un proceso de alcalinización con la cal de Mycal a pH 10,62, con 324 NTU's como cabeza neutralizada, el de menor turbidez reflejados en NTU's en la etapa de clarificación fueron los floculante MT-6506 con 0,22 NTU y floculante Magnafloc 1011 con 1,31NTU en un tiempo de 30 minutos de sedimentación.

#### **4.1.6. Pruebas de Optimización de Consumo de Floculante**

Con los floculantes de menor grado de turbidez reflejados en NTU, se realizaron pruebas de optimización de consumo de floculantes MT-6506 y Magnafloc 1011a ratios de 0,25; 0,50; 0,75; 0,90 y 1,0 g/m<sup>3</sup> en probetas de vidrio de 2 litros. Se utilizó una rastra en las pruebas de sedimentación con una velocidad de giro de 0,5 RPM para simular el efecto de una rastra en un espesador industrial, permitiendo una mayor compactación.

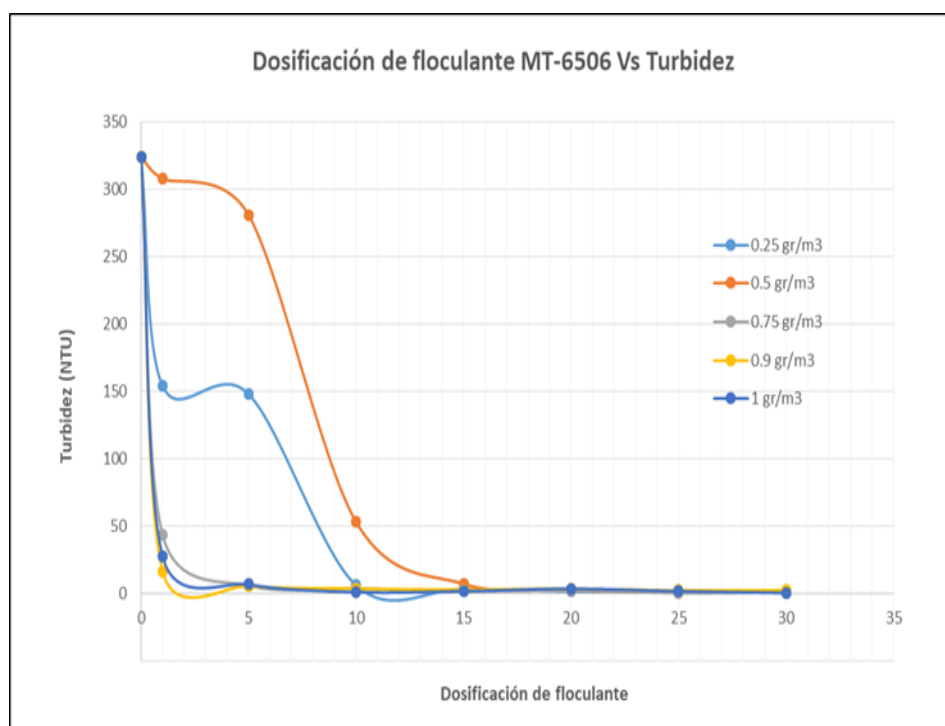
Las condiciones de trabajo para estas pruebas se muestran a continuación:

**Tabla 8.** Optimización de consumo de floculante.

| Tipo de Floculante | Vol.  | Conc. | Dosis | Sedimentación: Turbidez (NTU's) |        |        |        |
|--------------------|-------|-------|-------|---------------------------------|--------|--------|--------|
|                    | Litro | %     | MI    | 5 min                           | 10 min | 15 min | 30 min |
| Floc. MT-6506      | 2,0   | 0,1   | 0.50  | 148,0                           | 5,93   | 3,28   | 0,81   |
|                    | 2,0   | 0,1   | 1,00  | 281,0                           | 53,0   | 6,96   | 1,76   |
|                    | 2,0   | 0,1   | 1,50  | 5,68                            | 3,64   | 1,54   | 0,91   |
|                    | 2,0   | 0,1   | 1,80  | 5,49                            | 3,44   | 2,70   | 2,33   |
|                    | 2,0   | 0,1   | 2,00  | 6,66                            | 0,84   | 1,52   | 0,22   |
| Magnaflow 1011     | 2,0   | 0,1   | 0,50  | 5,27                            | 0,70   | 0,00   | 0,00   |
|                    | 2,0   | 0,1   | 1,00  | 1,56                            | 0,08   | 0,00   | 0,00   |
|                    | 2,0   | 0,1   | 1,50  | 0,02                            | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
|                    | 2,0   | 0,1   | 1,80  | 1,00                            | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
|                    | 2,0   | 0,1   | 2,00  | 3,00                            | 1,68   | 0,70   | 1,31   |

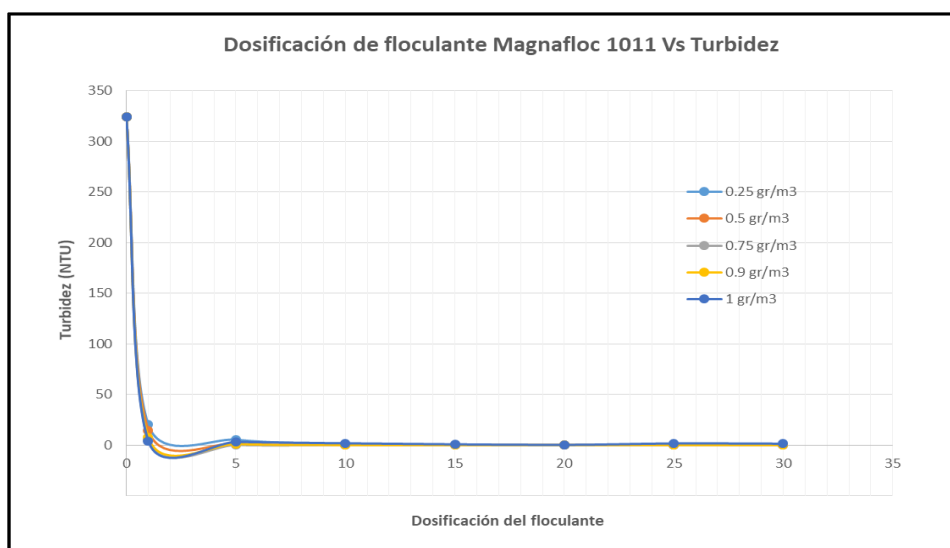
Nota: Autoría Propia.

**Figura 7.** Optimización del consumo de floculante MT-6506.



Nota: Figura de optimización de floculante.

**Figura 8.** Optimización del consumo de Magnafloc 1011.



Nota: Figura curva del floculante Magnafloc 1011.

Según la evaluación de consumo de floculantes en la etapa de clarificación usando el floculante MT-6506 es necesario una ratio de  $0,75 \text{ g/m}^3$  bajo un tiempo de sedimentación de 10 minutos para obtener una turbidez final de 3,64 NTU. Asimismo, usando el floculante Magnafloc 1011, también es necesario una ratio de  $0,75 \text{ g/m}^3$  bajo un tiempo menor de sedimentación de 5 minutos para obtener una turbidez final de 0,02 NTU.

De las pruebas de dosificación de floculante se confirma una oportunidad de mejora en el uso de Magnafloc 1011 para la floculación de la pulpa neutralizada con la cal de Mycal.

#### **4.1.7. Etapa de Alcalinización**

Durante las pruebas se tuvo una variación de pH importante en el agua ácida mencionada, lo que se vio reflejado en el consumo de cal en la etapa de alcalinización. Las condiciones operativas de ejecución de las pruebas piloto desarrollado en la unidad minera, se presenta a continuación:

**Tabla 9.** Condiciones operativas de pruebas piloto por batch.

| POZA P1-E         |                   |              |       | ALCALINIZACIÓN |                   | FLOCULACIÓN      | O/F    |       |
|-------------------|-------------------|--------------|-------|----------------|-------------------|------------------|--------|-------|
| Código de Muestra | Flujo             | Alimentación |       | Lechada de cal |                   | Floc. MT-6506    | Rebose |       |
|                   | m <sup>3</sup> /h | pH           | NTU   | Ph             | Kg/m <sup>3</sup> | g/m <sup>3</sup> | pH     | NTU   |
| -Px-01            | 3                 | 5,78         | 61,2  | 10,4           | 0,434             | 0,99             | 10     | 14,2  |
| -Px-02            | 4                 | 5,1          | 59,9  | 10,6           | 0,476             | 0,84             | 10,25  | 17,64 |
| -Px-03            | 3,5               | 4,17         | 74,7  | 10,6           | 0,473             | 0,96             | 10,17  | 11,3  |
| -Px-04            | 4                 | 3,8          | 70,2  | 10,55          | 0,456             | 0,84             | 10,09  | 13,33 |
| -Px-05            | 4                 | 3,71         | 98,7  | 10,48          | 0,437             | 0,81             | 10,2   | 16,9  |
| -Px-06            | 5                 | 3,48         | 111,5 | 10,45          | 0,449             | 0,68             | 10,41  | 11,47 |
| -Px-07            | 4                 | 3,65         | 90,4  | 10,82          | 0,508             | 0,84             | 10,4   | 17,72 |
| -Px-08            | 4                 | 3,62         | 90,2  | 10,75          | 0,486             | 0,84             | 10,72  | 17    |

Nota: Autoría Propia

Las ratios de consumo de cal Mycal para llegar a pH de 10,4; 10,5; 10,6; 10,7 y 10,8 según flujos de tratamiento fueron 0,43; 0,45; 0,47; 0,49; 0,51 kg/m<sup>3</sup> considerando una densidad de 1,114 kg/l de lechada de cal al 15%, respectivamente. No se realizó un tamizaje preliminar de las fracciones gruesas de la cal, en la preparación de lechada de cal.

#### 4.1.8. Etapa de Clarificación

Después de la etapa de alcalinización, se procedió a realizar la floculación con una dosis de 0,7–1,0 g/m<sup>3</sup> de floculante MT-6506 considerando una densidad de 0,987 kg/L de floculante preparado al 0,1%, donde se lograron niveles de turbidez por debajo de 18 NTU en la solución clarificada.

Las pruebas se realizaron en el tanque de floculación, donde también ingresó la recirculación de los lodos (96%) generados en el clarificador, donde la tasa de sedimentación usada en las pruebas fue de aproximadamente 1,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*hr en el caso más favorable teniendo un ingreso de agua ácida al circuito de 4 m<sup>3</sup>/hr.

