

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALURGICA



T E S I S

**Tratamiento de aguas acidas de mina para el cumplimiento del
DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima – 2023**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor:

Bach. Javier VALENCIA LIMA

Asesor:

Mg. Osmer Ignacio BLANCO CAMPOS

Cerro de Pasco – Perú – 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALURGICA



T E S I S

**Tratamiento de aguas acidas de mina para el cumplimiento del
DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima – 2023**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Antonio Florencio BLAS ARAUCO
PRESIDENTE

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO
MIEMBRO

Mg. Manuel Antonio HUAMÁN DE LA CRUZ
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides
Carrión Facultad de Ingeniería
Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 043-2024-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:

Tratamiento de aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima- 2023.

Apellidos y nombres de los tesistas:

Bach. VALENCIA LIMA, Javier

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. BLANCO CAMPOS, Osmer Ignacio

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

7%

APROBADO

Se informa al decanato para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 7 de febrero del 2024


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
Luis Villa Requis Carbajal
DOCTOR EN CIENCIAS - DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico esta investigación realizada profundamente a mis padres, por su constante apoyo y sacrificio para brindarme una educación de calidad. Han sido mi guía, motor, mi mayor admiración y los pilares de mi formación. Sus palabras de aliento, ánimos y amor sin medida siempre han sido mi fuente de motivación para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTO

Quiero extender mi agradecimiento a mi familia que me brindaron sus experiencias y consejos durante toda mi etapa universitaria. Sus consejos brindados estuvieron siempre presentes en momentos de adversidades y el camino era cuesta arriba, lo cual me permitió tener tenacidad y fuerza para no rendirme y superar cada paso para el cumplimiento de mis objetivos y metas trazadas.

No olvidó mencionar a mi casa de estudio la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, agradecido por haber vivido mi etapa universitaria en sus ambientes, aulas e instalaciones, donde me desarrolle como un profesional que brinde sus conocimientos al desarrollo de la sociedad.

Deseo agradecer a los ingenieros y profesionales que formaron parte del equipo de investigación en el tratamiento de aguas ácidas de mina, así como a los autores mencionados en los antecedentes, por sus contribuciones de forma indirecta, las cuales me facilitaron la discusión de resultados

Para finalizar quiero expresar un agradecimiento a mi propia persona por culminar esta tesis, resultado de largas horas de investigación, esfuerzo y dedicación, sin embargo, recordemos que cada meta no es un logro personal si no colectivo.

Javier, Valencia Lima

RESUMEN

Durante la última década, la generación de aguas ácidas ha adquirido una importancia creciente. Se realizaron diversos estudios con el objetivo de prevenir la formación de aguas ácidas o tratarlas mediante tecnologías tanto pasivas como activas.

El presente trabajo de investigación se enmarca en el ámbito de tecnología aplicada y posee un nivel explicativo. Se llevó a cabo el tratamiento de aguas ácidas provenientes de la mina perteneciente a la unidad minera Cori Puno S.A. El diseño fue un experimento factorial 3^2 , donde los factores considerados fueron el pH y el tiempo de contacto, cada uno con 3 niveles distintos.

La población del agua ácida de la mina en la poza CW-07, de donde se extrajo una muestra representativa de 1 m^3 . Los parámetros que excedieron los LMP fueron el pH (3,34), cobre (0,456 mg/L), hierro (2,67 mg/L) y zinc (2,202 mg/L). Tras realizar pruebas de tratamiento de aguas ácidas de minas, se determinó que el mejor rendimiento se logró con un tiempo de contacto de 20 minutos en la etapa de neutralización, utilizando una dosis de $0,142 \text{ kg/m}^3$ de lechada de cal al 20% en peso para alcanzar un pH de 10,20. Este proceso se llevó a cabo mediante pruebas Jar Test a 150 RPM, reduciendo luego la velocidad a 70 RPM luego después de agregar el floculante MT-6506 dosificado a 1 mg/L

Las pruebas de acidificación se realizaron para ajustar el pH con un consumo final de 30 g/m^3 y un pH resultante de 7,34. Las concentraciones finales en la solución tratada fueron: cobre (0,007 mg/L), hierro (0,02 mg/L) y zinc (0,021 mg/L), estando en lineamiento con los límites máximos permisibles.

Palabras clave: Tratamiento, aguas acidas, pH, ICP, LMP, porcentaje de remoción de metales.

ABSTRACT

During the last decade, the generation of acidic water has become increasingly important. Several studies have been carried out with the aim of preventing the formation of acid waters or treating them by means of both passive and active technologies, allowing their reuse. The present research work is framed in the field of applied technology and has an explanatory level. The treatment of acid water from the mine belonging to the mining unit Cori Puno S.A. was carried out. To achieve this, a 3^2 factorial experiment was designed, where the factors considered were pH and contact time, each with 3 different levels. The acid mine water population in the CW-07 well, from which a representative sample of 1 m³ was extracted. The parameters that exceeded the MPL were pH (3.34), copper (0.456 mg/L), iron (2.67 mg/L) and zinc (2.202 mg/L). After conducting acid mine water treatment tests, it was determined that the best performance was achieved with a contact time of 20 minutes in the neutralization stage, using a dose of 0.142 kg/m³ of lime slurry at 20% by weight to achieve a pH of 10.20. This process was carried out by Jar Test at 150 RPM, then reducing the speed to 70 RPM and adding the flocculant MT-6506 at a dosage of 1 mg/L.

Acidification tests were carried out to adjust the pH with a final consumption of 30 g/m³ and a resulting pH of 7.34. The final concentrations in the treated solution were: copper (0.007 mg/L), iron (0.02 mg/L) and zinc (0.021 mg/L), all within the maximum permissible limits.

Keywords: treatment, acid mine water, pH, ICP, LMP, percentage of metal removal.

INTRODUCCIÓN

La actividad minera en el Perú está estrechamente vinculada a la generación de aguas ácidas. Durante la explotación, concentración y refinación de minerales, es común que se produzcan aguas ácidas como subproducto, las cuales pueden ocasionar daños al medio ambiente y a la biota si no se gestionan adecuadamente.

La generación de aguas ácidas representa un desafío en las operaciones mineras, debido que la presencia de sulfuros en las labores subterráneas, la concentración de minerales, los depósitos de relaves y los depósitos de desmontes pueden contaminar las aguas del ambiente que lo rodea. En el caso específico de la minera Cori Puno S.A., se ha identificado la formación y generación de aguas ácidas.

Para abordar este problema, se realizaron a cabo pruebas en laboratorio con muestras de estas aguas ácidas, obtenidas en la unidad minera como primer paso fue realizar la caracterización físico-química de las aguas de mina para después comenzar el tratamiento de acuerdo al estudio previo, permitiendo desarrollar tratamientos acorde a los parámetros sobresalientes de acuerdo al LMP.

En el marco legal, en el sector minero peruano se distinguen dos tipos principales de aguas: aquellas relacionadas con cursos naturales ubicados aguas arriba del área minera o en zonas cercanas al proyecto, y los efluentes de mina que son descargas provenientes del interior de las labores mineras. Se han establecido regulaciones para controlar la contaminación de estos efluentes con el objetivo de cumplir el DS N°010-2010 MINAM mediante la precipitación de metales presentes y la regulación del pH para estar alineados con los parámetros establecidos en el

mencionado decreto supremo. El presente trabajo de investigación está estructurado en cuatro capítulos:

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, definición de términos, formulación de hipótesis, identificación de variables y su operacionalización.

Capítulo III: Pertenece a la metodología y técnicas de investigación, detalle del tipo, nivel, métodos y diseño de la investigación. Se da a conocer 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.

Este enfoque estructurado permitirá abordar de manera integral el problema planteado y proporcionar conclusiones sólidas basadas en el análisis riguroso de los datos y la revisión de la bibliografía concerniente al tema abordado.

ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
ÍNDICE	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.2. Delimitación de la investigación.....	2
1.2.1. Delimitación espacial.....	2
1.2.2. Delimitación teórica.....	2
1.2.3. Delimitación temporal.....	2
1.3. Formulación del problema	3
1.3.1. Problema general.....	3
1.3.2. Problemas específicos	3
1.4. Formulación de objetivos	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Justificación de la investigación.....	4
1.5.1. Justificación teórica.....	4
1.5.2. Justificación práctica.....	4
1.6. Limitaciones de la investigación	4

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio.....	6
-----------------------------------	---

2.2. Bases teóricas – científicas.....	9
2.2.1. Procesos de formación de aguas acidas de mina.....	9
2.2.2. Impacto ambiental de las aguas acidas de mina.....	10
2.2.3. Caracterización de las aguas acidas de mina.....	11
2.2.4. Métodos de tratamientos de las aguas acidas de mina.....	13
2.2.5. Neutralización de aguas acidas de mina.....	14
2.2.6. Remoción de metales pesados en aguas acidas de mina.....	15
2.2.7. Clarificación de aguas acidas de mina.....	16
2.2.8. Legislación y normativas relacionadas con el tratamiento de aguas ácidas de mina.....	17
2.3. Definición de términos básicos.	19
2.4. Formulación de hipótesis.....	20
2.4.1. Hipótesis general.....	20
2.4.2. Hipótesis específicas.....	21
2.5. Identificación de variables.....	21
2.6. Definición operacional de variables e indicadores.....	22

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TECNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación.....	23
3.2. Nivel de investigación.....	23
3.3. Métodos de investigación.....	24
3.4. Diseño de investigación.....	25
3.4.1. Diseño experimental.....	26
3.5. Población y muestra.....	28
3.5.1. Población.....	28
3.5.2. Muestra.....	29
3.6. Técnicas e 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.	36
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica.	36

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	38
4.1.1. Homogenización de muestra.....	38
4.1.2. Caracterización físico química.....	39
4.1.3. Evaluación de la cal	42
4.1.4. Pruebas de neutralización para precipitación de metales.....	49
4.1.5. Prueba de oxidación mediante aire fresco.....	53
4.1.6. Pruebas de selección de floculante.....	56
4.1.7. Pruebas de acidificación mediante CO ₂	58
4.1.8. Caracterización fisico quimica de la solución tratada.....	59
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados	61
4.2.1. Análisis y resultados de pruebas realizadas a pH 7.5.....	61
4.2.2. Análisis y resultados de pruebas realizadas a pH 9,5.....	64
4.2.3. Análisis y resultados de pruebas realizadas a pH 10.20.....	68
4.2.4. Análisis estadístico de cobre	71
4.2.5. Análisis estadístico de hierro	75
4.2.6. Análisis estadístico de zinc	79
4.3. Prueba de hipótesis.....	83
4.4. Discusión de resultados	84

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS IBLIOGRAFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros LMP según D.S. N°010-2010.....	19
Tabla 2. Variables e Indicadores.....	22
Tabla 3. Diseño experimental de neutralización.....	28
Tabla 4. Variables del diseño experimental.....	28
Tabla 5. Factores y niveles del diseño experimental.	28
Tabla 6. Caracterización físico químico de muestras	40
Tabla 7. Comparación de contenido metálico de la muestra	41
Tabla 8. Comportamiento de lechada de cal al 20% peso	42
Tabla 9, Consumo de cal para diferentes rangos de pH.....	44
Tabla 10. Pruebas de alcalinización a pH 7,5 a tiempos de 10, 20 y 40 min.....	49
Tabla 11. Resultados de muestra de cabeza.....	50
Tabla 12. Pruebas de alcalinización a pH 9.5 a tiempos de 10, 20 y 40 min.....	51
Tabla 13. Resultados de cabeza comparados con los LMP.	51
Tabla 14. Pruebas de alcalinización a pH 10,20 a tiempos de 10, 20 y 40 min.....	52
Tabla 15. Resultados de cabeza comparados con los LMP.	53
Tabla 16. Pruebas de selección de floculante.	57
Tabla 17. Condiciones de pruebas de acidificación en soluciones neutralizadas.....	58
Tabla 18. Caracterización físico química de la solución tratada.	60
Tabla 19. Contenido metálico final.....	61
Tabla 20. Análisis y resultados de pruebas a pH 7,5	62
Tabla 21. Análisis y resultados de pruebas a pH 9,5	65
Tabla 22. Análisis y resultados de pruebas a pH 10,20	68
Tabla 23. Tabla de diseño experimental del % de remoción de cobre	71
Tabla 24. Tabla de diseño experimental del % de remoción de hierro.....	76

Tabla 25. Tabla de diseño experimental del % de remoción de zinc.....	80
Tabla 26. Instrumentos de recolección de datos	90
Tabla 27. Matriz de consistencia	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Combinaciones de un diseño 3^2	26
Figura 2. Diseño factorial 3^2	26
Figura 3. Población poza CW-07	29
Figura 4. Descarga del IBC	30
Figura 5. Muestra representativa de la población.....	31
Figura 6. Esquema del trabajo	39
Figura 7. Comportamiento de lechada de cal al 20%	43
Figura 8, Cinética de consumo de cal.....	44
Figura 9. Curvas de solubilidad.....	54
Figura 10. Diagrama de pourbaix de hierro.....	55
Figura 11. Diagrama de pourbaix de cobre	55
Figura 12. Diagrama de pourbaix de zinc	56
Figura 13. Evaluación de floculantes	57
Figura 14. Variación de pH	59
Figura 15. Evaluación de la precipitación de cobre a pH 7,5 (mg/L)	63
Figura 16. Evaluación de la precipitación de hierro a pH 7,5 (mg/L).....	63
Figura 17. Evaluación de la precipitación de zinc a pH 7,5 (mg/L).....	64
Figura 18. Evaluación de la precipitación de cobre a pH 9,5 (mg/L)	65
Figura 19. Evaluación de la precipitación de hierro a pH 9,5 (mg/L).....	66
Figura 20. Evaluación de la precipitación de zinc a pH 9,5 (mg/L).....	67
Figura 21. Evaluación de la precipitación de cobre a pH 10,20 (mg/L)	69
Figura 22. Evaluación de la precipitación de hierro a pH 10,20 (mg/L).....	69
Figura 23. Evaluación de la precipitación de zinc a pH 10,20 (mg/L).....	70
Figura 24. Gráficas de efectos principales para el % de remoción Cu.....	72

Figura 25. Grafica de interacción para el % remoción de cobre.	73
Figura 26. Diagrama de pareto % remoción de Cu total	74
Figura 27. Grafica de contorno de % remoción Cu - tiempo vs pH.....	75
Figura 28. Gráficas de efectos principales para el % de remoción Fe.	76
Figura 29. Grafica de interacción para el % remoción de hierro.....	77
Figura 30. Diagrama de pareto % remoción. Fe total.....	78
Figura 31. Grafica de contorno de % remoción hierro - tiempo vs pH.....	79
Figura 32. Gráficas de efectos principales para % de remoción Zn.....	80
Figura 33. Grafica de interacción para el % remoción de zinc	81
Figura 34. Diagrama de pareto % remoción Zn total	82
Figura 35. Grafica de contorno % de remoción de zinc - tiempo vs pH.....	83
Figura 36. Turbidímetro	92
Figura 37. Equipo desionizador.....	93
Figura 38. Peachimetro.....	94
Figura 39. Preparación de floculante MT 6506.....	95
Figura 40. Preparación de lechada de cal al 20%	96
Figura 41. Pruebas exploratorias de neutralización.....	97
Figura 42. Pruebas de selección de floculante.....	97
Figura 43. Pruebas de clarificación	98
Figura 44. Pruebas de neutralización.....	99
Figura 45. Cinética de sedimentación	100
Figura 46. Toma de lectura de NTU's.....	101
Figura 47. Pruebas de acidificación.....	102
Figura 48. Ficha técnica de cal viva	103

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La explotación de minerales es una actividad económica que ha sido fundamental para el desarrollo de numerosos países en todo el mundo. Sin embargo, una de las principales problemáticas asociadas a esta actividad es la generación de aguas ácidas de mina.

Las aguas ácidas de mina son un tipo de contaminación ambiental que se produce como resultado de la exposición de minerales sulfurados a la interacción con el agua y el oxígeno del aire durante el proceso de extracción y procesamiento de minerales. Este fenómeno permite la generación de acidez, presencia de metales pesados y otras sustancias tóxicas en el agua, lo que resulta en la acidificación del mismo.

El no tratar estas aguas ácidas de mina presenta un peligro porque es altamente perjudicial para los ecosistemas acuáticos y terrestres, debido que afecta negativamente la calidad del agua, destruye la biodiversidad y puede generar daños irreversibles en el suelo y en las fuentes hídricas cercanas a las minas.

Por esta problemática, con el propósito de cumplir con la normativa ambiental DS N° 010 – 2010 MINAM, el cual establece los estándares para la calidad ambiental del agua en aras de proteger la salud humana y la biodiversidad, se llevó a cabo este trabajo de investigación con el objetivo de proporcionar los factores y variables determinantes para el tratamiento de aguas ácidas provenientes de mina de la empresa Cori Puno S.A.

1.2. Delimitación de la investigación.

1.2.1. Delimitación espacial

La empresa minera Cori Puno S.A. se encuentra ubicada en el sur de la cordillera oriental de los Andes peruanos en el sur del Perú ubicada políticamente en:

- Distrito : Quiaca
- Provincia : Sandia
- Departamento : Puno

1.2.2. Delimitación teórica

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

1.2.3. Delimitación temporal

El proyecto de investigación presento un tiempo total de trabajo de 07 meses que se inicia el 16 de mayo del 2023 hasta el 17 de noviembre del 2023, actividades de campo, laboratorio y gabinete. Las actividades son realizadas de forma progresiva por un cronograma, donde se detalla cada actividad de las pruebas.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Se podrá realizar de tratamiento de Aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023?

1.3.2. Problemas específicos

1. ¿Se podrá determinar el pH de las aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023?
2. ¿Cómo oxidar los metales presentes en aguas acidas de para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023?
3. ¿Cuál es el proceso para tratar la turbidez de las aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Tratar las Aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Determinar el pH con el proceso de Neutralización en las aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.
2. Determinar las pruebas de oxidación de los metales del agua acida de para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.

3. Realizar la etapa de clarificación de las aguas acidas de mina para para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.

1.5. Justificación de la investigación

1.5.1. Justificación teórica

La justificación teórica del uso de lechadas de cal y floculante en el tratamiento de aguas ácidas de mina, evaluando el tiempo de contacto se fundamenta en su capacidad de neutralizar la acides, precipitar metales pesados al tratar y mejorar la calidad del agua debido a su capacidad para aportar iones hidróxidos (OH)-, lo que ayuda a reducir la acidez y aumentar la alcalinidad del agua ácida de mina, inicia realizando una caracterización físico química de las aguas acidas de mina, para después de su evaluación realizar diferentes pruebas de neutralización, de dosificación de lechada de cal y clarificación con el floculante MT-6506 controlando el pH.

1.5.2. Justificación práctica

Los trabajos de investigación que presentan un diseño experimental permiten las resoluciones prácticas y tecnológicos. En el trabajo de investigación se realizará el tratamiento de aguas acidas de mina desarrollando un set de pruebas y corridas experimentales en un equipo Jar Test para la precipitación de metales pesados presente en aguas acidas de mina, para cumplir los LMP para evitar un efecto negativo al medio ambiente.

1.6. Limitaciones de la investigación

Poca disponibilidad de tiempo para el desarrollo de trabajo de investigación, para tratar aguas acidas de mina, debido que no puede estar mucho tiempo en reserva, esto debido que debe de presentar la característica inicial del

punto de toma de muestra. La limitación de recurso estuvo presente en ausencia de base teórica sólida, debemos recordar que para tratar una muestra de agua acida se debe realizar de acuerdo a las características físico química, para poder realizarlo en parámetros de pH de precipitación de metales presentes para después formular las pruebas experimentales para la investigación.

Durante las pruebas de tratamiento de aguas acidas de mina que se presento fue la limitación de equipos específicos, se contó con un solo peachímetros el cual dificultaba el control del pH en un tiempo determinado para cada uno de los vasos precipitados de 02 litros, de la misma manera con el potenciómetro, turbidímetro y equipos de Jar Test de mayor capacidad, equipos para la homogenización de la muestra inicial.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

(Panduro Macedo, 2019) en su tesis intitulada “Estudio del Tratamiento de Aguas Ácidas Provenientes de los Niveles (Socavones) de una Compañía Minera”, ubicado en el distrito de Tapay, provincia de Caylloma, región Arequipa, desarrolló una propuesta para el tratamiento físico-químico mediante la neutralización-precipitación después de los diversos procesos industriales. El proceso de HDS, el limo o la piedra caliza y los lodos reciclados se añadieron al depósito de mezcla de limo- lodos al comienzo del proceso. Esto se convirtió en el principal agente de neutralización, logrando una importante reducción del volumen de lodos debido al aumento en la densidad del lodo. El proceso HDS modificó el proceso de neutralización convencional y consistió en recircular lodos para aumentar la reactividad de la cal y producir lodos con mayor contenido de sólidos en volúmenes más pequeños. Donde cumplió con los objetivos de la investigación respecto a la generación de lodos, el cual se redujo en un 34,4% respecto a la generación actual; asimismo, se mejoró la calidad del agua tratada la cual se encuentra debajo de los

Límites Máximos Permisibles establecidos en el D.S. 010- 2010-MINAM; y el consumo de la cal (hidróxido de calcio) y floculante han disminuido respecto al actual, los cuales sustentan la evaluación económica de la mejora del sistema de tratamiento propuesta.

(Ayala Cercado, 2018) en su tesis intitulado “Influencia de la dosificación de cal en el tratamiento de las aguas ácidas de la quebrada Mesa de Plata Hualgayoc – 2018” tuvo como propósito determinar el impacto de diferentes dosis de cal en el tratamiento de las aguas ácidas de la quebrada Mesa de Plata. Por lo tanto, se llevaron a cabo mediciones de caudal, se tomó muestras, se caracterizó la calidad del agua con datos de campo y laboratorio, y se evaluó la efectividad de la cal a través de experimentos. Estos experimentos consistieron en ajustar las RPM del equipo Jar-test a 1000, 800, 600 y 400 respectivamente, y posteriormente realizar las siguientes pruebas: muestra 1 a 1000 RPM, agitada durante 30 minutos, con 1 gramo de cal y 30 minutos de reposo; muestra 2 a 800 RPM, agitada durante 25 minutos, con 0,75 gramos de cal y 30 minutos de reposo; muestra 3 a 600 RPM, agitada durante 20 minutos, con 0,05 gramos de cal y 30 minutos de reposo; muestra 4 a 400 RPM, agitada durante 15 minutos, sin agregado de cal, y 30 minutos de reposo. Estas muestras se experimentaron en 2 litros de agua, y se determinó que la dosis de 0,75 gramos de cal por cada 2 litros de agua fue la más efectiva, ya que logró ajustar los parámetros del agua a un pH de 8,09 unidades de pH. Además, se obtuvo una remoción de 89% de aluminio inorgánico, 71% de arsénico, 98% de cadmio, 99% de hierro, 87% de magnesio, 99% de manganeso, 14% de sodio, 89% de plomo, 60% de talio y 98% de zinc, cumpliendo así con los estándares establecidos por el D.S N° 004-2017-MINAM para la categoría 3 - Bebida de Animales.

(Flores Enao & Herrera Salinas, 2022) en su tesis intitolado “Evaluación del efecto del hidróxido de calcio (cal apagada) en la estabilización del pH de aguas desembocadas del río Millojahuira en el embalse Pasto Grande, Moquegua – 2022” en el trabajo de investigación, se evaluó el efecto del hidróxido de calcio en la estabilización del pH del agua desembocada del río Millojahuira en el embalse Pasto Grande, Moquegua. El pH del agua era un aspecto crucial en esta investigación, donde se analizó el uso de cal apagada para estabilizarlo en el embalse, mejorando así la calidad del agua y reduciendo problemas ambientales. Para llevar a cabo la estabilización del pH, se empleó una metodología experimental basada en ensayos de dosificación. Se recolectaron muestras del río Millojahuira siguiendo el protocolo nacional para monitoreo y toma de muestras de agua del ANA. Se obtuvieron 8 litros de muestra y se realizaron 4 ensayos utilizando dosificaciones de hidróxido de calcio de 0,3, 0,5 y 0,7 g/L, que fueron comparadas con una muestra de control sin dosificación. Se llevaron a cabo tres repeticiones del experimento.

Se pudo observar que todas las dosificaciones (D1, D2 y D3) incrementaron el nivel de pH, alcanzando valores de 9,15, 7,03 y 4,17 respectivamente. En contraste, el valor de pH de la muestra de control sin dosificación fue de 2,56, indicando un carácter ácido en el agua. Tras los análisis realizados, se determinó que la dosificación óptima para la estabilización del pH fue de 0,5 g/L de hidróxido de calcio, cumpliendo con los estándares establecidos por la normativa nacional para el agua destinada al consumo humano y los estándares de calidad ambiental (ECA Agua).

Los resultados obtenidos fueron validados mediante pruebas estadísticas como ANOVA de un factor y la prueba de Tukey, las cuales demostraron la

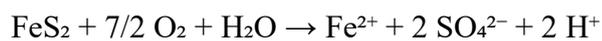
normalidad y homogeneidad de los datos de concentración de pH con cada dosificación y repetición. En base a estos resultados, se pudo concluir que el hidróxido de calcio tiene un impacto significativo en la estabilización del pH en las aguas desembocadas del río Millojahuirá en el embalse Pasto Grande.

2.2. Bases teóricas – científicas

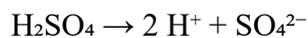
2.2.1. Procesos de formación de aguas ácidas de mina

El proceso de formación de aguas ácidas de mina usualmente ocurre cuando se extraen minerales o metales de las rocas en una mina. A continuación, se describen las principales etapas y reacciones químicas involucradas en este proceso:

1. **Exposición de minerales sulfurados:** En muchas minas, los minerales sulfurados, como la pirita (FeS_2), están presentes en las rocas. Cuando estas rocas son expuestas al aire y al agua durante la extracción minera, el azufre presente en los minerales sulfurados reacciona con el oxígeno y el agua para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4):

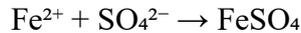


2. **Disolución del ácido sulfúrico:** El ácido sulfúrico recién formado se disuelve en el agua presente en las rocas y se ioniza, liberando iones de hidrógeno (H^+) y iones de sulfato (SO_4^{2-}):



3. **Reacciones secundarias:** Los iones de hidrógeno (H^+) liberados por la disolución del ácido sulfúrico pueden seguir reaccionando con otros minerales para formar más ácidos, como el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido nítrico (HNO_3).