Posteriormente, después de 60 minutos de clarificación (considerando un flujo máximo de 5 m<sup>3</sup>/h) en el reactor clarificador, se procedió al muestreo correspondiente, con el fin de extraer las alícuotas de solución sobrenadante para los respectivos análisis

químicos según la normativa LMP 2010 y ECA-3 en los parámetros fisicoquímicos e inorgánicos.

A continuación, se presentan los resultados de análisis químico de las muestras alcalinizadas a pH rango 10,0-10,7 con cal Mycal.

**Tabla 10.** Resultados de análisis químico de solución alcalinizados con cal.

| Parámetro   | Unidad | LMP    | ECA-3   | Contenidos de Soluciones Alcalinizadas en la Planta Piloto |         |         |         |         |         |         |
|-------------|--------|--------|---------|------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|             |        |        |         | -P2-02                                                     | -P2-03  | -P2-04  | -P2-05  | -P2-06  | -P2-07  | -P2-08  |
| Ph          | pH     | 6-9    | 6,5-8,5 | 10,0                                                       | 10,3    | 10,2    | 10,1    | 10,5    | 10,4    | 10,7    |
| TSS         | mg/L   | 25     | -       | 6                                                          | 19      | 22      | 17      | 10      | 17      | 5       |
| Cr (VI)     | mg/L   | 0,08   | -       | <0,005                                                     | <0,005  | <0,005  | <0,005  | <0,005  | <0,005  | <0,005  |
| AG          | mg/L   | 16     | 5       | <0,4                                                       | <0,4    | <0,4    | <0,4    | <0,4    | <0,4    | <0,4    |
| CN total    | mg/L   | 0,8    | -       | <0,0008                                                    | <0,0008 | <0,0008 | <0,0008 | <0,0008 | <0,0008 | <0,0008 |
| CN WAD      | mg/L   | -      | 0,1     | <0,0008                                                    | <0,0008 | <0,0008 | <0,0008 | <0,0008 | <0,0008 | <0,0008 |
| Al-Total    | mg/L   | -      | 5       | 0,075                                                      | 0,161   | 0,18    | 0,216   | 0,107   | 0,111   | 0,055   |
| As-Total    | mg/L   | 0,08   | 0,1     | 0,00075                                                    | 0,00176 | 0,00215 | 0,00141 | 0,00436 | 0,00301 | 0,00328 |
| Cd-Total    | mg/L   | 0,04   | 0,01    | 0,00021                                                    | 0,00054 | 0,00046 | 0,00052 | 0,00025 | 0,00071 | 0,00044 |
| Cu-Total    | mg/L   | 0,4    | 0,2     | 0,00377                                                    | 0,00401 | 0,00391 | 0,00403 | 0,00283 | 0,00341 | 0,00237 |
| Hg-Total    | mg/L   | 0,0016 | 0,001   | 0,00019                                                    | 0,00055 | 0,00025 | 0,00032 | 0,00023 | 0,00039 | 0,00039 |
| Mn-Total    | mg/L   | -      | 0,2     | 2,60498                                                    | 1,32978 | 1,55266 | 1,65068 | 0,8631  | 0,91863 | 0,11191 |
| Pb-Total    | mg/L   | 0,16   | 0,05    | 0,0006                                                     | 0,0006  | 0,0006  | 0,0006  | 0,0006  | 0,0012  | <0,0006 |
| Zn-Total    | mg/L   | 1,2    | 2       | 0,0587                                                     | 0,2269  | 0,2205  | 0,2613  | 0,1184  | 0,2156  | 0,0669  |
| Fe Disuelto | mg/L   | 1,6    | -       | 0,3036                                                     | 0,9548  | 0,8695  | 1,4928  | 0,4494  | 1,0198  | 0,0117  |

Nota: Autoría Propia

La Tabla N.º 10 muestra los resultados producto de la alcalinización a pH entre 10,0–10,7 en las pruebas piloto, de los cuales se comenta lo siguiente:

- Las pruebas de alcalinización a partir de pH 10,0 precipitan todos los parámetros, como zinc total Zn(t) y hierro disuelto Fe(d) que estuvieron por encima de los LMP, llegando a remover el 99,25% de Zn(t), con contenido final de 0,0587 mg/L Zn(t), y una remoción de 98,94% de Fe(d), con contenido final de 0,3036 mg/l Fe(d).
- Las pruebas de alcalinización a pH 10,7 se logra a tener una remoción de 99,72% de Mn llegando a un contenido final de 0,11191 mg/L Mn, logrando contenidos por debajo de los ECA-3 (0,2 mg/l Mn); mientras que a pH 10,0; 10,1; 10,2; 10,3; 10,4 y 10,5 sólo se logra remover 93,05%; 95,63%; 95,96%; 96,34%; 97,17% y 97,75% Mn, con contenidos de 2,60498 mg/l; 1,65068 mg/l; 1,55266 mg/l; 1,32978 mg/l; 0,91863 mg/l y 0,9631 mg/l de Mn, respectivamente.

#### **4.1.9. Pruebas de acidificación con CO<sub>2</sub>**

Finalmente, se realizaron 06 pruebas de acidificación previo filtrado de abertura de poros de 15  $\mu$ m, debido a contenidos superficiales de TSS para quitar las lamas que se pasan al rebose del clarificador, esto con el propósito de evitar la redisolución de los sólidos al momento de regular el pH de la solución de rebose y posterior evaluación de tiempo de reacción y consumo de dióxido de carbono para regular el pH final de la solución tratada en un rango de 6,5– 7,8. Las condiciones de operación de la prueba de acidificación con CO<sub>2</sub> por batch fueron:

**Tabla 11.** Condiciones de pruebas de acidificación en soluciones neutralizadas.

| Código de Muestra | Peso Solución | pH inicial | Flujo CO <sub>2</sub> | Tiempo Reacción | Consumo CO <sub>2</sub> | Tiempo de Residencia | pH final |
|-------------------|---------------|------------|-----------------------|-----------------|-------------------------|----------------------|----------|
|                   | Kg            |            | L/min                 | Min             | g/m <sup>3</sup>        | Min                  |          |
| P3-1              | 13,52         | 10         | 0,5                   | 2,03            | 147,93                  | 5                    | 6,54     |
| P3-2              | 13,82         | 10,43      | 0,5                   | 1,2             | 144,7                   | 10                   | 6,63     |
| P3-3              | 15,08         | 9,97       | 0,5                   | 0,78            | 66,31                   | 6                    | 7,28     |
| P3-4              | 16,11         | 10,39      | 0,5                   | 0,8             | 124,18                  | 5,33                 | 7,76     |
| P3-5              | 15,08         | 10,16      | 0,5                   | 0,55            | 132,59                  | 10                   | 7,4      |
| P3-7              | 17,05         | 10,42      | 0,5                   | 0,9             | 117,32                  | 10                   | 7,5      |

Nota: Autoría Propia

La Tabla N° 11 presenta las condiciones de las pruebas de acidificación de soluciones neutralizadas con inyección de CO<sub>2</sub>. El flujo inyectado fue 0,50 L/min y el consumo de CO<sub>2</sub> para llegar a pH como 6,5; 6,6; 7,3; 7,8; 7,4; 7,5 en tiempos de retención de 5, 10, 6, 5, 10 minutos fue de 147,93; 144,7; 66,31; 124,18; 132,59 y 117,32 g/m<sup>3</sup>, respectivamente.

A continuación, se presenta los resultados de análisis químico por ICP de metales totales y disueltos de las muestras acidificadas a pH 6,5–7,8 comparado con los LMP y ECA-3:

**Tabla 12.** Resultados de análisis químico de muestras acidificadas por CO<sub>2</sub>.

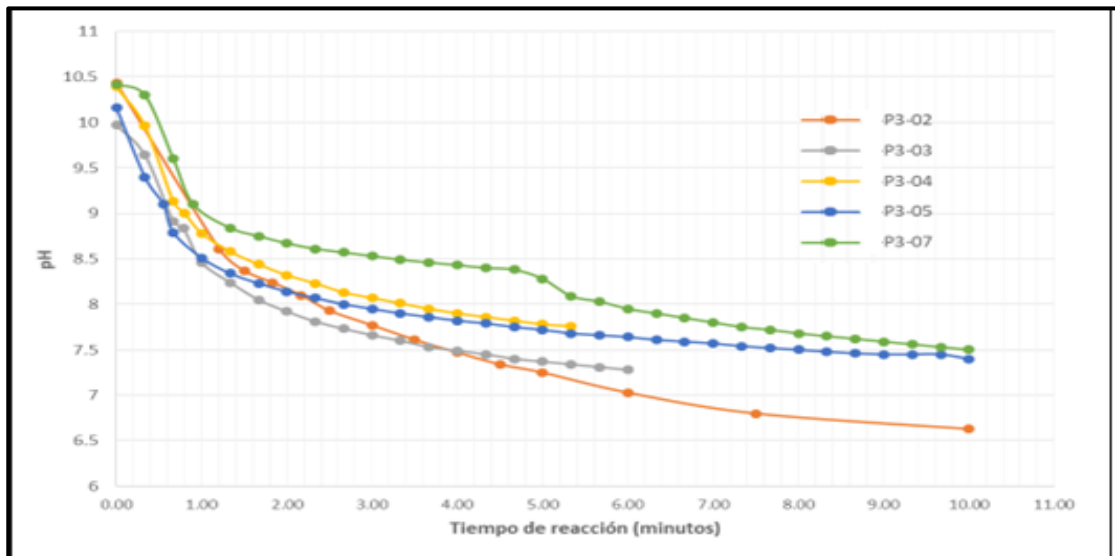
| Parámetro   | Unidad | LMP    | ECA-3   | Contenidos de Soluciones Acidificadas a la Planta Piloto |                |                |                |               |         |
|-------------|--------|--------|---------|----------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------|
|             |        |        |         | -P3-01                                                   | -P3-02         | -P3-03         | -P3-04         | -P3-05        | -P3-07  |
| pH          | pH     | 6-9    | 6.5-8,5 | 6,5                                                      | 6,6            | 7,3            | 7,8            | 7,4           | 7,5     |
| TSS         | mg/L   | 25     | -       | 16                                                       | <3             | <3             | <3             | <3            | <3      |
| Cr (VI)     | mg/L   | 0,08   | -       | <0,005                                                   | <0,005         | <0,005         | <0,005         | <0,005        | <0,005  |
| AG          | mg/L   | 16     | 5       | <0,4                                                     | <0,4           | <0,4           | <0,4           | <0,4          | <0,4    |
| CN total    | mg/L   | 0,8    | -       | <0,0008                                                  | <0,0008        | <0,0008        | <0,0008        | <0,0008       | <0,0008 |
| CN WAD      | mg/L   | -      | 0,1     | <0,0008                                                  | <0,0008        | <0,0008        | <0,0008        | <0,0008       | <0,0008 |
| Al-Total    | mg/L   | -      | 5       | 0,102                                                    | 0,134          | 0,06           | 0,122          | 0,104         | 0,081   |
| As-Total    | mg/L   | 0,08   | 0,1     | 0,00159                                                  | 0,00045        | 0,00262        | 0,00339        | 0,00106       | 0,00105 |
| Cd-Total    | mg/L   | 0,04   | 0,01    | 0,0005                                                   | 0,00018        | 0,00012        | 0,00034        | 0,00026       | 0,00049 |
| Cu-Total    | mg/L   | 0,4    | 0,2     | 0,00378                                                  | 0,01583        | 0,00791        | 0,00882        | 0,00508       | 0,01506 |
| Hg-Total    | mg/L   | 0,0016 | 0,001   | 0,00048                                                  | 0,00024        | 0,00053        | 0,0003         | 0,00032       | 0,00034 |
| Mn-Total    | mg/L   | -      | 0,2     | <b>1,94885</b>                                           | <b>0,60192</b> | <b>0,45324</b> | <b>0,57469</b> | <b>0,5936</b> | 0,16357 |
| Pb-Total    | mg/L   | 0,16   | 0,05    | 0,0009                                                   | 0,0008         | 0,0006         | 0,0006         | 0,0007        | 0,001   |
| Zn-Total    | mg/L   | 1,2    | 2       | 0,1898                                                   | 0,092          | 0,0438         | 0,1034         | 0,0916        | 0,0802  |
| Fe Disuelto | mg/L   | 1,6    | -       | 0,7916                                                   | 0,2881         | 0,1649         | 0,3965         | 0,3050        | 0,2612  |