Además, los iones de sulfato (SO_4^{2-}) pueden reaccionar con elementos como el hierro (Fe) presente en los minerales para formar sulfato ferroso (FeSO_4), que es soluble en agua:



- 4. Lixiviación y transporte:** El agua ácida formada por estas reacciones químicas se lixivia a través de las rocas y se transporte hacia otras áreas, como ríos o acuíferos, contaminando el agua y causando daño ambiental.

En resumen, el proceso de formación de aguas ácidas de mina involucra principalmente la oxidación de minerales sulfurados para formar ácido sulfúrico, que luego se disuelve en el agua y reacciona con otros minerales, formando ácidos adicionales. Estos ácidos pueden lixiviar y contaminar el agua, causando problemas ambientales significativos. (Chaparro Leal, 2014, pág. 53)

2.2.2. Impacto ambiental de las aguas acidas de mina

El impacto ambiental de las aguas ácidas de mina en Perú es significativo y tiene consecuencias negativas tanto para el ecosistema como para la salud humana. Estas aguas se generan como resultado de la actividad minera, cuando los minerales sulfurosos presentes en los depósitos de minerales se oxidan al entrar en contacto con el aire y el agua.

Algunos de los principales problemas asociados con las aguas ácidas de mina en Perú son los siguientes:

- 1. Contaminación del agua:** Las aguas ácidas de mina tienen un pH extremadamente bajo, lo que las hace tóxicas para la flora y la fauna acuática. Además, contienen metales pesados y sustancias químicas peligrosas que pueden filtrarse en los cuerpos de agua, contaminando ríos, lagos y acuíferos, y afectando la calidad del agua potable.

2. **Erosión del suelo:** Cuando las aguas ácidas de mina entran en contacto con el suelo, pueden acidificarlo y dañar su estructura, lo que lleva a la erosión del suelo. Esto afecta negativamente la capacidad del suelo para mantener la vegetación y contribuye a la desertificación y la degradación del paisaje.
3. **Pérdida de biodiversidad:** La contaminación de los cuerpos de agua por las aguas ácidas de mina afecta gravemente a los ecosistemas acuáticos y a las especies que dependen de ellos. Los peces, insectos, aves y otros animales acuáticos pueden morir o sufrir enfermedades debido a la toxicidad del agua contaminada.
4. **Impacto en la salud humana:** Las aguas ácidas de mina pueden representar un riesgo para la salud humana a través de la contaminación del agua potable. Las personas que consumen agua contaminada con metales pesados y sustancias químicas tóxicas pueden sufrir problemas de salud, como enfermedades gastrointestinales, daño hepático, problemas renales y enfermedades respiratorias.

Para mitigar los efectos negativos de las aguas ácidas de mina en el medio ambiente, es necesario implementar medidas de prevención y control de la contaminación en la industria minera. Esto implica la creación de planes de gestión ambiental y la implementación de tecnologías adecuadas para tratar y minimizar la generación de aguas ácidas de mina. Además, es importante promover la vigilancia y la supervisión de las operaciones mineras por parte de las autoridades, así como fomentar la participación activa de las comunidades locales en la toma de decisiones relacionadas con la actividad minera. (Calderón de Alvarado & Tuiro Salvador, 2021, pág. 42)

2.2.3. Caracterización de las aguas acidas de mina

Las aguas ácidas de mina se caracterizan por ser aguas contaminadas con altos niveles de acidez y contenidos de metales pesados. Estas aguas se generan como resultado de la interacción de las aguas de lluvia y los minerales presentes en los depósitos de la mina.

Algunas características de las aguas ácidas de mina incluyen:

1. **Acidez:** Estas aguas tienen un pH muy bajo, generalmente inferior a 4, debido a la presencia de ácidos fuertes como el ácido sulfúrico. Esta acidez es una de las principales características de las aguas ácidas de mina.
2. **Contenido de metales pesados:** Las aguas ácidas de mina contienen altos niveles de metales pesados como el hierro, el aluminio, el zinc, el cobre, el plomo, entre otros. Estos metales se disuelven en el agua y pueden ser tóxicos para los seres vivos y causar daños ambientales significativos.
3. **Color y turbidez:** Debido a la presencia de metales disueltos, las aguas ácidas de mina suelen tener un color oscuro y una alta turbidez. Esto se debe a la presencia de partículas suspendidas en el agua.
4. **Olor desagradable:** Las aguas ácidas de mina pueden tener un olor desagradable debido a la presencia de compuestos químicos volátiles como el sulfuro de hidrógeno.
5. **Baja biodiversidad:** Debido a su alta acidez y la presencia de metales pesados, las aguas ácidas de mina tienen una biodiversidad muy baja. Estas condiciones extremas dificultan la vida de la mayoría de las especies acuáticas.

En resumen, las aguas ácidas de mina se caracterizan por su alta acidez, contenido de metales pesados, color y turbidez, olor desagradable y baja

biodiversidad. Estas aguas son altamente contaminantes y representan un gran desafío para su tratamiento y gestión adecuada. (Aduvire, 2006)

2.2.4. Métodos de tratamientos de las aguas ácidas de mina

Existen varios métodos de tratamiento de las aguas ácidas de mina. Algunos de los métodos más comunes son:

- 1. Neutralización química:** Este método consiste en agregar productos químicos básicos, como cal o carbonato de sodio, al agua ácida para neutralizar su pH y reducir su acidez. El proceso puede incluir la adición de otros reactivos para precipitar los metales pesados presentes en el agua.
- 2. Oxidación y precipitación:** Este método implica la oxidación de los compuestos químicos presentes en el agua ácida utilizando agentes oxidantes como el peróxido de hidrógeno o el cloro. Posteriormente, se precipitan los metales pesados presentes en el agua mediante la adición de reactivos químicos.
- 3. Procesos de intercambio iónico:** Este método utiliza resinas de intercambio iónico para eliminar los iones metálicos disueltos en el agua ácida. Las resinas se cargan con iones básicos y atraen selectivamente los iones metálicos, permitiendo que el agua se despoje de ellos.
- 4. Tratamientos biológicos:** Los procesos biológicos pueden utilizar microorganismos para tratar las aguas ácidas de mina. Estos microorganismos pueden ser capaces de neutralizar el pH ácido y precipitar los metales presentes en el agua. Este método se utiliza principalmente en depósitos mineros donde el agua ácida se encuentra en contacto con minerales sulfurosos.

5. Procesos de evaporación: En algunos casos, el agua ácida de mina se puede concentrar mediante evaporación para reducir su volumen antes de someterla a tratamientos adicionales. Este método puede ser útil cuando el agua contiene altas concentraciones de sales disueltas y su tratamiento directo no es efectivo.

Es importante considerar que la elección del método de tratamiento dependerá de las características específicas del agua ácida de mina, como su composición química, nivel de acidez y concentración de metales pesados. Cada método tiene ventajas y limitaciones, y es necesario evaluar y adaptar el tratamiento según las necesidades de cada situación particular. (Aduvire, 2006, pág. 91).

2.2.5. Neutralización de aguas acidas de mina

La neutralización de aguas ácidas de mina es un proceso que busca equilibrar el pH de dichas aguas, las cuales suelen tener un pH muy bajo debido a la presencia de sustancias ácidas y metales disueltos. La neutralización es necesaria para cumplir con los estándares de calidad del agua y evitar impactos negativos en el medio ambiente.

Existen diferentes métodos de neutralización que se pueden emplear, dependiendo de las características del agua y los recursos disponibles. Algunos de los métodos más comunes son:

- 1. Calcinación:** Consiste en agregar cal o carbonato de calcio al agua ácida. La reacción química entre el ácido presente en el agua y la cal produce carbonato de calcio y agua, neutralizando así el pH.
- 2. Utilización de bases:** Se pueden utilizar bases como soda cáustica, hidróxido de calcio o hidróxido de sodio para elevar el pH de las aguas

ácidas. Estas bases reaccionan con los ácidos presentes en el agua, formando sales y agua, lo que aumenta el pH.

- 3. Procesos biológicos:** Algunas bacterias y microorganismos tienen la capacidad de transformar los compuestos ácidos presentes en el agua en otros productos menos ácidos o neutros. Estos procesos biológicos se pueden aprovechar para neutralizar las aguas ácidas de mina.

Es importante destacar que la neutralización de aguas ácidas de mina no solo implica elevar el pH, sino también tratar y remover los metales pesados y otros contaminantes presentes en el agua. Por lo tanto, es necesario implementar sistemas de tratamiento específicos que permitan la eliminación de estos contaminantes y aseguren la adecuada neutralización del agua. (Chaparro Leal, 2014)

2.2.6. Remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina

La remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina es fundamental para prevenir la contaminación de las fuentes de agua. Estos metales pesados, como el plomo, el cadmio, el mercurio y el arsénico, son altamente tóxicos y pueden causar graves problemas ambientales y de salud.

Existen diferentes métodos de remoción de metales pesados en aguas ácidas de mina, que incluyen:

- 1. Precipitación química:** Este método implica agregar un reactivo químico al agua ácida para convertir los metales pesados en sólidos insolubles que pueden ser separados por filtración o sedimentación.
- 2. Intercambio iónico:** En este proceso, se utilizan resinas de intercambio iónico para adsorber los metales pesados presentes en el agua ácida. Las resinas se regeneran luego de su uso para poder reutilizarlas.

3. **Adsorción:** Se utilizan materiales adsorbentes como zeolitas, carbón activado, arcillas modificadas y otros para atrapar los metales pesados presentes en el agua ácida.
4. **Electrocoagulación:** En este proceso, se aplica una corriente eléctrica a través del agua ácida para crear coagulantes y eliminar los metales pesados mediante floculación y sedimentación.
5. **Oxidación-reducción:** Se utilizan reactivos de oxidación o reducción para convertir los metales pesados en formas menos tóxicas que puedan ser posteriormente removidas del agua.

Es importante resaltar que ninguno de estos métodos es completamente eficiente en la remoción total de metales pesados. Por lo tanto, es necesario implementar una combinación de procesos y monitoreo continuo de la calidad del agua para garantizar una remoción adecuada de estos contaminantes. Además, es fundamental implementar prácticas de gestión de minas responsables para evitar la generación de aguas ácidas y minimizar la contaminación en su origen. (Calderón de Alvarado & Tuiro Salvador, 2021, pág. 44)

2.2.7. Clarificación de aguas ácidas de mina

La clarificación de aguas ácidas de mina con floculante es un proceso mediante el cual se agregan productos químicos llamados floculantes al agua ácida para eliminar las partículas suspendidas en el líquido.

Las aguas ácidas de mina son aguas que se generan como resultado de la extracción y tratamiento de minerales. Estas aguas suelen contener altos niveles de metales pesados y otros contaminantes, lo que las hace peligrosas para el medio ambiente.

El uso de floculantes en este proceso permite que las partículas suspendidas se agrupen y formen flóculos más grandes y pesados, los cuales se decantan y pueden ser separados más fácilmente del agua. Esto facilita la clarificación y mejora la calidad del agua.

El tipo de floculante a utilizar dependerá de las características del agua y de los contaminantes presentes. Algunos de los floculantes más comunes utilizados en la clarificación de aguas ácidas de mina son los polímeros orgánicos y los coagulantes inorgánicos, como los sulfatos de hierro y aluminio.

Es importante destacar que el proceso de clarificación con floculante no elimina completamente los contaminantes del agua, por lo que es necesario seguir tratando el agua antes de su descarga o reutilización. Además, es fundamental contar con sistemas de control y monitoreo para asegurar que se cumplan los límites legales y ambientales en la calidad del agua tratada. (Aduvire, 2006, pág. 90)

2.2.8. Legislación y normativas relacionadas con el tratamiento de aguas ácidas de mina

En el Perú, la legislación y las normativas relacionadas con el tratamiento de aguas ácidas de mina se encuentran principalmente en la Ley General de Aguas (Ley N° 29338) y en el Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de la Industria Manufacturera, Minera y de Hidrocarburos (D.S. N° 015-2005-EM).

El Decreto Supremo N° 010-2010 MINAM es una normativa emitida por el Ministerio del Ambiente del Perú, que regula el tratamiento de aguas ácidas provenientes de operaciones mineras en el país.

Este decreto establece los lineamientos y requisitos que deben cumplir las empresas mineras para el tratamiento de las aguas ácidas generadas durante sus

operaciones. El objetivo principal es prevenir y minimizar el impacto negativo de estas aguas en el medio ambiente y en la salud de las personas.