Nota: Autoría Propia

Se puede observar en la Tabla N.º 12 que los contenidos de metales que estuvieron por encima de los LMP a pH entre 3,5–5,7, una vez alcalinizados a pH 10,5 para la precipitación de metales y luego de pasar al proceso de acidificación a pH entre 6,5–7,8, se logran observar que todos los parámetros permanecen por debajo de la normativa LMP 2010.

A continuación, se presenta la cinética de reacción de pH en un tiempo de 10 minutos después de haber inyectado el CO<sub>2</sub>:

**Figura 9.** Cinética de reacción de pH con CO<sub>2</sub> en un tiempo de 10 minutos.



Nota: Curva de cinética de regulación de pH.

La ilustración N.º 08 presenta los perfiles de comportamiento de la inyección de gas CO<sub>2</sub> en el proceso de acidificación de las soluciones tratadas en la Planta Piloto. También se aprecia que, luego de la inyección del CO<sub>2</sub> al agua alcalina, se verifica que el CO<sub>2</sub> remanente y presente aún en la solución sigue reaccionando y tiende a bajar el pH de la solución.

#### 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

##### 4.2.1. Resultados de las pruebas preliminares in situ

Finalmente, se acondicionaron las muestras diferentes a lo que ingresó a realizar las pruebas con la muestra P1-E con CO<sub>2</sub> para regular el pH final de la solución tratada en un rango de 7,8–9,2 para los envíos de análisis químico por ICP, metales totales y disueltos, cuyos resultados, comparados con los LMP y ECA-3, se presentan:

**Tabla 13. Resultados de análisis químico – P1-E comparados con LMP.**

| Parámetros       | Unidad   | Agua Ácida P1-E | Agua Tratada | LMP Cualquier Momento | LMP Promedio Anual |
|------------------|----------|-----------------|--------------|-----------------------|--------------------|
| TSS              | mg/L     | 67              | 3            | 50                    | 25                 |
| Ph               | Unid. pH | 3,38            | 7,83         | 6-9                   | 6-9                |
| CN Total         | mg/L     | < 0,0008        | < 0,0008     | 1                     | 0,8                |
| Aceites y Grasas | mg/L     | < 0,4           | < 0,4        | 20                    | 16                 |
| Arsénico Total   | mg/L     | 0,02193         | 0,00202      | 0,1                   | 0,08               |
| Cadmio Total     | mg/L     | 0,01143         | < 0,00001    | 0,05                  | 0,04               |
| Cobre Total      | mg/L     | 0,01122         | 0,01938      | 0,5                   | 0,4                |
| Cr VI            | mg/L     | < 0,003         | < 0,003      | 0,1                   | 0,08               |
| Mercurio Total   | mg/L     | < 0,00003       | < 0,00003    | 0,002                 | 0,0016             |
| Plomo Total      | mg/L     | 0,0026          | 0,0026       | 0,2                   | 0,16               |
| Zinc Total       | mg/L     | 9,1223          | 0,1009       | 1,5                   | 2                  |
| Hierro Disuelto  | mg/L     | 45,448          | 0,4383       | 2                     | 1,6                |

Nota: Autoría Propia

Los parámetros que estuvieron por encima de los LMP según Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM en la muestra cabeza de la poza P1-E son el pH, TSS, hierro disuelto y zinc total. En cuanto a los demás parámetros se alinean bajo la normativa.

De la Tabla N° 13 se logra bajar los contenidos de TSS en la solución tratada y una remoción de 98,89% de zinc total Zn (t) llegando a un valor final de 0,1009 mg/l Zn (t). En cuanto al hierro disuelto se logró una remoción de 99,04%, con un valor final de 0,4383 mg/l Fe (d), logrando valores por debajo de los LMP.

#### **4.2.2. Análisis de Cabeza – Alimentación**

A continuación, se muestran los resultados de cabeza (P1-E) que alimentaron a la Planta Piloto comparados con parámetros LMP y ECA-3:

**Tabla 14. Resultados de análisis químico de cabeza.**

| Parámetro   | Unidad | LMP    | ECA-3   | Contenidos de Cabeza - Alimentación a la Planta Piloto |          |          |          |          |          |          |         |
|-------------|--------|--------|---------|--------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
|             |        |        |         | P1-E-                                                  | P1-E-    | P1-E-    | P1-E-    | P1-E-    | P1-E-    | P1-E-    | P1-E-   |
|             |        |        |         | 1                                                      | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8       |
| pH          | Ph     | 6-9    | 6,5-8,5 | 5,7                                                    | 5,1      | 4,2      | 3,8      | 3,7      | 3,5      | 3,7      | 3,6     |
| TSS         | mg/L   | 25     | -       | 73                                                     | 50       | 63       | 63       | 46       | 57       | 52       | 51      |
| Cr (VI)     | mg/L   | 0,08   | -       | <0,005                                                 | <0,005   | <0,005   | <0,005   | <0,005   | <0,005   | <0,005   | <0,005  |
| AG          | mg/L   | 16     | 5       | <0,4                                                   | <0,4     | <0,4     | 0,4      | <0,4     | <0,4     | <0,4     | <0,4    |
| CN total    | mg/L   | 0,8    | -       | <0,0008                                                | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008 |
| CN WAD      | mg/L   | -      | 0.1     | <0,0008                                                | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008  | <0,0008 |
| Al-Total    | mg/L   | -      | 5       | 1,028                                                  | 1,93     | 2,115    | 1,831    | 0,747    | 1,859    | 1,307    | 1,37    |
| As-Total    | mg/L   | 0,08   | 0,1     | 0,02663                                                | 0,00301  | 0,0236   | 0,02279  | 0,01936  | 0,02031  | 0,02172  | 0,01804 |
| Cd-Total    | mg/L   | 0,04   | 0,01    | 0,01091                                                | 0,00024  | 0,01123  | 0,00906  | 0,00083  | 0,01049  | 0,00981  | 0,01053 |
| Cu-Total    | mg/L   | 0,4    | 0,2     | 0,04241                                                | 0,02375  | 0,04543  | 0,02859  | 0,02511  | 0,02968  | 0,02393  | 0,02315 |
| Hg-Total    | mg/L   | 0,0016 | 0,001   | 0,00033                                                | 0,00015  | 0,00041  | 0,00032  | 0,00026  | 0,00018  | 0,00039  | 0,00043 |
| Mn-Total    | mg/L   | -      | 0,2     | 39,16742                                               | 37,49586 | 36,36537 | 38,38754 | 37,76163 | 38,37833 | 32,41148 | 39,6553 |
| Pb-Total    | mg/L   | 0,16   | 0,05    | 0,0062                                                 | 0,0064   | 0,0056   | 0,0053   | 0,0041   | 0,006    | 0,0076   | 0,0037  |
| Zn-Total    | mg/L   | 1,2    | 2       | 6,1675                                                 | 7,7906   | 7,1871   | 6,6314   | 6,4548   | 6,6566   | 6,5802   | 8,004   |
| Fe Disuelto | mg/L   | 1,6    | -       | 24,1521                                                | 28,67    | 28,2642  | 21,0574  | 23,5155  | 24,9014  | 32,9464  | 4,021   |

Nota: Autoría Propia

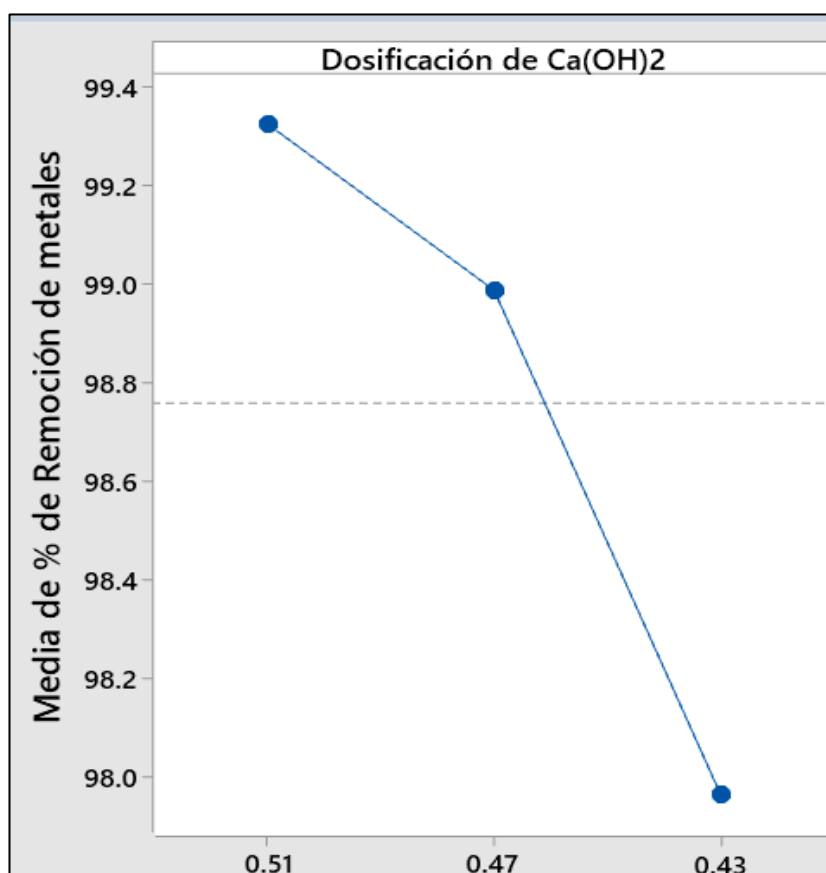
En la Tabla N.º 14 se muestran ocho contenidos de cabeza que alimentaron a la Planta Piloto, de los cuales los parámetros que estuvieron por encima de los LMP, según Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM, son el pH, TSS, hierro disuelto y zinc total; en cuanto a los demás parámetros, se alinean bajo la normativa.