Entre los principales aspectos que contempla el DS N° 010- 2010 MINAM, se encuentran:

1. Obligación de las empresas mineras de presentar y ejecutar un plan de manejo de aguas ácidas, que incluya medidas de prevención, control y mitigación de los efectos negativos.
2. Establecimiento de estándares de calidad para las aguas ácidas tratadas, los cuales deben cumplir con los límites establecidos en la normativa y con los parámetros establecidos en los estudios de impacto ambiental.
3. Implementación de sistemas de monitoreo y seguimiento continuo de las aguas ácidas, para evaluar la efectividad de las medidas implementadas y detectar posibles incumplimientos.
4. Establecimiento de responsabilidades y sanciones en caso de incumplimiento de los estándares y requisitos establecidos por el decreto.

Es importante destacar que el DS N° 010-2010 MINAM 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 (Peruano, 2010).

Tabla 1. *Parámetros LMP según D.S. N°010-2010*

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

Fuente: D.S. N°010-2010-MINAM.

2.3. Definición de términos básicos

Lechada de cal: La lechada de cal es una mezcla de cal hidratada con agua que se utiliza principalmente como adhesivo o sellador en la construcción. Se emplea para rellenar juntas o grietas en muros y superficies, brindando una mayor resistencia y durabilidad.

Floculante: El floculante es una sustancia química utilizada en procesos de tratamiento del agua para promover la formación de flóculos, sedimentando las partículas suspendidas y clarificando el líquido. Es ampliamente utilizado en plantas de tratamiento de agua potable, piscinas y procesos industriales.

Alcalinidad: La alcalinidad es una propiedad química del agua que indica su capacidad para neutralizar ácidos. Se mide en unidades de pH y está relacionada

con la presencia de iones hidróxido (OH^-) y bicarbonato (HCO_3^-) en el agua. Una mayor alcalinidad indica una mayor capacidad de neutralización de ácidos.

Acidez: La acidez es una característica química que indica la presencia de iones hidrógeno en una sustancia. Se mide en una escala de pH, donde los valores menores a 7 indican acidez. Las sustancias ácidas pueden causar irritación o corrosión en los tejidos vivos.

pH: El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una solución, expresada en una escala numérica de 0 a 14. Un pH menor a 7 indica acidez, un pH igual a 7 indica neutralidad, y un pH mayor a 7 indica alcalinidad.

STS: Los sólidos totales en suspensión (STS) son aquellos compuestos presentes en un líquido en forma de partículas sólidas de diferentes tamaños y características. Estas partículas pueden ser orgánicas o inorgánicas y se encuentran en suspensión, es decir, no se sedimentan por gravedad.

Turbidez: La turbidez es una propiedad física del agua que indica la presencia de partículas sólidas en suspensión que afectan la transparencia. Se puede medir mediante la cantidad de luz dispersada por estas partículas y se expresa en unidades de Nefelometría Turbidez (NTU).

Pruebas de Jar- Test: Las pruebas de Jar-Test son un conjunto de ensayos utilizados para determinar la eficiencia de los tratamientos de aguas. Se consiste en hacer mezclas de diferentes coagulantes y floculantes para evaluar su capacidad de clarificación y eliminación de sólidos suspendidos.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Mediante el tratamiento de aguas acidas de mina se podrá cumplir el DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.

2.4.2. Hipótesis específicas

1. Realizando el proceso de neutralización con lechada de cal en aguas acidas de mina se determinará el pH para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.
2. Realizando el proceso de oxidación se precipitará los metales presentes en las aguas acida de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.
3. Mediante la etapa de clarificación se tratará la turbidez en agua acida de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variables independientes

Tratamiento de aguas acidas de mina

Indicadores

- pH
- dosificación de lechada de cal
- dosificación de floculante MT-6506

2.5.2. Variables dependientes

Cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM

Indicadores

% de remoción de metales (ppm).

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Tabla 2. Variables e indicadores

Variables	Definición	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente			
Tratamiento de Aguas Acidas de Mina	El proceso de tratamiento de aguas acidas de mina consiste en la eliminación de metales presentes de las aguas, utilizando la técnica de precipitación, la cual es bastante efectivo. Utilizando lechada de cal, floculante controlando el pH y concentraciones finales de metales de acuerdo al DS N° 010-2010 MINAM	pH	Potencial de Hidrogeno
INDICADORES pH Dosificación Lechada de Cal		Lechada de Cal	Dosificación de cal viva
Dosificación de Floculante MT-6506		Floculante MT-6506	Dosificación de floculante MT-6506
Variable dependiente			
Cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM	Es la razón entre la diferencia entre la concentración inicial menos la concentración final y la concentración inicial de metales presente en las aguas acidas de mina	% Remoción de metales	Co = concentración inicial
INDICADORES % Remoción de metales		$= \frac{Co - Cf}{Co} \times 100$	Cf = concentración final
			% de remoción de metales

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TECNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

El proyecto de investigación expone una forma de investigación aplicada tecnológica en la cual se emplea el conocimiento científico y tecnológico para encontrar soluciones prácticas a problemas tecnológicos específicos. (Peñuelas, 2010) define que la investigación aplicada tecnológica se enfoca en generar nuevos conocimientos para su aplicación en la creación de productos, procesos o servicios tecnológicos. Tiene como objetivo resolver problemas prácticos y satisfacer necesidades a través del uso de tecnología y el empleo de metodologías científicas.

Además, su finalidad es que los resultados obtenidos sean aplicables en la mejora de la calidad de vida de las personas y en el desarrollo de la industria y la sociedad en general. Para lograr esto, se adopta un enfoque práctico y orientado a solucionar problemas específicos, teniendo en cuenta las necesidades y demandas del mercado y la sociedad.

3.2. Nivel de investigación

En la investigación se utilizan diferentes procedimientos, como el método analítico, deductivo e inductivo, así como métodos empíricos que involucran

observación y experimentación. (Tamayo y Tamayo, 2000) señala que el método analítico implica descomponer un fenómeno o problema en partes constituyentes para comprender su estructura y funcionamiento. Se estudia cada parte de forma individual y luego se integran los resultados para obtener una comprensión más completa.

(Hernandes Sampieri, Fernandez Collado , & Baptista Lucio, 1997) por otro lado, afirma que el método deductivo consiste en inferir conclusiones específicas a partir de premisas generales o universales. Se aplican reglas lógicas y se parte de una premisa general o teoría para llegar a conclusiones particulares. Si las premisas son verdaderas, la conclusión también será válida.

(Arias, 2012) en cuanto al método inductivo, se basa en la observación de casos particulares para llegar a conclusiones o generalizaciones más amplias. Se plantea una hipótesis a partir de la observación de casos específicos, la cual se somete a prueba y, si se confirma en varias ocasiones, se llega a una conclusión generalizada. Este método busca establecer patrones o regularidades a partir de la observación de casos individuales.

3.3. Métodos de investigación

En la investigación se emplearon los métodos analítico e inductivo-deductivo, René Descartes y Francis Bacon destacaron la importancia del método analítico, mientras que John Stuart Mill realizó importantes aportes al método inductivo-deductivo. Este último propuso que la ciencia debería basarse en la observación y experimentación inductiva para establecer leyes generales, y luego utilizar la deducción lógica para derivar consecuencias específicas a partir de esas leyes.

El método inductivo-deductivo está conformado por dos procedimientos inversos: inducción y deducción. La inducción es una forma de razonamiento en la que se pasa del conocimiento de casos particulares a un conocimiento más general, que refleja lo que hay de común en los fenómenos individuales. Su base es la repetición de hechos y fenómenos de la realidad. Por otro lado, la deducción es un proceso de razonamiento que se utiliza para llegar a conclusiones específicas a partir de teorías generales.

Este método se utiliza para llegar a conclusiones específicas a partir de teorías generales y es una forma rigurosa y estructurada de razonamiento que se utiliza comúnmente en la investigación científica. (N.Kerlinger , 1975)

3.4. Diseño de investigación

El proyecto se basa en un diseño de investigación experimental, el cual, según (Hernandes Sampieri, Fernandez Collado , & Baptista Lucio, 1997), busca establecer una relación de causa y efecto entre variables. Este tipo de diseño se caracteriza por ser sistemático y consiste en la manipulación de una o más variables independientes para determinar su impacto en la variable dependiente.

Además, el diseño de investigación experimental implica la asignación aleatoria de los participantes o muestras en los grupos, con el objetivo de asegurar que cualquier diferencia encontrada entre los grupos se debe únicamente a la manipulación de la variable independiente y no a otros factores externos.

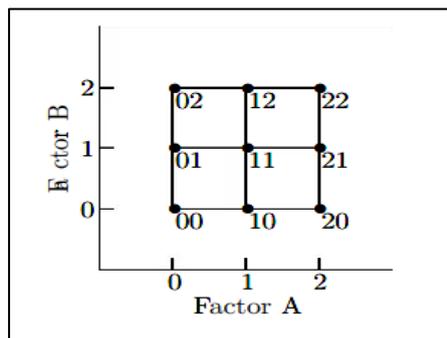
3.4.1. Diseño experimental

El diseño utilizado fue el sistema 3^k específicamente el diseño 3^2 el cual presenta dos factores cada uno con tres niveles, obteniendo un total de 9 tratamientos diferentes.

Las combinaciones de tratamientos de este diseño se presentan en la figura (a). Los nueve tratamientos se pueden escribir de varias maneras, algunas de las cuales se muestra en la tabla (a).

El modelo estadístico para el diseño 3^2 se puede escribir considerando el efecto individual de cada factor y de la interacción entre ambos, como se presenta a continuación. (Gutierrez Pulido & de la Vara Salazar, 2008, pág. 239)

Figura 1. Combinaciones de un diseño 3^2 .



Fuente: Análisis y diseño de experimentos

Figura 2. Diseño factorial 3^2 .

Tratamiento		A	B	A	B
Bajo	Bajo	-1	-1	0	0
Medio	Bajo	0	-1	1	0
Alto	Bajo	1	-1	2	0
Bajo	Medio	-1	0	0	1
Medio	Medio	0	0	1	1
Alto	Medio	1	0	2	1
Bajo	Alto	-1	1	0	2
Medio	Alto	0	1	1	2
Alto	Alto	1	1	2	2

Fuente: Análisis y diseño de experimentos

En consecuencia, se contrasta la hipótesis $H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$ (no hay efecto de interacción de los factores A y B sobre la variable respuesta). Al igual que en los

diseños 2^k , si esta hipótesis no se rechaza, entonces se contrastan las hipótesis:
Ho: $\alpha_i = 0$ (no hay efecto significativo del factor A sobre la variable respuesta) y
Ho : $\beta_j = 0$ (no hay efecto significativo del factor B sobre la variable respuesta).
Estas hipótesis se juzgarán con los resultados del ANOVA. (Gutierrez Pulido & de la Vara Salazar, 2008)

El diseño experimental utilizado para el análisis de los resultados será el diseño factorial, de dos factores (pH y tiempo de residencia), con tres niveles para cada factor, cuyo resultado será la variable dependiente (Precipitación del metal crítico), por lo tanto, el número total de muestras serán:

- N = número de pruebas;
- a1, a2, a3 = Niveles del factor A (valor de pH);
- b1, b2, b3 = Niveles del factor B (tiempo de residencia);
- r = número de repeticiones 2 (aplicables tanto a proceso sólo neutralización y proceso neutralización + oxidación).
- Por consiguiente, el número de pruebas será:
- $N = (D1) * (D2) * (r)$.

En la Tabla N°1, presenta la matriz del diseño preliminar con proceso de sólo neutralización:

$$N = (3 * 2) ^ 2 = 18 \text{ pruebas preliminares.}$$

Tabla 3. *Diseño experimental de neutralización.*

NEUTRALIZACIÓN			
Tiempo	pH		
min	7,5	9,5	10,2
10	W1	W2	W3
20	X1	X2	X3
40	Y1	Y2	Y3

Fuente: Elaboración Propia

Las variables como el tiempo (min) de reacción pueden variar dependientemente de la cinética de neutralización halladas en una etapa exploratoria.

En las siguientes tablas se puede observar las variables y los niveles del diseño experimental.

Tabla 4. *Variables del Diseño Experimental.*

Variable	Factores
Dependiente	% de remoción del metal crítico.
Independiente	A: pH, (dosificación de Lechada de cal)
	B: Tiempo de Residencia

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5. *Factores y Niveles del Diseño Experimental.*

Factores	Niveles		
	1	2	3
pH (dosificación de lechada de cal)	a1	a2	a3
Tiempo de residencia	b1	b2	b3

Fuente: Elaboración Propia

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

(Hernandes Sampieri, Fernandez Collado , & Baptista Lucio, 1997)la población se refiere al conjunto completo de individuos, elementos, objetos o eventos que comparten una característica o cualidad en común bajo estudio. La población puede ser finita o infinita, dependiendo de si se encuentran todos los elementos dentro del alcance del estudio o no. En el proyecto a desarrollar la población estará conformada por aguas acidas de mina de la Poza CW-07, el cual presenta 648 m³ de agua acida de mina, empresa minera Cori Puno S.A.

Figura 3. *Población poza CW-07*



Fuente: *Unidad minera Cori Puno S.A.*

3.5.2. Muestra

(Hernández Sampieri, Fernández Collado , & Baptista Lucio, 1997), la muestra es un subconjunto representativo seleccionado de la población total, que se utiliza para obtener información y realizar inferencias sobre la población en su conjunto. La muestra debe ser seleccionada de forma aleatorio cubriendo toda la población, para asegurar que sea representativa y fidedigno a la población, con esta definición la muestra estará constituida por 1 m³ de la población.

Figura 4. *Descarga del IBC*



Fuente: *Autoría Propia*

Figura 5. Muestra representativa de la población



Fuente: Autoría Propia

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Este proyecto de investigación utilizará diversos equipos de medición y materiales de laboratorio desarrollar las pruebas, así como para estudiar los efectos de la dosificación de lechada de cal y floculante. Se usarán un equipo de Jar-Test con vasos precipitados 2L, reactivos y tipos de floculante, agitadores, plancha de calentamiento y balanzas de precisión, entre otros materiales.

En la parte práctica del estudio, se llevarán a cabo pruebas de Jar- Test, preparando reactivos, así como su dosificación de reactivos a través de jeringas. Para obtener el lodo obtenido el cual sedimenta junto con los metales en la parte inferior del vaso precipitado.

Durante estas pruebas, se controlarán la adición de lechada de cal a determinada concentración, así como el floculante sin olvidar el pH el cual se realizará de acuerdo a los diseños experimentales. También se analizará la cinética

de sedimentación en reposo, el cual se realizará después de adición de floculante a determinada velocidad.

En resumen, este proyecto de investigación usará tecnología de medición y equipos de laboratorio para llevar a cabo pruebas de Tratamiento de aguas acidas en equipo de Jar-Test y analizar la dosificación de reactivos a determinado pH estudiado para la precipitación de metales para cumplir los parámetros del DS N° 010 – 2010 MINAM. Realizando en el laboratorio metalúrgico de las Instalaciones de Certimin S.A.

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

La selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación son aspectos fundamentales en la ejecución de tratamiento de agua acida de mina para el cumplimiento el D.S. N° 010-2010 MINAM. Aquí se describe brevemente cada uno de estos aspectos:

1. Selección de Instrumentos:

Se eligió cuidadosamente los instrumentos de medición, como peachimetro, potenciómetro y equipos de agitación, así como el Jar-Test, que sean adecuados para las condiciones de las pruebas y que cumplan con los requisitos específicos para las pruebas.

2. Validación de Instrumentos:

Se realizó pruebas de validación para asegurarse de que los instrumentos funcionen correctamente y proporcionen mediciones precisas y confiables. Estos incluyeron calibración y comparación con estándares conocidos.

3. Confiabilidad de Instrumentos:

Mantuvimos y calibramos regularmente los instrumentos para garantizar su confiabilidad a lo largo de las pruebas de realizadas en el equipo de Jar-Test.

Registramos y documentamos las lecturas de los instrumentos de manera precisa.

4. Control de Variables:

Utilizamos los instrumentos para controlar variables críticas, como el pH, tiempo de contacto, para garantizar que las condiciones de las pruebas realizadas no presentan sesgo.

5. Registro de Datos:

Registramos de manera sistemática y detallada todas las mediciones y datos obtenidos de los instrumentos durante las pruebas de tratamiento de aguas acidas de mina, cada etapa desde neutralización hasta la adición de CO₂ para regular el pH final.

6. Análisis Estadístico:

Aplicamos análisis estadísticos para evaluar la consistencia y la confiabilidad de los datos recolectados a través de los instrumentos. Esto incluyo análisis de la varianza y pruebas de hipótesis.

7. Seguimiento Continuo:

Realizamos un seguimiento continuo de la confiabilidad de los instrumentos a lo largo de las pruebas y tomar medidas correctivas si se detectan problemas.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos de las pruebas de tratamiento de agua acida de mina en el equipo de Jar-Test implicó la recopilación, organización y evaluación de información relevante para comprender el rendimiento de la remoción de metales totales y disueltos tomando decisiones informadas. A continuación, se describen las técnicas empleadas en el procesamiento y análisis de datos:

1. Recopilación de Datos:

La recopilación de datos se realiza haciendo un registro de las mediciones y parámetros de los datos experimentales, incluyendo las condiciones de prueba, tiempos, concentraciones de reactivos, pH, leyes del % remoción de metales y otras mediciones relevantes.

2. Análisis Descriptivo:

El análisis descriptivo se realiza interpretando valores de las estadísticas básicas, como promedios, desviaciones estándar y rangos de los datos, con la finalidad de interactuar las variables con los factores de experimentación.

3. Visualización de Datos:

Para realizar la visualización de datos como paso previo es la elaboración de gráficos de interacción y de efectos, grafico de Pareto y grafica de contorno, para visualizar los datos e identificar patrones, tendencias o anomalías.

4. Análisis de Variación:

La aplicación de técnicas de análisis de varianza (ANOVA) ayuda para determinar si existen diferencias significativas entre los resultados de diferentes pruebas realizadas en el Jar-Test bajo diferentes condiciones. Esto ayuda a identificar qué variables tienen un efecto en la remoción de metales para el cumplimiento del D.S. N° 010-2010 MINAM.

5. Análisis de Regresión:

El análisis de regresión para modelar relaciones entre variables, como la remoción de metales con el pH y tiempo de contacto esto puede ayudar a predecir el rendimiento bajo diversas condiciones.

6. Análisis de pH y tiempo con el % de remoción de metales:

La evaluación de los datos relacionados como nuestros factores y nuestra variable respuesta, el cual nos permitirá determinar la eficiencia del tratamiento de agua acida de mina con agregación de lechada de cal en la remoción de los metales presentes en el agua para el cumplimiento del D.S. N° 010-2010 MINAM.

7. Optimización de Parámetros:

Empleo de técnicas de optimización para encontrar las condiciones de operación óptimas que maximice el % de remoción de metales, consumo de lechada de cal y floculante MT-6506, y tiempo de contacto.

8. Pruebas Estadísticas:

Aplicación de pruebas estadísticas, como pruebas de hipótesis, para determinar la significancia de las diferencias y relaciones observadas en los datos, para ello se desarrolló un diseño experimental durante todas las pruebas.

9. Interpretación de Resultados:

Interpretación de los resultados obtenidos de los objetivos de la investigación y objetivos del tratamiento durante cada una de las etapas desde el pH a trabajar, así como el % de remoción en función de la interacción de pH y tiempo. Esto incluyó la identificación de las pruebas exploratorias realizadas para la toma de decisiones sobre ajustes en las condiciones de operación.

10. Informe de Resultados:

El informe y resultados es la documentamos y presentación de los resultados en un informe, que incluye todas las observaciones, análisis y conclusiones.

Para la interpretación de los resultados y datos nos apoyamos de softwares como hojas de cálculos de Excel y de software en análisis de datos del software de Minitab.

3.9. Tratamiento estadístico

Para el tratamiento estadístico se formula y prueba las hipótesis para determinar si hay diferencias significativas entre los grupos de tiempo de acondicionamiento. La hipótesis nula (H_0) afirma que no hay diferencias significativas entre los grupos, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) afirmar lo contrario.

Evaluamos la correlación entre el pH y otros factores relevantes, como el % de remoción de metales, para comprender mejor las relaciones de las pruebas experimentales.

Para realizar los análisis estadísticos, se utilizarán modelos tabulares y gráficos para procesar los datos, junto con software como Minitab 2019 y Ms-Excel 2019. Se encontrarán medidas de tendencia central, como la media, la mediana y la moda, y medidas de dispersión, como la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Estas medidas contribuyen al análisis de la distribución de datos en el conjunto de información. Además, se aplicarán el coeficiente de correlación de las pruebas, así como herramientas para probar las hipótesis de investigación y determinar la fuerza y relevancia de las relaciones encontradas. Este métodos permite evaluar la relación entre variables y obtener conclusiones estadísticas en estudios de correlación.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

La investigación respecto al “Tratamiento de aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima –

2023.”se llevo cabo de manera ética, siguiendo los principios de integridad, objetividad y transparencia. La filosofía y la epistemología de la investigación se guio el proceso para garantizar que los resultados sean válidos y relevantes, y que contribuyan al avance del conocimiento en el campo de la metalurgia y la minería de manera responsable.

Además, la investigación se evaluó y gestiono de manera adecuada los posibles riesgos de la investigación, asegurándose de evitar las posibles desventajas o daños. Por último, la honestidad y transparencia son primordiales, evitando cualquier manipulación o sesgo de los datos por intereses particulares.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

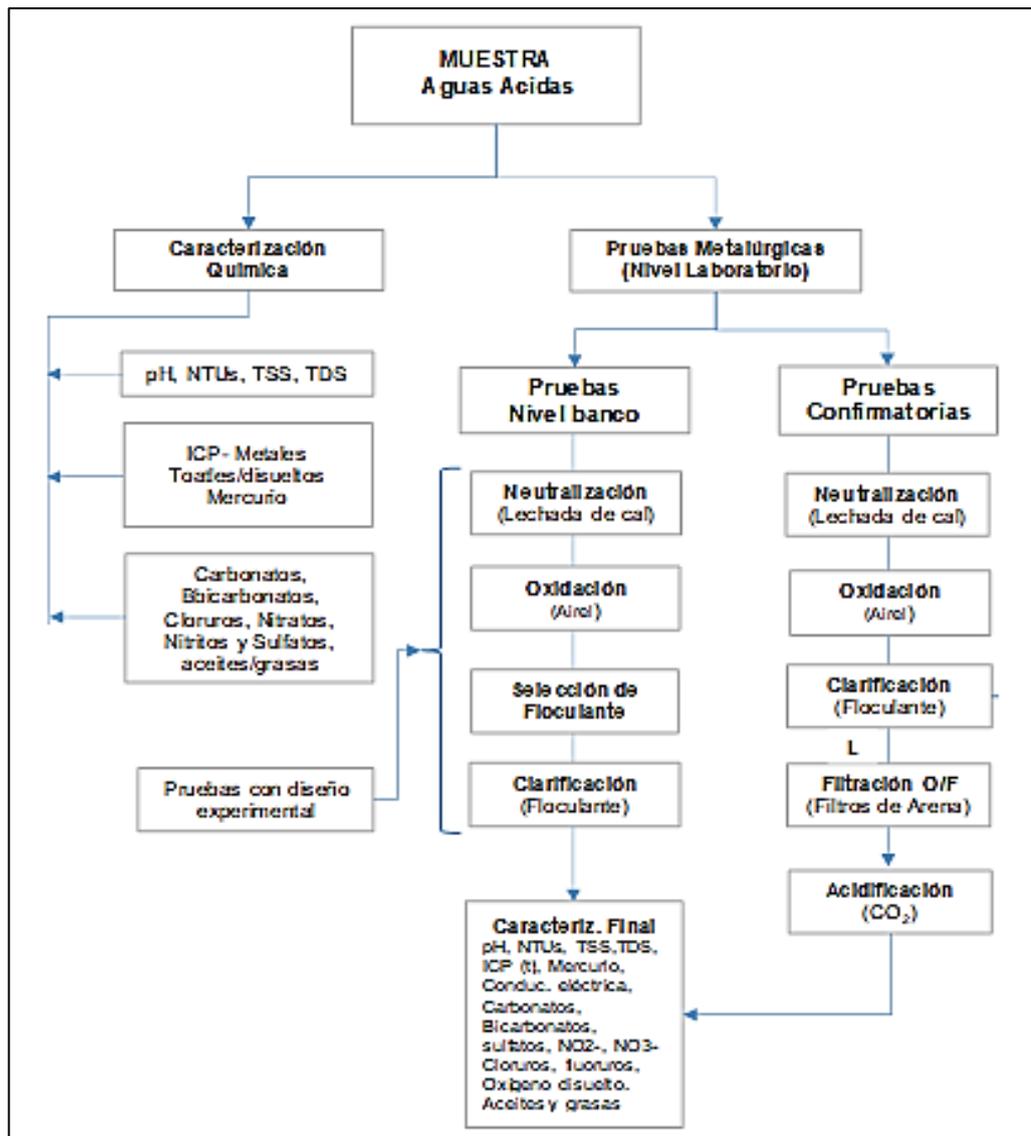
4.1. Descripción del trabajo de campo

4.1.1. Homogenización de muestra

Se realizó la homogenización de la muestra y se procedió a la toma de alícuotas para el análisis de la caracterización física-química de la muestra de cabeza, las muestras fueron codificadas, registrados y enviados para análisis químico en laboratorio, el cual generó una cadena de custodia.

A continuación, se presenta el desarrollo del esquema del tratamiento de las aguas ácidas de mina, desde la llegada de la muestra su recepción, caracterización y pruebas exploratorias y de acuerdo al diseño experimental,

Figura 6. Esquema del trabajo



Fuente: Elaboración Propia

Se realizó el análisis químico de cabeza del compuesto general. Para ello durante la homogenización de muestra análisis se tomaron 3,0 litros de muestra representativa, la cual se envió para medición de pH, NTU's, TSS, TDS, ICP metales totales, ICP metales disueltos, Mercurio, Aceites y Grasas, CN total, TSS, Cr hexavalente.