Es importante mencionar contenidos considerables de manganeso (Mn) que están por encima (32-40 mg/l Mn) si los comparamos con los ECA-3, según el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM; el aluminio y demás parámetros inorgánicos se alinean bajo la normativa.

#### **4.2.3. Influencia de la dosificación de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas**

Con el software como Minitab analizamos los datos obtenidos de los experimentos respecto a la influencia de la dosis de lechada de cal. Minitab nos permite visualizar el tipo de influencia en la remoción efectiva de metales pesados como el manganeso, el plomo y el zinc, además de elevar el pH. Este tipo de análisis permite establecer relaciones precisas entre la dosificación de cal y la eficiencia del tratamiento realizado en las pruebas.

**Figura 10.** Gráfica de porcentaje de remoción de metales vs. dosificación de  $\text{Ca(OH)}_2$



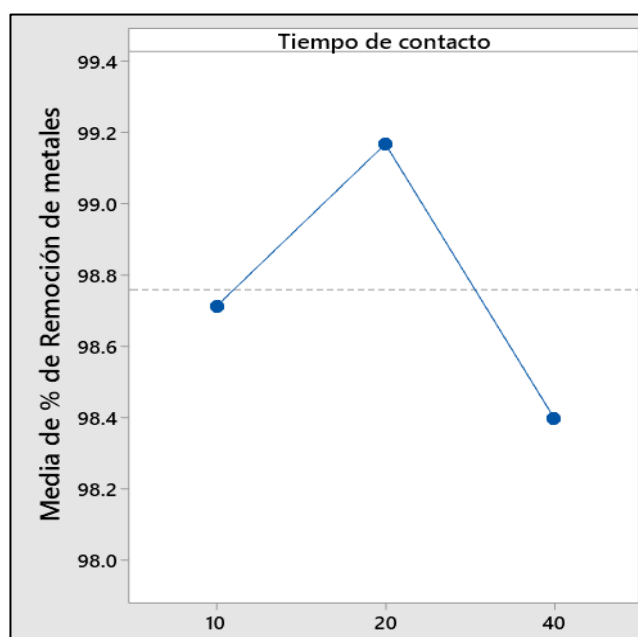
Nota: Figura interacción de dosificación de cal.

A partir de la gráfica, se determinó que con una dosificación de  $0,43 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Ca(OH)}_2$  se obtuvo una remoción de 97,96 %, incrementándose a 98,99% con  $0,47 \text{ kg/m}^3$  y alcanzando un máximo valor de 99,32% con  $0,51 \text{ kg/m}^3$ . Esto nos confirma que mayores dosis de lechada de cal mejora la eficiencia de remoción de metales; lo que indica que la mayor precipitación se realiza a pH alcalino de 10,5. Se tiene un porcentaje 98,75% de media de remoción de metales.

#### 4.2.4. Influencia del tiempo de contacto en el tratamiento de aguas ácidas

Esta prueba consistió en modificar el tiempo de contacto, manteniendo constantes las dosificaciones de lechada de cal durante períodos de acondicionamiento de 10, 20 y 40 minutos.

**Figura 11.** *Gráfica de porcentaje de remoción de metales vs. tiempo de contacto.*



Nota: Figura interacción de tiempo de contacto.

La Figura 11 muestra la influencia que tiene el tiempo de contacto de lechada de cal en la media de porcentaje de remoción de metales. Se logró la mayor eficiencia de remoción de metales en un lapso de 20 minutos (99,20 %), mientras que en 10 minutos presenta una media de remoción de 98,70 %. El rendimiento de la lechada de cal decae cuando se prolonga el tiempo a 40 minutos, con una media de remoción final de 98,40 %.

#### **4.2.5. Interacción de dosificación de lecha de cal vs tiempo de contacto en el tratamiento de aguas ácidas**

Para ver si la interacción de la dosificación de lechada de cal y el tiempo de contacto tiene influencia en el porcentaje de remoción, se planificaron las pruebas realizando dos replicas con cada uno de los niveles.

A continuación, presentamos los resultados de las pruebas de tratamiento de aguas ácidas de mina.

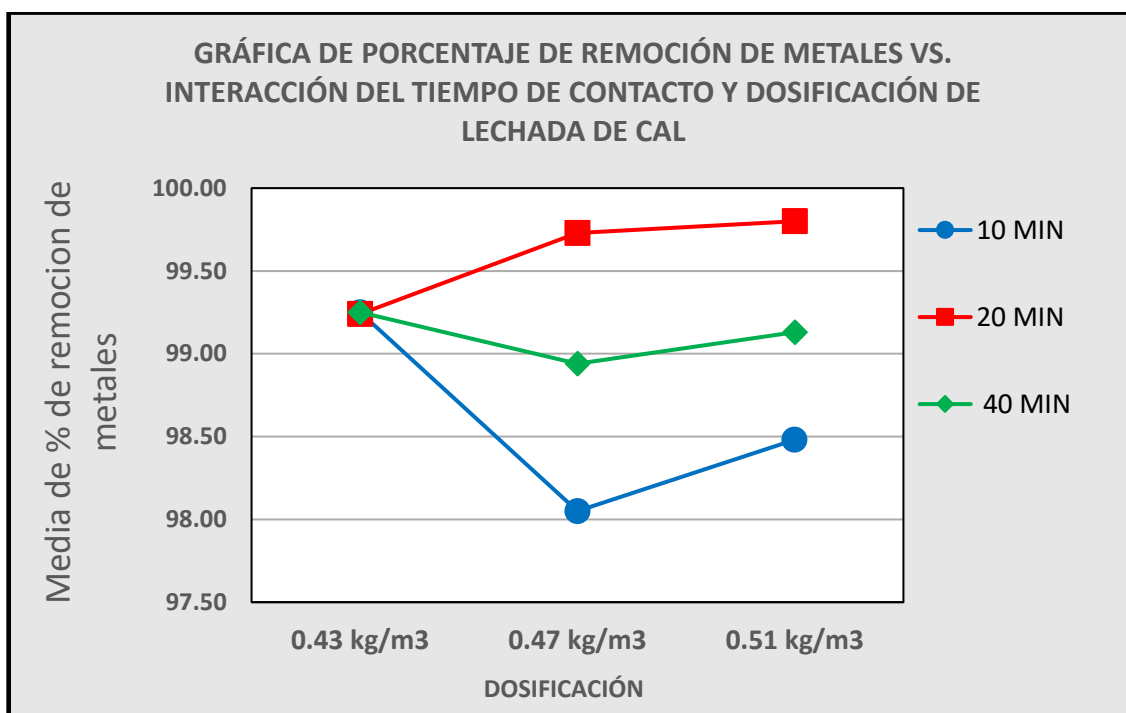
**Tabla 15.** Interacción de tiempo de contacto vs dosificación de lechada de cal

| Tiempo de contacto | Dosificación de lechada de cal |                        |                        |
|--------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|
| Min                | 0.43 kg/m <sup>3</sup>         | 0.47 kg/m <sup>3</sup> | 0.51 kg/m <sup>3</sup> |
| 10                 | 99.25                          | 98.05                  | 98.48                  |
| 20                 | 99.24                          | 99.73                  | <b>99.80</b>           |
| 40                 | 99.25                          | 98.94                  | 99.13                  |

Nota: Autoría Propia

En la tabla observamos que la interacción de la lechada de cal, dosificando a 0,51 kg/m<sup>3</sup> versus 20 minutos de tiempo de contacto, tiene una excelente remoción de metales; mientras que las interacciones, dosificando 0,47 kg/m<sup>3</sup> versus tiempo de contacto de 10 minutos, presenta una pésima remoción de metales.

**Figura 12.** Gráfica de porcentaje de remoción de metales vs. interacción del tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal.

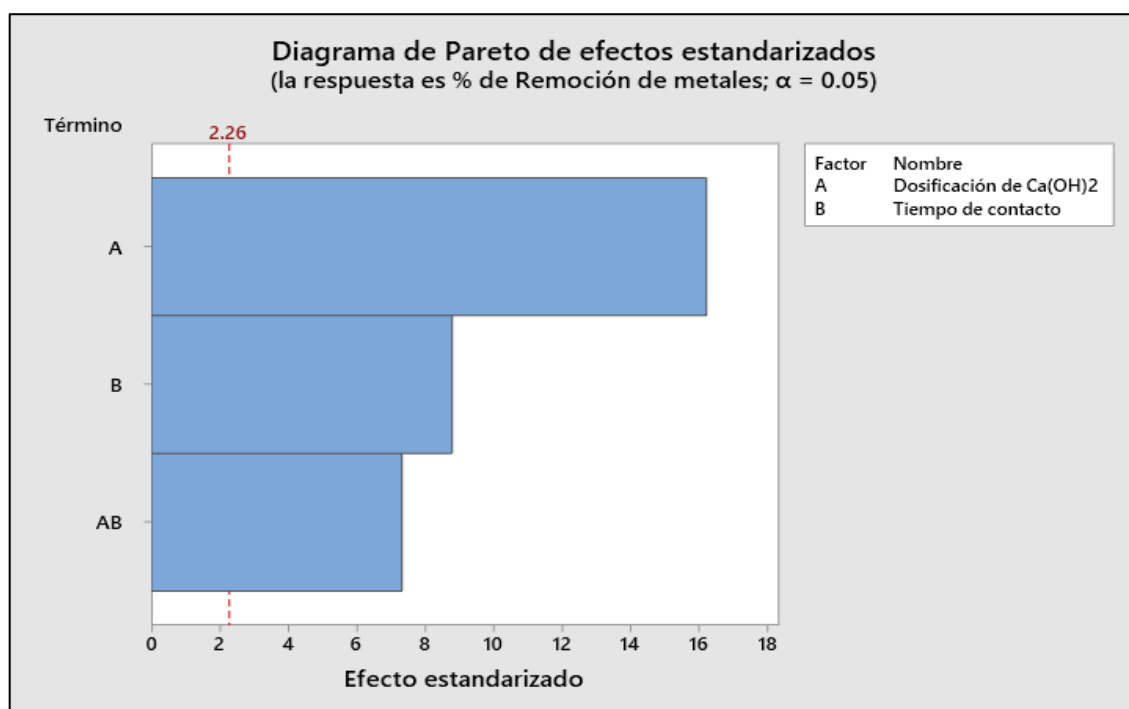


Nota: Figura de interacción de variables con el porcentaje de remoción de metales

Como se observa, cuando se extiende el tiempo de contacto, el porcentaje de remoción disminuye. La mayor precipitación se dio con 20 minutos de contacto y 0,51 kg/m<sup>3</sup> de dosificación de lechada de cal, con un porcentaje de (99,80 %) de remoción de metales.

A través del diagrama de Pareto, en la figura se observa que el efecto principal, que es muy significativo, es la dosificación de lechada de cal. En segundo lugar está el tiempo de contacto; además, el efecto de la interacción de ambos factores sobrepasa el punto crítico del diagrama de Pareto y tiene influencia en el porcentaje de remoción de metales. Esto lo podemos afirmar categóricamente por el punto crítico del t de Student, que es 2,26 del diagrama y con un 95% de significancia.

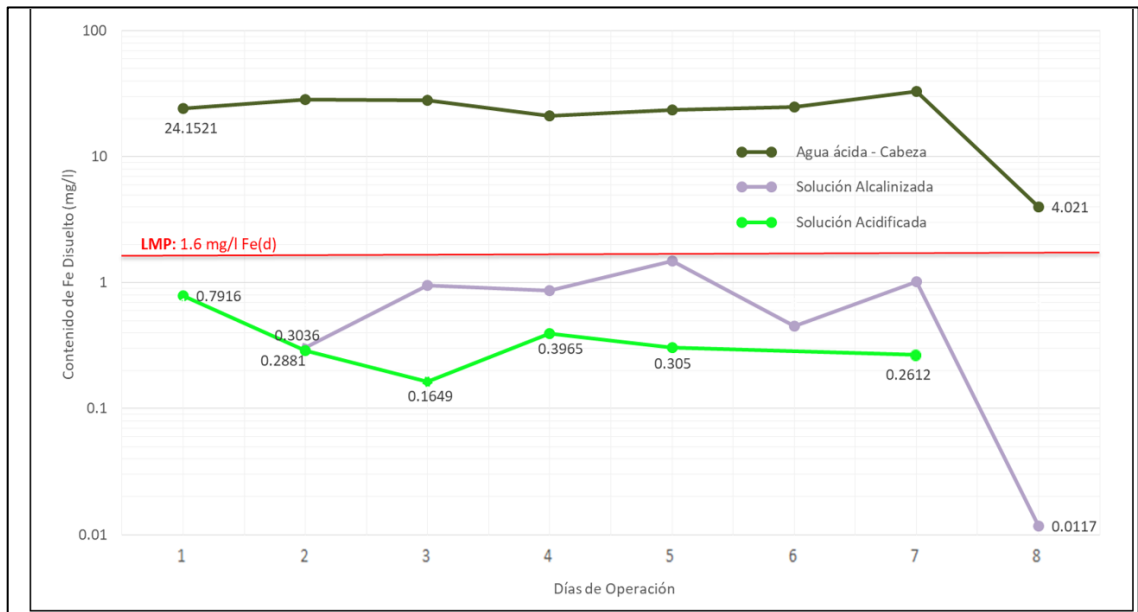
**Figura 13.** *Diagrama de Pareto.*



Nota: Figura del análisis de las variables en el diagrama de Pareto.

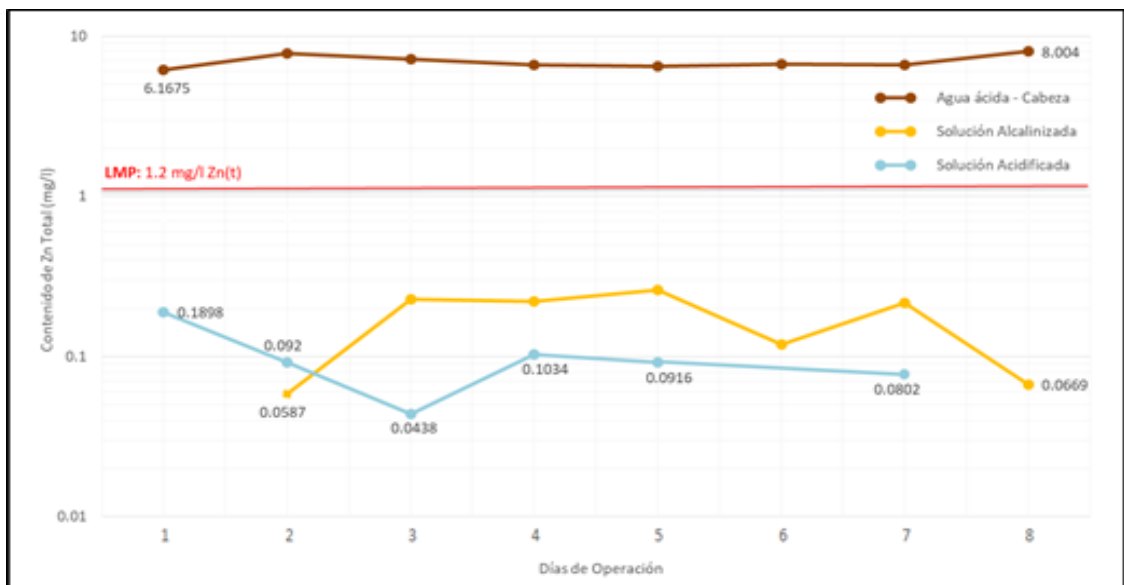
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de las muestras tratadas en función del ingreso y del agua clarificada; presentan los perfiles expuestos en los siguientes gráficos:

**Figura 14.** Comportamiento de Hierro en la Planta Piloto.



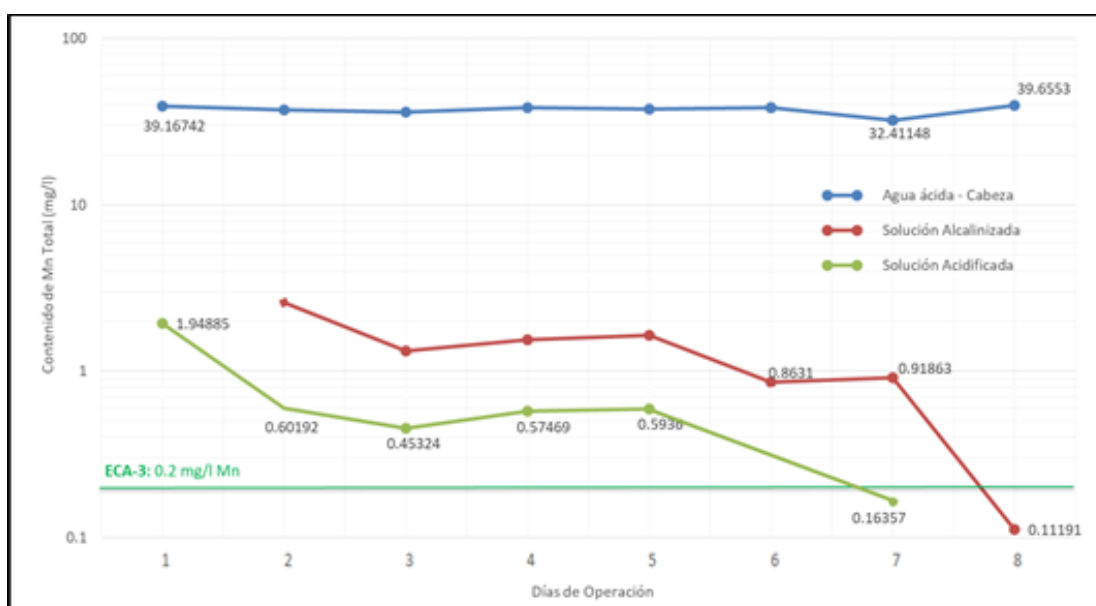
Nota: Figura del análisis hierro disuelto

**Figura 15.** Comportamiento del Zinc en la Planta Piloto



Nota: Figura del análisis zinc total.

**Figura 16.** Comportamiento de Manganeso en la Planta Piloto



Nota: Figura del análisis manganeso total.

La ilustración N° 11 presenta el comportamiento del manganeso (Mn) en la operación de la Planta Piloto. Se observa concentraciones superiores a 0,2 ppm (ECA-3), debido a la presencia de pequeñas fracciones metálicas que están siendo arrastradas en la solución del overflow del reactor clarificador. Se debe mencionar que no se inyectó aire al sistema de precipitación metálica, puesto que los resultados de las pruebas de laboratorio lo indicaron así.

#### 4.3. Prueba de hipótesis

Existe suficiente evidencia estadística obtenida de las pruebas realizadas de acuerdo con el diseño experimental que nos permite afirmar que el tiempo de neutralización y precipitación, así como la dosificación, influyen significativamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza de la poza P1-E.

Por ello se presenta a continuación la hipótesis nula y la hipótesis alternativa.

**H<sub>0</sub>:** La evaluación del tiempo de contacto y dosificación de la lechada de cal **NO** influye significativamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.

**H<sub>a</sub>:** La evaluación del tiempo de contacto y dosificación de la lechada de cal influye significativamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.