4.1.2. Caracterización físico química

Las muestras de agua acida de mina contenido en un IBC 1,0 m3 en las instalaciones del laboratorio, se monitoreo los parámetros como pH, ORP y

turbidez de la solución cabeza, homogenización y toma de muestras de cabeza a través de alícuotas, los cuales se enviarón para su análisis por ICP, los cuales después de su reporte por parte del laboratorio químico ambiental, presenta lo siguiente:

La densidad de agua ácida fue 0,995 gr/cm³, con un pH: 3,33-3,35, ORP: 705,8 mv y un contenido de turbidez de 29,6 NTU's.

Tabla 6. Caracterización físico químico de muestras

Código de muestra	Conductiv µmho/cm	pH*	CN Total mg/L	CN Wad mg/L	Alcalinidad Total mg CaCO ₃ /L	Alcalinidad CO ₃ = mg CaCO ₃ /L	Alcalinidad HCO ₃ - mg CaCO ₃ /L	NO ₃ -N mg/L	NO ₂ -N mg/L
PCW-00	822,1	3,3	0,009	<0,005	<1	<1	<1	8,20	<0,005
Cl- mg/L	Cr(VI) mg/L	STS mg/L	TSD mg/L	SO ₄ = mg/L	AcyG mg/L	DurezaTot mg CaCO ₃ /L	Fe+2* mg/L	Fe+3* mg/L	PO ₄ -P mg P/L
18,3	<0,01	6	572	116	2,58	101	<0,010	<0,010	0,019
Hg(t) mg/L	Hg(d) mg/L	Ag(t) mg/L	Ag(d) mg/L	Al(t) mg/L	Al(d) mg/L	As(t) mg/L	As(d) mg/L	Ba(t) mg/L	Ba(d) mg/L
0,0001	<0,0001	0,007	<0,002	20,91	18,93	<0,008	<0,008	0,021	0,020
Be(t) mg/L	Be(d) mg/L	Bi(t)* mg/L	Bi(d)* mg/L	B(t) mg/L	B(d) mg/L	Ca(t) mg/L	Ca(d) mg/L	Cd(t) mg/L	Cd(d) mg/L
0,0040	0,0036	<0,02	<0,02	0,033	0,032	52,41	48,29	0,023	0,021
Ce(t) mg/L	Ce(d) mg/L	Co(t) mg/L	Co(d) mg/L	Cr(t) mg/L	Cr(d) mg/L	Cu(t) mg/L	Cu(d) mg/L	Fe(t) mg/L	Fe(d) mg/L
<0,02	<0,02	0,112	0,097	0,004	<0,004	0,456	0,423	4,97	2,67
K(t) mg/L	K(d) mg/L	Li(t) mg/L	Li(d) mg/L	Mg(t) mg/L	Mg(d) mg/L	Mn(t) mg/L	Mn(d) mg/L	Mo(t) mg/L	Mo(d) mg/L
8,46	7,62	0,036	0,035	32,64	29,46	7,397	6,707	<0,004	<0,004
Na(t) mg/L	Na(d) mg/L	Ni(t) mg/L	Ni(d) mg/L	P(t) mg/L	P(d) mg/L	Pb(t) mg/L	Pb(d) mg/L	Sb(t) mg/L	Sb(d) mg/L
3,62	3,42	0,155	0,136	<0,06	<0,06	0,02	0,02	<0,008	<0,008
Se(t) mg/L	Se(d) mg/L	SiO ₂ (t) mg/L	SiO ₂ (d) mg/L	Sn(t) mg/L	Sn(d) mg/L	Sr(t) mg/L	Sr(d) mg/L	Ti(t) mg/L	Ti(d) mg/L
<0,02	<0,02	33,72	30,75	<0,007	<0,007	0,0765	0,0709	<0,01	<0,01
Tl(t) mg/L	Tl(d) mg/L	V(t) mg/L	V(d) mg/L	Zn(t) mg/L	Zn(d) mg/L				
<0,05	<0,05	<0,003	<0,003	2,202	1,994				

Fuente: Elaboración Propia

La muestra del agua acida de mina presento una baja alcalinidad <1 mg/l de condición ácida con pH igual a 3,3 de baja carga iónica (d) con bajo contenido metálico, con contenidos escasos de nitritos y nitratos.

Así mismo, los resultados comparados con los parámetros según LMP acorde al alcance y objetivo se compararon en la siguiente tabla:

Tabla 7. Comparación de contenido metálico de la muestra

Parámetro	Unidad	Contenido metálico	LMP D.S. N° 010-2010	
		mg/l	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH	-	3,3	6-9	6-9
TSS	mg/l	6	50	25
Aceite y Grasas	mg/l	2,58	20	16
Cianuro total	mg/l	0,009	1	0,8
Arsénico total	mg/l	<0,008	0,1	0,08
Cadmio total	mg/l	0,023	0,05	0,04
Cromo Hexavalente	mg/l	<0,01	0,1	0,08
Cobre total	mg/l	0,456	0,5	0,4
Hierro (disuelto)	mg/l	2,67	2	1,6
Plomo total	mg/l	0,02	0,2	0,16
Mercurio total	mg/l	0,0001	0,002	0,0016
Zinc total	mg/l	2,202	1,5	1

Fuente: Elaboración Propia

Los parámetros que estuvieron por encima de los LMP según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM son el pH, hierro disuelto, zinc total y ligeramente cobre total en cuanto a los demás parámetros se alinean bajo la normativa.

En la tabla N° 07, se observa que los metales presentes en las aguas acidas de mina presentan 2,67 ppm Fe(d) respecto a 4,97 ppm de Fe(t), esto significa que el 53,7%

de la concentración de Fe se encuentra en una fracción menor de 0,45 um (tamaño de abertura de poro en filtración), 1,994 ppm Zn(d) respecto a 2,202 ppm Zn(t), esto significa que 90,6% de la concentración de Zn se encuentra también en una fracción menor de 0,45 um (tamaño de abertura de poro en filtración), el 10,4% restante de la concentración de Zn se encuentra como sólidos suspendidos, respectivamente.

4.1.3. Evaluación de cal

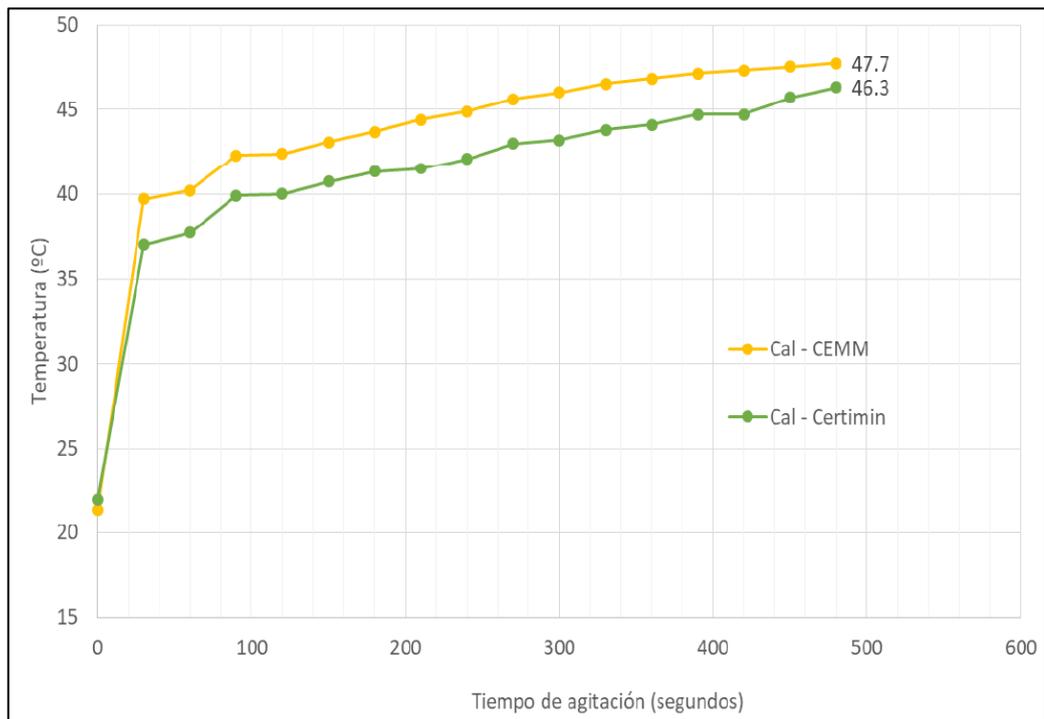
Así mismo, se evaluó el comportamiento de lechada de cal preparada al 20% en este caso cal Mabela de Certimin y cal CEMM Industrial. A continuación, se muestra los parámetros de trabajo:

Tabla 8. *Comportamiento de lechada de cal al 20% peso*

Código de Muestra	Nombre	Tiempo de Agitación (seg)	RPM	PESO TOTAL	PRUEBAS DE REACTIVIDAD DE CAL			
					Temperatura	Lechada de Cal		
					°C	Conc.	W CaO	W H ₂ O
gr	% peso	g	g					
T-01	Certimin	480	170	600	46,3	20	120	480
T-02	CEMM	480	170	600	47,7	20	120	480

Fuente: *Elaboración Propia.*

Figura 7. comportamiento de lechada de cal al 20%



Fuente: Elaboración Propia

De esta evaluación podemos afirmar que una agitación de 8 minutos con lechada de cal preparada al 20 %, se pudo observar que cuando se realizó la medición de temperatura, la cal de mayor rendimiento fue CEMM Industrial llegando a una temperatura final de 48.2 °C.

La reactividad de la muestra de cal de CEMM Industrial presentó una temperatura de reacción de 48,2 °C, con 18 minutos de contacto, con lechada de cal al 20% sólidos, y pH final de 13,2 (reactividad alta),

La densidad de la lechada de cal al 20% de sólidos, procedente de CEMM Industrial fue 1,12 g/m³,

La selección de la cal procedente de CEMM Industrial, se alinea en gran proporción a los requerimientos de la cal para este tipo de tratamiento pruebas de neutralización, una vez seleccionado el tipo de cal a utilizar se procedió a realizar

las pruebas de laboratorio, a fin de hallar el consumo de cal obtenido a diferente pH, los cuales se presenta en la siguiente tabla:

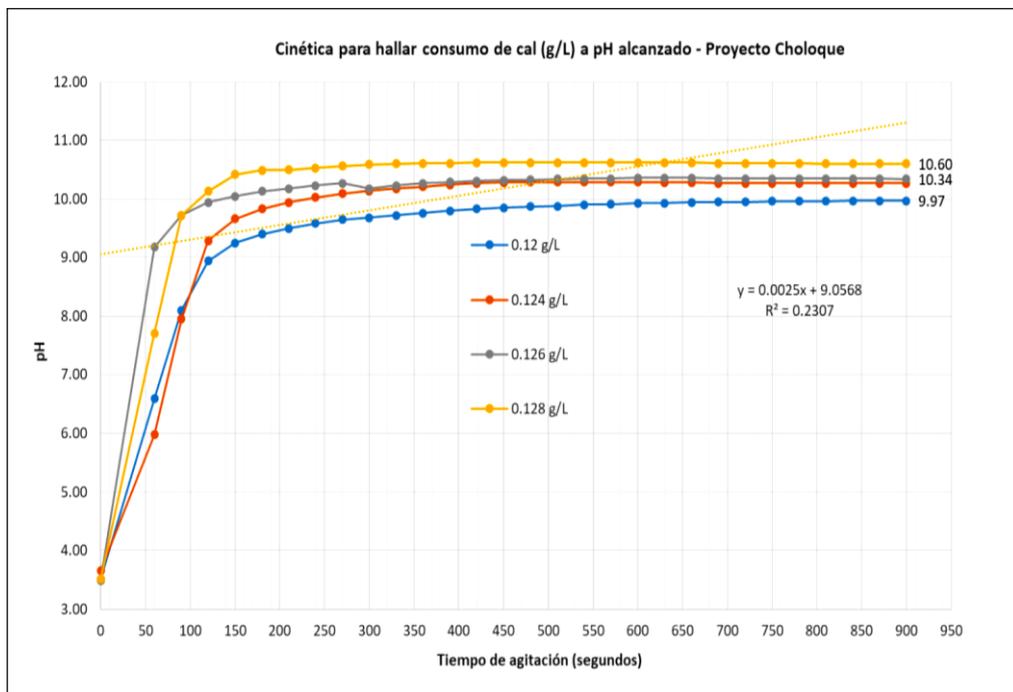
Tabla 9, Consumo de cal para diferentes rangos de pH

Código de Muestra	Volumen (litros)	Tiempo de Agitación (min)	RPM	pH Inicial	PRUEBAS DE NEUTRALIZACIÓN			pH Final
					Lechada de Cal			
					Conc,	Adición	Consumo	
					%	ml	g/l	
T-03	2,0	15	170	3,51	20	1,20	0,1348	9,97
T-04	2,0	15	170	3,52	20	1,24	0,1394	10,27
T-05	2,0	15	170	3,49	20	1,26	0,1416	10,35
T-06	2,0	15	170	3,51	20	1,28	0,1438	10,60
T-07	2,0	15	170	3,50	20	1,30	0,1461	11,00

Fuente: Elaboración Propia

Los consumos de cal para llegar a pH entre 9,97; 10,27; 10,35; 10,6 y 11,0 fueron 0,134; 0,139; 0,141; 0,143 y 0,146 kg/m³, respectivamente.