**Estadístico prueba:**

Como prueba estadística se utiliza el análisis de varianza, para lo cual se corrieron los resultados en el paquete estadístico del Minitab, y además se presenta un nivel de significancia:  $\alpha = 0,05$ .

**Tabla 16. Análisis de varianza**

| Fuente                                               | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------------------------------------------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Modelo                                               | 8  | 9,7544    | 1,21930   | 71,72   | 0,000   |
| Lineal                                               | 4  | 7,8700    | 1,96749   | 115,73  | 0,000   |
| Dosificación Ca(OH) <sub>2</sub>                     | 2  | 6,0635    | 3,03174   | 178,34  | 0,000   |
| Tiempo de contacto                                   | 2  | 1,8065    | 0,90324   | 53,13   | 0,000   |
| Interacciones de 2 términos                          | 4  | 1,8844    | 0,47111   | 27,71   | 0,000   |
| Dosificación Ca(OH) <sub>2</sub> *Tiempo de contacto | 4  | 1,8844    | 0,47111   | 27,71   | 0,000   |
| Error                                                | 9  | 0,1530    | 0,01700   |         |         |
| Total                                                | 17 | 9,9074    |           |         |         |

Nota: Propia Autoría

**Valor de decisión: (Si  $t_c > t_t$  se acepta la H<sub>a</sub>)**

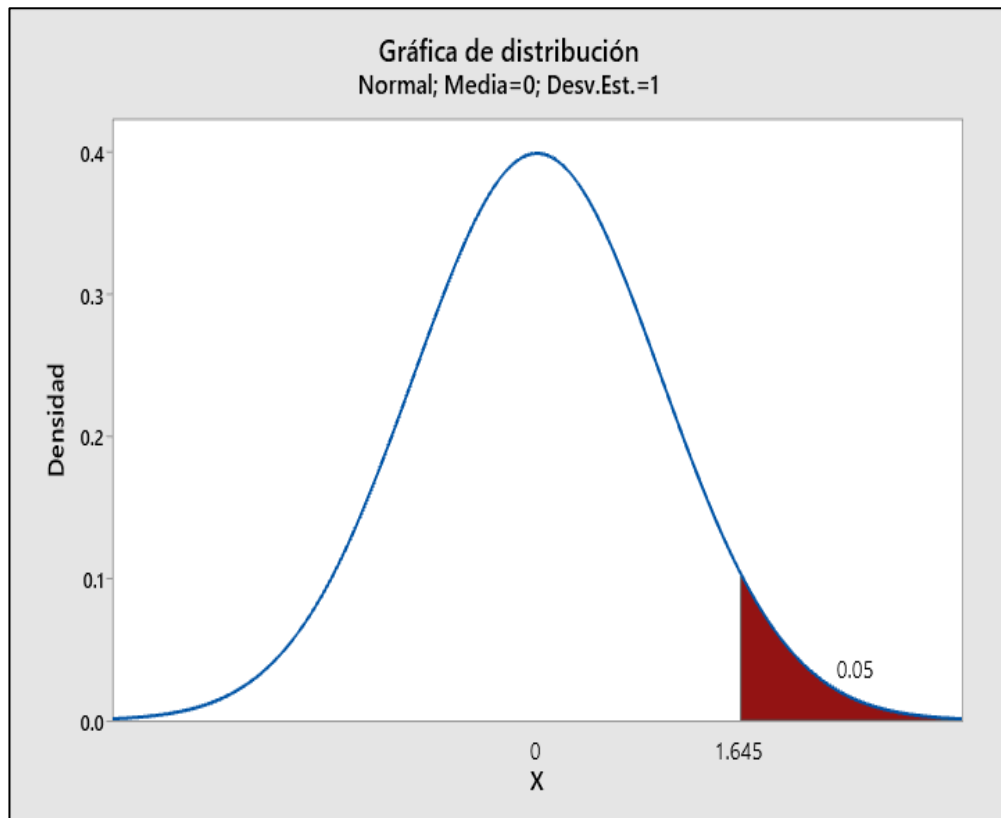
- Para la Dosificación de Ca(OH)<sub>2</sub>  $F_c = 178,34$  y  $F_{tabla} = 1,645$   
 $t_c > t_t$  reemplazando valores  $178,34 > 1,645$
- Para el tiempo de contacto:  $F_c = 53,13$  y  $F_t = 1,645$

$t_c > t_t$  remplazando valores  $53,13 > 1,645$

- Para la interacción de las variables de dosificación de  $\text{Ca(OH)}_2$  y tiempo de contacto:  $F_c = 27,71$  y  $F_t = 1,645$

$t_c > t_t$  remplazando valores  $27,71 > 1,645$

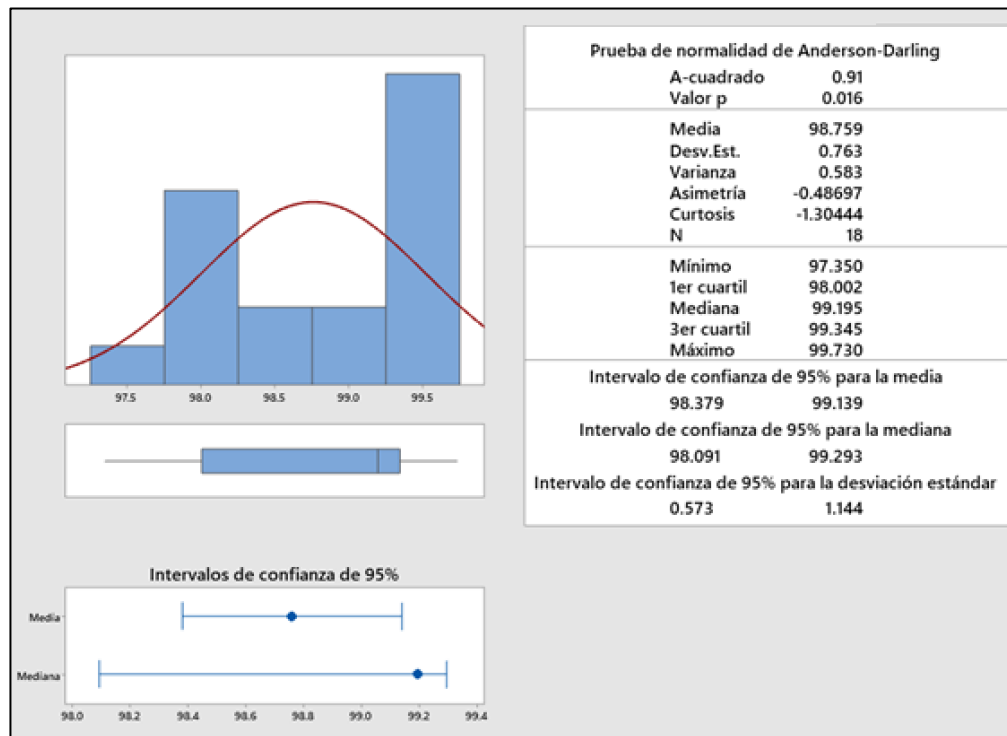
**Figura 17.** Gráfica de distribución



Nota: Figura del análisis de grafica de distribución con cola a la derecha.

Como 178,34; 53,13 y 27,71 son mayores que el punto crítico 1,645, se rechaza la hipótesis nula y acepta la hipótesis alterna, debido a que se encuentran en la zona de la hipótesis alterna.

**Figura 18.** Informe de resumen del tratamiento de aguas ácidas de mina.



Nota: Figura de los datos de prueba de normalidad de acuerdo a Darling.

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu = 80$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu \neq 80$

✓ **Valor T:** 104,25

✓ **Valor p:** 0,000

### Decisión:

Se acepta la hipótesis alterna.

### Conclusión:

Existe suficiente evidencia para afirmar que la dosificación de  $\text{Ca(OH)}_2$  y el tiempo de contacto influyen en el tratamiento de aguas ácidas de mina del proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica - 2024, con 95% de significancia.

#### 4.4. Discusión de resultados

- (Mateo Cruz, 2022), en su tesis intitulado “Reducción de manganeso mediante la dosificación de lechada de cal en el agua de mina de la Unidad Minera Huaron” evaluó la reducción de manganeso presente en el agua de mina de la unidad minera Huaron, mediante la dosificación de lechada de cal en la Planta de Tratamiento de Aguas de mina.

Como resultados se logró la reducción de manganeso dando como resultado la concentración de manganeso promedio en el agua sin tratar de 46,07 ppm y en el agua tratada 0,098 ppm. Concluyó que la dosificación de lechada de cal tiene efectos positivos en la reducción de manganeso en el agua de mina de la unidad Huarón 2019; el cual fue de un 99,76% promedio; concentración de Mn = 0,098 ppm promedio; pH de 10,5 a más —que es el óptimo— y un caudal de dosificación de lechada de cal de 3,3 l/seg.

En el estudio, los parámetros que estuvieron por encima de los LMP según Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM, en la muestra de la poza P1-E, fueron el pH, TSS, hierro disuelto y zinc total; en cuanto a los demás parámetros, se alinean bajo la normativa. Con las dosificaciones de lechada de cal se logró observar una remoción de 98,89 % de zinc total, llegando a un valor final de 0,1009 mg/l Zn(t); en cuanto al hierro disuelto, se logró una remoción de 99,04%, logrando un valor final de 0,4383 mg/l Fe(d), logrando valores por debajo de los LMP.

El resultado de nuestro estudio coincide con el de Mateo Cruz, 2022 en cuanto a la utilización de cal para la remoción de metales —elevando el pH > 10,5—, logrando valores por debajo de los LMP. En esta investigación, el ratio de consumo de cal (Mycal) para llegar a un pH cercano a 10,5 en la muestra P1-E fue de 0,51 kg/m<sup>3</sup>. La lechada de cal fue preparada al 15%; la granulometría de la cal utilizada

en las pruebas de alcalinización fue 42% -200m. Esta cal presentó una pureza de 65% de cal útil.

- (Rabanal Valenza, 2021) en su tesis intitulado “Operación en la planta de tratamiento de aguas ácidas en la UM Anabi S.A.C.” tratar las aguas ácidas de mina, de la Unidad Minera Anabi S.A.C, derivados del botadero y tajo.

El agua ácida fue tratada con lechada de cal, neutralizándose hasta lograr un valor del pH que oscila entre 10,0 y 10,5, logrando formar hidróxidos de hierro y cobre. En el siguiente reactor se añade floculante con el objetivo de remover el factor de metales pesados en el efluente.

Como conclusiones, se indicó que el ratio de cal fue de 0,74–1,85 kg/m<sup>3</sup>, el floculante fue Chemlok 20919 preparado al 0,1%, el tiempo de residencia de la solución acida en las pruebas fue de 60 minutos en la etapa de neutralización y de 5 minutos en la etapa de floculación.

En el desarrollo de las pruebas se utilizó la cal adquirida de Mycal para la alcalinización del agua ácida de la poza P1-E. Presentó un tiempo de contacto diferente al de la investigación de (Rabanal Valenza, 2021), que fue de 60 minutos. Para esta investigación, el tiempo de contacto fue de 20 minutos, alcanzando un pH de 10,5 y presentando una remoción de metales de 99,20% en las aguas ácidas de mina del proyecto Esperanza.

- El análisis en conjunto de los factores tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal arrojó que la dosificación de lechada de cal es el factor más significativo en la remoción de metales, seguido por el tiempo de contacto, que tuvo un impacto menor, aunque igualmente significativo. Asimismo, la interacción entre ambos factores ocupó el tercer orden de influencia, indicando que el efecto de una variable depende de la otra; por lo tanto, no es posible optimizar ambas variables de manera

independientes, sino que ambas deben optimizarse de manera conjunta. Este resultado concuerda con lo expuesto por ( Fernández & Pérez, 2023, pág. 8), quienes establecen que, en el tratamiento de aguas acidas de mina, la dosis de lechada de cal constituye el factor principal y eficiente en la remoción de metales.

## CONCLUSIONES

1. El tiempo de contacto de 20 minutos en el tratamiento de las aguas ácidas de mina, logró un 99,20 % de remoción de metales a un pH de 10,4–10,7. Al ampliar el tiempo a 40 minutos, se generó una redisolución de los metales precipitados.
2. La dosificación de lechada fue un factor determinante en el tratamiento de aguas ácidas de mina logrando una precipitación de 99,32 % en los metales presentes en la muestra inicial obtenida de la población poza P1-E. La ratio de consumo de cal es de  $0,51 \text{ kg/m}^3$ , preparada al 15% en peso. En promedio se obtuvo 98,75% de media de remoción de metales.
3. El efecto de la interacción de la dosificación de lechada de cal y tiempo de contacto en la precipitación de los metales presentes en las aguas ácidas del proyecto minero Esperanza fue positiva. Se alcanzó el mayor porcentaje de remoción en la combinación de  $0,51 \text{ Kg/m}^3$  vs 20 min. (99,80%); mientras que con  $0,47 \text{ Kg/m}^3$  vs 10 min. la remoción es la más baja (98,05%).

## **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda realizar pruebas piloto con un tipo de cal de pureza 80% CaO y granulometría P80 malla -200, esto con la intención de mejorar la calidad en la preparación de la lechada de cal y evitar futuros riesgos e impactos al sistema de bombeo de lechada de cal (reducción de costos de mantenimiento de equipos).
2. Realizar pruebas a nivel piloto con NaOH, para establecer parámetros comparativos respecto al uso de cal, como: consumo de agente neutralizante, generación de sólidos precipitados, turbidez de solución tratada, grado de precipitación metálica, etc.
3. Realizar la caracterización de diferentes tipos de cal a usarse en la precipitación metálica de la poza P1-E, como: porcentaje de cal útil, granulometría y contenido de insolubles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fernández, , M., & Alberto Pérez, C. (2023). *Uso de Cal en el Tratamiento de Aguas Ácidas en la Minería: Efectos y Beneficios*. Revista de Tecnología y Medio Ambiente.
- Rodríguez, J., & López, M. (2023). *Coagulación y floculación en el tratamiento de aguas ácidas de mina*. Revista Internacional de Gestión Ambiental.
- Zamora Echenique, G., & Trujillo Lunario, E. (2016). *Planta de Tratamiento en Interior Mina de las Aguas Ácidas de la Mina San José - Oruro - Bolivia*. Revista de Medio Ambiente y Minería, 7.
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje acido de mina*. Madrid, España: Instituto Geologico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación Introducción a la metodologia científica*. Caracas - Republica Bolivariana de Venezuela: Episteme, C.A.
- Ayala Cercado, R. C. (2018). *Influencia de la dosificación de cal en el tratamiento de las aguas ácidas de la quebrada Mesa de Plata Hualgayoc – 2018*. Cajamarca - Perú: Repositorio de la Universidad Privada del Norte.
- Bunge, M. (2002). *Epistemología*. Barcelona, España: Siglo XXI.
- Calderón de Alvarado, J. M., & Tuiro Salvador, M. C. (2021). *Precipitación de fierro y manganeso secuencial de efluentes*. Lima, Peru: Institución de invetigación de la facultad de minas, metalurgia y ciencias geograficas.
- Castillo, C. (2024). *Tratamiento de Aguas Ácidas mediante Lodos de Alta Densidad (HDS)*.
- Chaparro Leal, L. T. (2014). *Drenajes ácidos de mina formación y manejo*. ESAICA, 53.
- Díaz Riopa, F., Amorrortu Barreda,, J., & Fernández Álvarez,, P. (2022). *Tratamiento de aguas ácidas de mina*. Dialnet. Recuperado de Dialnet.
- Fernandez Rubio , R., Baquero Ubeda, J. C., Lorca Fernández, D., & Verdejo Serrano, J. (2001). *Tratamiento de aguas ácidas de mina*. España: Instituto Geológico y Minero de España.

- Flores Enao, D. L., & Herrera Salinas, B. S. (2022). *Evaluación del efecto del hidróxido de calcio (cal apagada) en la estabilización del pH de aguas desembocadas del río Millojahuirá en el embalse Pasto Grande, Moquegua – 2022. Huancayo - Perú*: Repositorio de la Universidad Continental.
- Gutierrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Hernandes Sampieri, R., Fernandez Collado , C., & Baptista Lucio, P. (1997). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*. Colombia: Panamericana Formas e Impresos S.A.
- Karina, E. C. (2022). *Remoción de metales en efluentes de relaveras. Huancayo, 2022*: Repositorio de la Universidad Continental.
- Mamani Canqui, A. (2024). *Tratamiento de Efluentes Ácidos por Neutralización Coagulante Dinámica para la Optimización del Proceso*. Revista de Tecnología Ambiental.
- Martínez, , , & González,, P. (2023). *Coagulación y Floculación en el Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina: Aplicaciones y Eficiencia*. Revista de Ingeniería Ambiental.
- Mateo Cruz, N. K. (2022). *Reducción de manganeso mediante la dosificación de lechada de cal en el agua de mina de la Unidad Minera Huarón. Pasco - Perú*: Repositorio de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) del Perú. (2017). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM*. Lima, Perú: "El Peruano".
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2010). Ministerio del Ambiente del Perú. (2010). *Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM - Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas*. Recuperado de MINAM.
- N.Kerlinger , F. (1975). *Investigación del comportamiento: técnicas y metodología*. Mexico: Nueva Editorial Interamericana.

- Panduro Macedo, D. O. (2019). *Estudio del tratamiento de aguas ácidas proveniente de los niveles (socavones) de una compañía minera. Arequipa - Perú*: Repositorio de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Peña Neira, S., & Araya Meza, P. (2021). *Agua de contacto, efecto en la minería y el medioambiente*. Chile: Revista de la facultad de Derecho .
- Peñuelas, M. A. (2010). *MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN*. Mexico: D.R. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Peruano, E. (2010). *Decreto Supremo N° 010-2010 MINAM*. El Peruano.
- Rabanal Valenza, D. M. (2021). *Operación en la planta de tratamiento de aguas ácidas en la UM Anabi S.A.C. Arequipa - Perú*: Repositorio de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Shun Anderson, B., & Vilcazan Mamani, E. (2021). *Tratamiento de drenaje ácido de minas mediante humedales artificiales*. Lima: Repositorio de la Universidad Privada del Norte.
- Tamayo y Tamayo, M. (2000). *El proceso de la investigación científica*. Mexico: Limusa.
- Tucto Ambrosio, R. A. (2019). *Optimización del consumo del floculante para el tratamiento del aluminio y manganeso del agua de mina Unidad Minera Orcopampa - Buenaventura - Arequipa, 2019. Pasco - Perú*: Repositorio de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Tuset, S. (2024). *Tratamiento de aguas ácidas en minería*. Condorchem. Recuperado de Condorchem.

## **ANEXOS**

## ANEXOS 1

**Tabla 17.** *Instrumentos de recolección de datos*

| Herramienta | Descripción           | Definición                                                                                                                                                 |
|-------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Equipos     | Balanza               | Instrumento utilizado para medir la masa o peso de un objeto. Se emplea para pesar con precisión los reactivos y muestras en la preparación de soluciones. |
|             | Tanque de preparación | Recipiente o contenedor utilizado para preparar y mezclar soluciones, como las soluciones o reactivos                                                      |
|             | Peachimetro           | Instrumento utilizado para medir el pH de una solución. Permite determinar la acidez o alcalinidad de una muestra.                                         |
|             | Potenciómetro         | Instrumento que mide la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito. Se utiliza para medir el pH de manera precisa.                  |
|             | Turbidímetro          | Instrumento que mide la turbidez de una solución, es decir, la cantidad de partículas suspendidas que dispersan la luz a través de la muestra.             |
|             | Agitador mecánico     | Dispositivo que agita o mezcla de forma mecánica las soluciones para asegurar una homogeneización adecuada.                                                |
|             | Cronometro            | Instrumento que mide y registra el tiempo transcurrido con precisión.                                                                                      |
| Materiales  | Botellas de plástica  | Recipientes hechos de material plástico utilizados para almacenar y transportar soluciones.                                                                |
|             | Cuaderno de campo     | Libro o libreta donde se registran las observaciones, mediciones y datos obtenidos durante los experimentos o análisis de pruebas.                         |
|             | Cámara                | Dispositivo que captura imágenes o videos de los procesos y procedimientos realizados en las pruebas en laboratorio o campo.                               |
|             | Baldes                | Recipientes de mayor tamaño, generalmente de plástico, utilizados para contener y transportar soluciones o muestras.                                       |