Figura 8, Cinética de consumo de cal



Fuente: Elaboración Propia

La aplicación de la lechada de cal al 20% de sólidos, procedente de CEMM Industrial, para la neutralización del agua ácida, prevee un tiempo de contacto de 8-10 minutos, para alcanzar rangos de pH: 10,0-10,20. El tiempo de residencia para llegar a pH alcanzado para este tipo de agua ácida son enter necesarios 10 - 25 minutos.

Las Pruebas de alcalinización a pH 7,5 en tiempos de 10, 20 y 40 minutos se realizaron tres pruebas de alcalinización con cal en valores de este pH, a fin de evaluar el tiempo de residencia, clarificación con la preparación de 01 ppm de floculante MT-6505 en función de la precipitación de metales contrastadas por el laboratorio ambiental.

4.1.4. Pruebas de neutralización para precipitación de metales

De acuerdo con el diagrama de las pruebas a nivel conceptual adjuntas en el esquema del desarrollo de pruebas y de acuerdo a la caracterización físico químa de la muestra PCW-00 de la solución ácida al no presentar altos niveles de aluminio, se pudo desarrollar pruebas con un diseño considerando una sola etapa de clarificación.

Se realizaron la neutralización mediante agitación mecánica y lechada de cal para incrementar el pH, con el fin de precipitar principalmente metales como Fe, Cu, Zn. Así mismo, se evaluó el tiempo de residencia necesario para la neutralización, el pH óptimo para la operación y la dosificación de óxido de calcio.

A continuación, se presenta las condiciones de trabajo de las pruebas:

Tabla 10. Pruebas de alcalinización a pH 7,5 a tiempos de 10, 20 y 40 min.

ETAPA DE ALCALINIZACIÓN			Lechada de Cal			Tiempo de Agitación	pH
Test	Vol.	pH	Conc.	Dosificación	Adición		

	litros	inicio	%	ml	mg/l	min	Final
PCW-01	2,0	3,20	20	1,07	105	10	7,5
PCW -02	2,0	3,20	20	1,07	105	20	7,5
PCW -03	2,0	3,20	20	1,07	105	40	7,5
R-PCW-01	2,0	3,20	20	1,07	105	10	7,5
R-PCW -02	2,0	3,20	20	1,07	105	20	7,5
R-PCW -03	2,0	3,20	20	1,07	105	40	7,5

Fuente: Elaboración Propia

El ratio de consumo de cal a pH 7,5 en las pruebas realizadas fue 0,105 kg/m³. Una vez finalizada la etapa de floculación, se dejó reposar la solución por un tiempo de 120 minutos, enseguida se tomó de alícuotas necesarias para el envío a laboratorio ambiental para los análisis químicos, por el método de ICP metales totales y disueltos, los cuales se resume en la siguiente tabla comparada con los LMP:

Tabla 11. Resultados de muestra de cabeza.

Código de Muestra	pH	Hg(t)	Hg(d)	Al(t)	Al(d)	As(t)	As(d)	Cd(t)	Cd(d)	Cr(t)	Cr(d)
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
LMP	6-9	0,0016	-	-	-	0,08	-	0,04	-	-	-
PCW-00	3,2	0,0001	<0,0001	20,91	18,93	0,008	<0,008	0,023	0,021	0,004	<0,004
PCW -01	7,5	0,0001	<0,0001	0,2	0,15	<0,008	<0,008	0,017	0,016	<0,004	<0,004
PCW-02	7,5	0,0001	<0,0001	0,24	0,16	<0,008	<0,008	0,013	0,013	<0,004	<0,004
PCW-03	7,5	0,0001	<0,0001	0,21	0,15	<0,008	<0,008	0,014	0,004	0,006	<0,004
R-PCW -01	7,5	0,0001	<0,0001	0,16	0,13	<0,008	<0,008	0,019	0,010	<0,004	<0,004
R-PCW-02	7,5	0,0001	<0,0001	0,22	0,16	<0,008	<0,008	0,010	0,015	<0,004	<0,004
R-PCW-03	7,5	0,0001	<0,0001	0,19	0,15	<0,008	<0,008	0,015	0,011	0,006	<0,004
Código de Muestra	pH	Cu(t)	Cu(d)	Fe(t)	Fe(d)	Mn(t)	Mn(d)	Pb(t)	Pb(d)	Zn(t)	Zn(d)
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
LMP	6-9	0,4	-	-	1,6	-	-	0,16	-	1,2	-
PCW-00	3,3	0,456	0,423	4,97	2,67	7,397	6,707	0,02	0,02	2,202	1,994
PCW -01	7,5	0,012	0,007	0,03	0,02	6,696	6,272	0,05	0,04	0,492	0,455
PCW-02	7,5	0,008	0,007	0,02	0,02	5,976	5,71	<0,01	<0,01	0,258	0,254
PCW-03	7,5	0,01	0,007	0,04	0,02	6,233	6,012	0,04	0,04	0,385	0,372
R-PCW -01	7,5	0,010	0,007	0,04	0,02	6,796	6,342	0,05	0,04	0,490	0,498
R-PCW-02	7,5	0,006	0,007	0,02	0,02	6,076	6,02	<0,01	<0,01	0,321	0,234
R-PCW-03	7,5	0,01	0,007	0,02	0,02	7,123	6,623	0,04	0,04	0,390	0,342

Fuente: Elaboración Propia

De las pruebas desarrolladas evaluando el tiempo de residencia en función de los contenidos altos como Cu, Fe y Zn (por encima de los LMP), se logran

observar que a pH 7,5 y a un tiempo de 10-20 minutos de tiempo de agitación son necesarios para remover 97% de Cu con un contenido final de 0,01 mg/l, remover 99% de Fe(d) con un contenido final de 0,02 mg/l y remover 75-80 % de Zn(t) con un contenido final de 0,38 mg/l, estando por debajo de los LMP (0,4 mg/l Cu, 1,6 mg/l Fe) a excepción del hierro el cual está por encima de 1,2 mg/l Zn).

Tabla 12. Pruebas de alcalinización a pH 9.5 a tiempos de 10, 20 y 40 min.

Test	ETAPA DE ALCALINIZACIÓN		Lechada de Cal			Tiempo de Agitación	pH
	Vol.	pH	Conc.	Dosificación	Adición		
	litros	inicio	%	ml	mg/l	min	Final
PCW-04	2,0	3,3	20	1,10	136	10	9,5
PCW -05	2,0	3,3	20	1,10	136	20	9,5
PCW -06	2,0	3,3	20	1,10	136	40	9,5
R-PCW-04	2,0	3,3	20	1,10	136	10	9,5
R-PCW -05	2,0	3,3	20	1,10	136	20	9,5
R-PCW -06	2,0	3,3	20	1,10	136	40	9,5

Fuente: Elaboración Propia

El ratio de consumo de cal a pH 9,5 en las pruebas realizadas fue 0,136 kg/m³. Una vez finalizada la etapa de floculación, se dejó reposar la solución por un tiempo de 120 minutos, enseguida se tomó la alícuota necesaria para el envío a laboratorio ambiental para los análisis químicos ICP metales totales y disueltos

Tabla 13. Resultados de cabeza comparados con los LMP.

Código de Muestra	pH	Hg(t)	Hg(d)	Al(t)	Al(d)	As(t)	As(d)	Cd(t)	Cd(d)	Cr(t)	Cr(d)
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
LMP	6-9	0,0016	-	-	-	0,08	-	0,04	-	-	-
PCW-00	3,3	0,0001	<0,0001	20,91	18,93	0,008	<0,008	0,023	0,021	0,004	<0,004
PCW-04	9,5	0,0004	0,0002	0,6	0,48	0,008	<0,008	0,003	0,003	<0,004	<0,004
PCW -05	9,5	0,0002	0,0002	0,56	0,42	0,008	<0,008	0,004	0,002	<0,004	<0,004
PCW -06	9,5	0,0003	0,0001	0,61	0,54	0,008	<0,008	0,003	0,003	<0,004	<0,004
R-PCW-04	9,5	0,0002	0,0001	0,70	0,60	0,008	<0,008	0,004	0,001	<0,004	<0,004
R-PCW -05	9,5	0,0003	0,0002	0,63	0,57	0,008	<0,008	0,004	0,001	<0,004	<0,004
R-PCW -06	9,5	0,0003	0,0001	0,59	0,42	0,008	<0,008	0,003	0,003	<0,004	<0,004
Código de Muestra	pH	Cu(t)	Cu(d)	Fe(t)	Fe(d)	Mn(t)	Mn(d)	Pb(t)	Pb(d)	Zn(t)	Zn(d)
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
LMP	6-9	0,4	-	-	1,6	-	-	0,16	-	1,2	-

PCW-00	3,3	0,456	0,423	4,97	2,67	7,397	6,707	0,02	0,02	2,202	1,994
PCW-04	9,5	0,009	0,006	0,06	0,02	2,623	2,46	0,04	0,04	0,027	0,019
PCW -05	9,5	0,007	0,005	0,01	0,01	2,493	2,229	0,03	0,03	0,023	0,022
PCW -06	9,5	0,009	0,007	0,09	0,05	2,279	2,201	0,05	0,03	0,03	0,028
R-PCW-04	9,5	0,006	0,004	0,06	0,01	2,453	2,53	0,04	0,03	0,023	0,019
R-PCW -05	9,5	0,007	0,006	0,01	0,04	2,493	2,195	0,03	0,04	0,019	0,020
R-PCW -06	9,5	0,008	0,007	0,09	0,05	2,379	2,101	0,03	0,03	0,03	0,028

Fuente: *Elaboración propia*

De las pruebas desarrolladas evaluamos el tiempo de residencia en función de los contenidos altos como Cu, Fe y Zn (por encima de los LMP), se logran observar que a pH 9,5 y a un tiempo de 10-20 minutos de tiempo de agitación son necesarios para remover 98% de Cu con un contenido final de 0,009 mg/l, remover 98-99 % de Fe(d) con un contenido final de 0,05 mg/l y remover 98% de Zn(t) con un contenido final de 0,03 mg/l, estando por debajo de los LMP (0,4 mg/l Cu, 1,6 mg/l Fe y 1,2 mg/l Zn).

Tabla 14. *Pruebas de alcalinización a pH 10,20 a tiempos de 10, 20 y 40 min.*

Test	ETAPA DE ALCALINIZACIÓN		Lechada de Cal			Tiempo de Agitación	pH
	Vol.	pH	Conc.	Dosificación	Adición		
	litros	inicio	%	ml	mg/l	min	Final
PCW-07	2,0	3,3	20	1,26	142	10	10,2
PCW -08	2,0	3,3	20	1,26	142	20	10,2
PCW -09	2,0	3,3	20	1,26	142	40	10,2
R-PCW-07	2,0	3,3	20	1,26	142	10	10,2
R-PCW -08	2,0	3,3	20	1,26	142	20	10,2
R-PCW -09	2,0	3,3	20	1,26	142	40	10,2

Fuente: *Elaboración propia*

El ratio de consumo de cal a pH 10,2 en las pruebas realizadas fue 0,142 kg/m³.

Una vez finalizada la etapa de floculación, se dejó reposar la solución por un tiempo de 120 minutos, enseguida se tomó la alícuota necesaria para el envío a laboratorio ambiental para los análisis químicos ICP metales totales y disueltos, los cuales se resume en la siguiente tabla comparada con los LMP:

Tabla 15. Resultados de cabeza comparados con los LMP.

Código de Muestra	pH	Hg(t)	Hg(d)	Al(t)	Al(d)	As(t)	As(d)	Cd(t)	Cd(d)	Cr(t)	Cr(d)
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
LMP	6-9	0,0016	-	-	-	0,08	-	0,04	-	-	-
PCW-00	3,3	0,0001	<0,0001	20,91	18,93	0,008	<0,008	0,023	0,021	0,004	<0,004
PCW -07	10,2	0,0001	<0,0001	0,96	0,53	0,008	<0,008	0,001	<0,001	0,004	<0,004
PCW-08	10,2	0,0001	<0,0001	1,15	0,92	0,008	<0,008	0,001	<0,001	0,004	<0,004
PCW-09	10,2	0,0001	<0,0001	1,20	1,09	0,008	<0,008	0,001	<0,001	0,004	<0,004
R-PCW -07	10,2	0,0001	<0,0001	0,91	0,40	0,008	<0,008	0,001	<0,001	0,004	<0,004
R-PCW-08	10,2	0,0001	<0,0001	0,97	0,78	0,008	<0,008	0,001	<0,001	0,004	<0,004
R-PCW-09	10,2	0,0001	<0,0001	1,13	1,17	0,008	<0,008	0,001	<0,001	0,004	<0,004
Código de Muestra	pH	Cu(t)	Cu(d)	Fe(t)	Fe(d)	Mn(t)	Mn(d)	Pb(t)	Pb(d)	Zn(t)	Zn(d)
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
LMP	6-9	0,4	-	-	1,6	-	-	0,16	-	1,2	-
PCW-00	3,3	0,456	0,423	4,97	2,67	7,397	6,707	0,02	0,02	2,202	1,994
PCW -07	10,2	0,005	<0,003	0,07	0,06	1,141	0,181	0,01	<0,01	0,033	0,026
PCW-08	10,2	0,004	<0,003	0,06	0,04	0,170	0,030	0,01	<0,01	0,038	0,034
PCW-09	10,2	0,003	<0,003	0,07	0,06	0,154	0,053	0,01	<0,01	0,027	0,021
R-PCW -07	10,2	0,003	<0,003	0,05	0,03	1,120	0,160	0,01	<0,01	0,029	0,019
R-PCW-08	10,2	0,005	<0,003	0,07	0,07	0,190	0,050	0,01	<0,01	0,026	0,030
R-PCW-09	10,2	0,003	<0,003	0,07	0,05	0,131	0,070	0,01	<0,01	0,030	0,027

Fuente: Elaboración propia

De las pruebas desarrolladas evaluando el tiempo de residencia en función de los contenidos altos como Cu, Fe y Zn (por encima de los LMP), se logran observar que a pH 10,2 y a un tiempo de 10-20 minutos de tiempo de agitación son necesarios para remover 99% de Cu con un contenido final de 0,005 mg/l, remover 98% de Fe(d) con un contenido final de 0,06 mg/l y remover 99% de Zn(t) con un contenido final de 0,033 mg/l, estando por debajo de los LMP (0,4 mg/l Cu, 1,6 mg/l Fe y 1,2 mg/l Zn).