Nota: Autoría Propia

**Tabla 18. Matriz de consistencia**

| EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE CONTACTO Y DOSIFICACIÓN DE LA LECHADA DE CAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA DEL PROYECTO MINERO ESPERANZA EN SAN PEDRO DE CORIS, HUANCAMELICA - 2024.  |                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PROBLEMA GENERAL                                                                                                                                                                             | OBJETIVO GENERAL                                                                                                                                                                     | HIPOTESIS GENERAL                                                                                                                                                                                                      | VARIABLES                                                                                                             | METODOLOGIA                                                                                                                                                                                                                                                            |
| ¿Cómo evaluar el tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal para el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024? | Evaluar el tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024. | La evaluación del tiempo de contacto y dosificación de lechada de cal influye significativamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024. | VARIABLE INDEPENDIENTE                                                                                                | Enfoque investigación cuantitativa.<br>Tipo de investigación aplicada.<br>Nivel explicativo.<br>Población: Agua acida del proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris<br>Muestra: 1,5 m³ de agua acida de mina de la población proporcionada por la empresa minera |
|                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                        | Evaluación del tiempo de contacto y lechada de cal<br><b>INDICADORES</b><br>- Tiempo<br>- Dosificación lechada de Cal |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| PROBLEMAS ESPECIFICOS                                                                                                                                                                        | OBJETIVOS ESPECIFICOS                                                                                                                                                                | HIPOTESIS ESPECIFICA                                                                                                                                                                                                   | VARIABLE DEPENDIENTE                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| ¿Cómo el tiempo de contacto de lechada de cal influye en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024?                  | Determinar el tiempo de contacto de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.             | El tiempo de contacto influye directamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| ¿Cómo la dosificación de lechada de cal influye en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024?                        | Determinar la dosificación de lechada de cal en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.                   | La dosificación de lechada de cal influye directamente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el proyecto minero Esperanza en San Pedro de Coris, Huancavelica – 2024.                                           | Tratamiento de aguas ácidas de mina<br><b>INDICADORES:</b><br>- % Remoción de metales (ppm)<br>- pH                   |                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Nota: Autoría propia

## ANEXOS 2

### Fotografía N° 01:

Realización de las pruebas de tratamiento de aguas ácidas de mina



### Fotografía N° 02:

Planta piloto de aguas ácidas de mina



**Fotografía N° 03:**

Medición de pH, ORP y turbidez del agua ácida



**Fotografía N° 04:**

Medición de pH y turbidez en la solución final



**Fotografía N° 05:**

Pruebas de acidificación con gas CO



**Figura 19. Certificación de calibración de equipos**



PRECISIÓN & TECNOLOGÍA a su servicio

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

010-00497-CR-OFILAB-22

**1. IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO / INSTRUMENTO**

|                      |                                |
|----------------------|--------------------------------|
| Equipo / Instrumento | : Medidor de pH                |
| Marca                | : HANNA                        |
| Procedencia          | : RUMANIA                      |
| Modelo               | : HI 8424                      |
| Serie                | : 04020149101                  |
| Código / ID          | : No indica                    |
| Resolución           | : 0.01 PH                      |
| Fecha de calibración | : Lima, 29 de octubre del 2023 |

Los resultados del certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones.

Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

OFILAB PERÚ S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

**2. IDENTIFICACIÓN DEL ELECTRODO DE PH**

|             |             |
|-------------|-------------|
| Marca       | : No indica |
| Modelo      | : HI1230    |
| Nº de Serie | : No indica |

Ofilab Perú S.A.C.



Ing. Rosario Valverde Veramendi  
Departamento de Calidad  
CIP 252413

Ofilab Perú S.A.C.



Ing. José Torres Flores  
Departamento de Metrología  
CIP 252398



PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACION DE OFILAB S.A.C.

Telf: (01) 586-6400 / Cel: 997 771 497  
Jr. San Luis N°341 - Urb San Carlos - Comas  
E-mail: atcmetrologia@ofilab.com.pe / Web: www.ofilab.com.pe

Página 1 de 2

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

010-00507-CR-OFILAB-22

### 1. IDENTIFICACIÓN DEL EQUIPO / INSTRUMENTO

Equipo / Instrumento : TURBIDÍMETRO  
Marca : EZODO  
Procedencia : CHINA  
Modelo : TUB-430  
Serie : 5000330  
Código / ID : No indica  
Rango : 0 NTU - 1000 NTU  
Fecha de calibración : Lima, 12 de Septiembre del 2023

Los resultados del certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones.

Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

OFILAB PERÚ S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que

Ofilab Perú S.A.C.

Ing. Rosario Valverde Veramendi  
Departamento de Calidad  
CIP 252413

Ofilab Perú S.A.C.

Ing. José Torres Flores  
Departamento de Metrología  
CIP 252398



### 2. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

- La calibración se realiza de acuerdo al Method EPA 180.1 - Determination of turbidity by Nephelometry - EPA; al manual

### 3. LUGAR DE CALIBRACIÓN

Laboratorio - Instalaciones de Ofilab Perú S.A.C.

PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACION DE OFILAB S.A.C.

Telf: (01) 586-6400 / Cel: 997 771 497  
Jr. San Luis N°341 - Urb San Carlos - Comas  
E-mail: atcmetrologia@ofilab.com.pe / Web: www.ofilab.com.pe

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

010-00507-CR-OFILAB-22

### 4. CONDICIONES AMBIENTALES

|                     |            |      |    |
|---------------------|------------|------|----|
| Temperatura (°C)    | 25°C ± 2°C |      |    |
|                     | Inicial :  | 25.6 | °C |
|                     | Final :    | 25.6 | °C |
| Humedad Relativa(%) | 57% ± 5%   |      |    |
|                     | Inicial :  | 57   | %  |
|                     | Final :    | 57   | %  |

### 5. TRAZABILIDAD

| Trazabilidad                                   | Patrón utilizado                                                                                                                                        | Certificado de calibración |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Patrones de Turbidez<br>MARCA: HACH<br>METROIL | 10 NTU - COMMODITY<br>NUMBER: 2961801                                                                                                                   | 2971205 lot A2164          |
|                                                | 20 NTU - COMMODITY NUMBER:<br>2684801                                                                                                                   | 2971205 lot A2164          |
|                                                | 100 NTU COMMODITY NUMBER:<br>2684901                                                                                                                    | 2971205 lot A2158          |
|                                                | 800 NTU COMMODITY NUMBER:<br>2660501                                                                                                                    | 2971205 lot A2164          |
| TERMÓMETRO<br>INACAL                           | Termómetro con indicación digital,<br>Marca: Delta OHM, Serie del<br>Equipo: 22003898, Serie del<br>sensor A: 22006929, Serie del<br>sensor B: 22006936 | 1ATI-0146-2022             |
| TERMOHIGRÓMETRO<br>METROIL                     | Medidor de Temperatura y<br>Humedad, ROTRONIC, serie<br>60024619                                                                                        | 1AT-2421-2022              |

### 6. CALIBRACIÓN

| Estándares de<br>Turbidez (NTU) | Rango (NTU) | Lectura del<br>instrumento<br>(NTU) | Incertidumbre<br>(NTU) |
|---------------------------------|-------------|-------------------------------------|------------------------|
| 10.10                           | 9.5-10.5    | 10.20                               | 0.004                  |
| 20.00                           | 19-21       | 20.6                                | 0.005                  |
| 103.10                          | 95-105      | 99.2                                | 0.005                  |
| 816.40                          | 760-840     | 800.4                               | 0.003                  |

- En la calibración se utilizó soluciones estándar de turbidez de la marca HACH, trazable al SRM del NIST.



PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACION DE OFILAB S.A.C.

Tel: (01) 586-6400 / Cel: 997 771 497  
Jr. San Luis N°341 - Urb San Carlos - Comas  
E-mail: atcmetrologia@ofilab.com.pe / Web: www.ofilab.com.pe

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

010-00497-CR-OFILAB-22

### 3. MÉTODO DE CALIBRACIÓN

- PC-020 "Procedimiento para la calibración de medidores de pH" del SNM. INDECOPI. 2da edición-2017

### 4. LUGAR DE CALIBRACIÓN

Laboratorio - Instalaciones de Ofilab Perú S.A.C.

### 5. CONDICIONES AMBIENTALES

|                     |            |      |    |
|---------------------|------------|------|----|
| Temperatura (°C)    | 25°C ± 2°C |      |    |
|                     | Inicial :  | 25.6 | °C |
|                     | Final :    | 25.4 | °C |
| Humedad Relativa(%) | 65% ± 5%   |      |    |
|                     | Inicial :  | 66   | %  |
|                     | Final :    | 67   | %  |

### 6. TRAZABILIDAD

| Trazabilidad            | Patrón utilizado                                                                                                                            | Certificado de calibración |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| PATRONES DE BUFFER pH   | pH 4.01 Buffer                                                                                                                              | LOT: ZS2                   |
|                         | pH 7.01 Buffer                                                                                                                              | LOT: ZX1                   |
|                         | pH 10.01 Buffer                                                                                                                             | LOT: ZU1A                  |
| TERMÓMETRO INACAL       | Termómetro con indicación digital, Marca: Delta OHM, Serie del Equipo: 22003898, Serie del sensor A: 22006929, Serie del sensor B: 22006936 | LT-133-2022                |
| TERMOHIGRÓMETRO METROIL | Medidor de temperatura y humedad, Marca: ROTRONIC, Modelo: HYGROLOG-D, Serie: 60024619                                                      | 1AT-2421-2022              |

### 7. CALIBRACIÓN

| Valor Certificado (pH) | Lectura de medidor de pH | Corrección (pH) | Incertidumbre (pH) | Rango Aceptable |             |
|------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-------------|
|                        |                          |                 |                    | Mínimo (pH)     | Máximo (pH) |
| 4.01                   | 4.14                     | -0.13           | 0.001              | 4.13            | 4.14        |
| 7.01                   | 7.04                     | -0.03           | 0.001              | 7.03            | 7.04        |
| 10.01                  | 9.82                     | 0.19            | 0.004              | 9.8             | 9.84        |

### 8. Conclusiones

- La incertidumbre de medición expandida reportada en los resultados del análisis de datos de pH, es la incertidumbre de medición estándar multiplicada por el factor de cobertura k=2 de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza de 95%.
- Se concluye que los valores de la incertidumbre de las mediciones de pH están dentro del rango permitido.



PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACION DE OFILAB S.A.C.

 Telf: (01) 586-6400 / Cel: 997 771 497  
 Jr. San Luis N°341 - Urb San Carlos - Comas  
 E-mail: atcmetrologia@ofilab.com.pe / Web: www.ofilab.com.pe