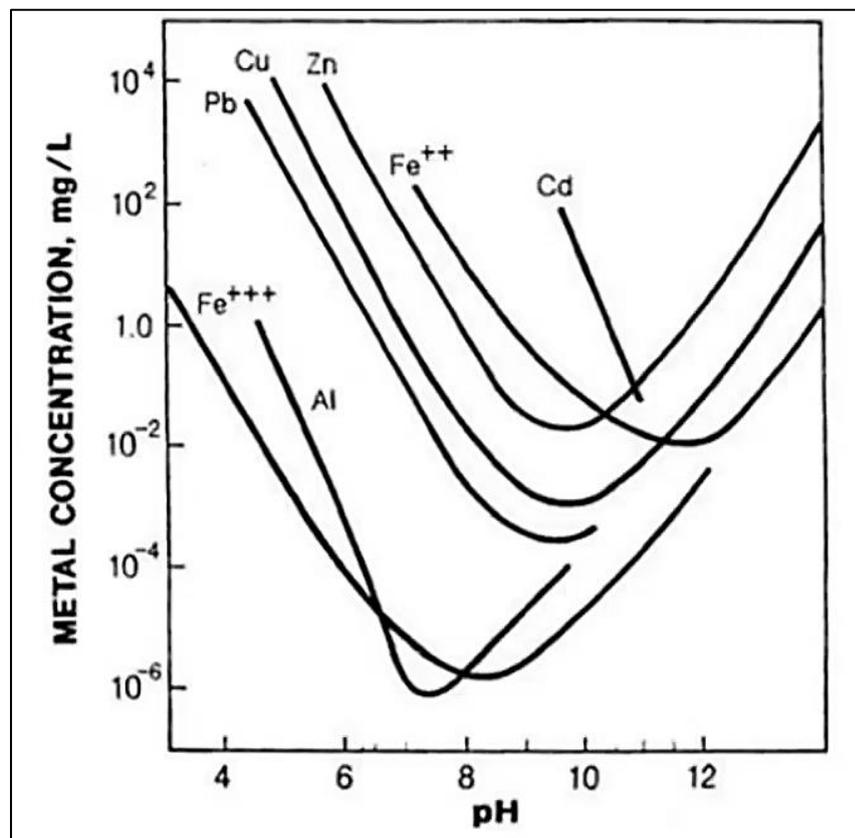
4.1.5. Prueba de oxidación mediante aire fresco.

En la muestra neutralizada tuvo contacto con aire fresco para oxidar los metales básicos, principalmente el Hierro (Fe²⁺ hasta Fe³⁺) y a fin de hacer más

fácil su precipitación, así como del Cu^{2+} y Zn^{2+} mediante la adición de lechada de cal.

La precipitación de estos metales que sobresalieron en la caracterización físico química se realiza mediante la reacción química para la formación de óxidos e hidróxidos, el cual en el gráfico de solubilidad podemos observar a detalle esta precipitación.

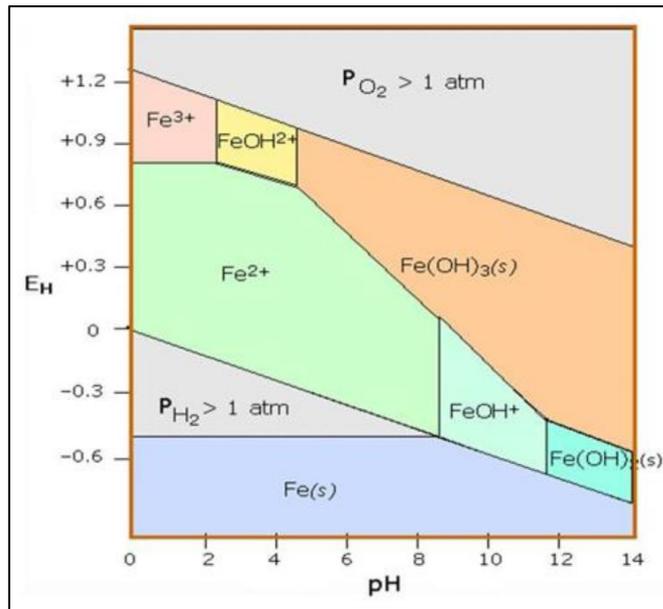
Figura 9. *Curvas de solubilidad*



Fuente: *Solubilidad de los metales en agua.*

Debemos de tener en cuenta también los diagramas de Pourbaix de estos metales, tenemos que observar como es el comportamiento del hierro en este diagrama constituido por la concentración metal mg/L con el pH, se observa y contrasta los resultados que se obtuvo en las pruebas lo cual el hierro precipita a un pH bajo a diferencia del cobre y zinc, esta conclusión se respalda con las curvas de solubilidad.

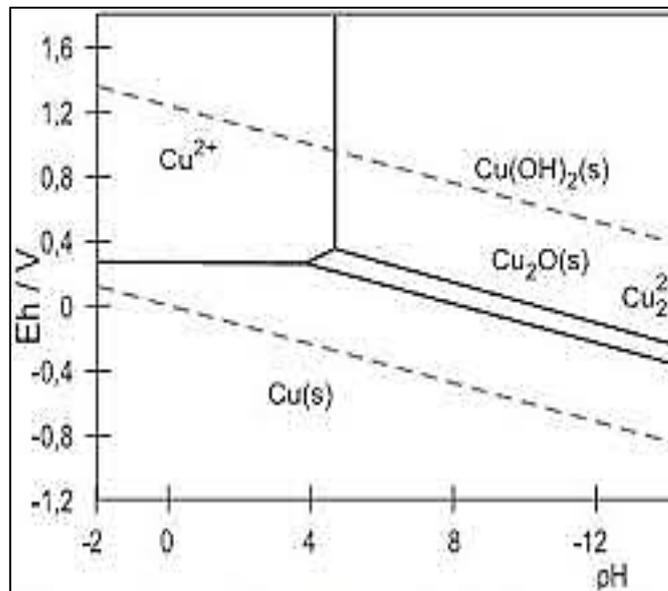
Figura 10. Diagrama de pourbaix de hierro



Fuente: Solubilidad de los metales en agua.

Observamos que el ion ferroso y férrico precipita como hidróxidos en ambos escenarios sin embargo cada uno presenta condiciones diferentes para esta precipitación.

Figura 11. Diagrama de pourbaix de cobre

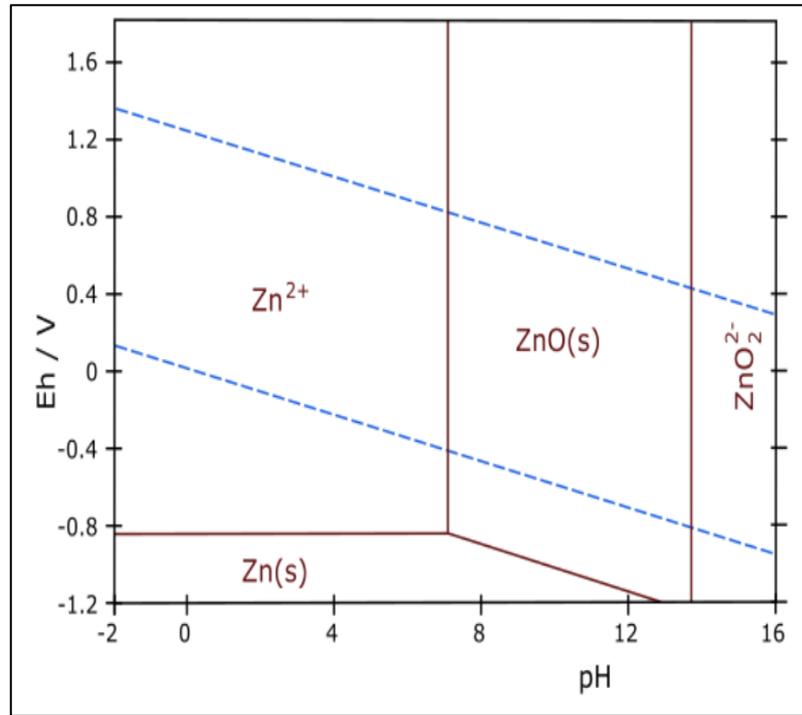


Fuente: Solubilidad de los metales en agua.

Aquí podemos observar que el ion cúprico está en una región ácido y a un potencial de hidrogeno positivo, para poder precipitar este metal pesado tenemos

que llevar una región alcalina y de acuerdo a la zona del compuesto formado leído por un potenciómetro.

Figura 12. Diagrama de pourbaix de zinc



Fuente: Solubilidad de los metales en agua.

En zinc presenta un solo valor de valencia el cual es divalente, por el cual el compuesto a formarse por el proceso de neutralización con adición de lechada de cal a través de una reacción química será el óxido de zinc, como se puede observar.

4.1.6. Pruebas de selección de floculante

Estas pruebas fueron realizadas para determinar el tipo y la dosificación óptima de floculante que se deberán usar en las etapas de clarificación, teniendo como finalidad disminuir los TSS en el overflow del clarificador y por ende, evitar la descarga de metales totales al cuerpo receptor final.

Se probaron los rendimientos de por lo menos 4 floculantes catiónicos, para luego seleccionar el producto cuyos resultados presentaron menor turbidez durante las pruebas de clarificación.

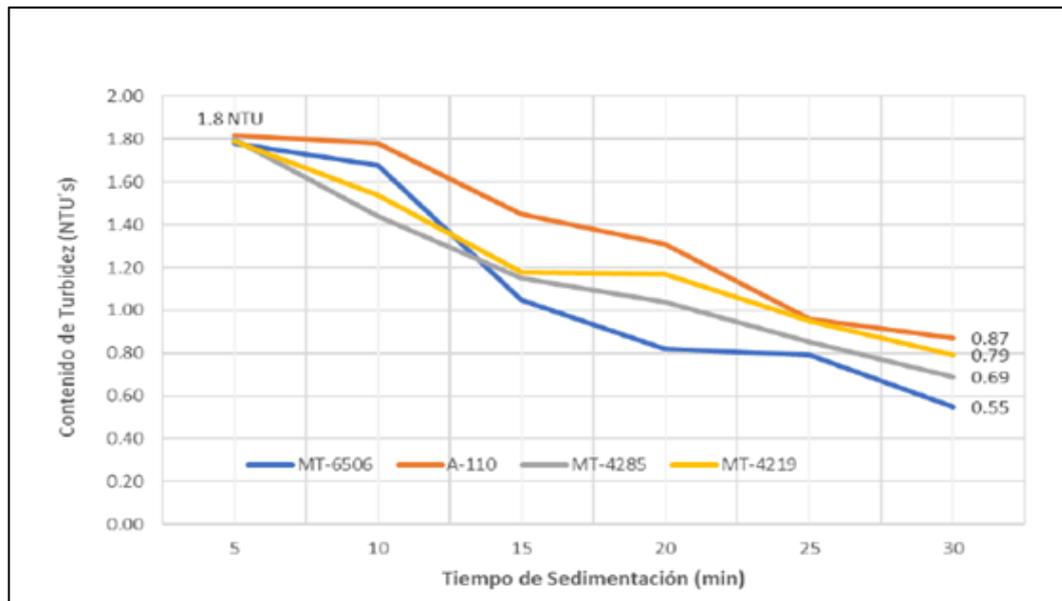
Según la evaluación de floculantes después de un proceso de alcalinización a pH 10,2 el de menor turbidez, el cual se determina de acuerdo al valor de los NTU's es el floculante MT-6506, las condiciones de trabajo para estas pruebas se comparten a continuación:

Tabla 16. Pruebas de selección de floculante.

ETAPA DE FLOCULACIÓN			FLOCULANTE			TIEMPO DE AGITACIÓN	NTU's
CÓDIGO	VOL. Litros	pH Tratado	Conc. %	Dosificación ml	Adición mg/l		
MT-6506	2,0	10,20	0,1	2,0	1,0	3	0,55
A-110	2,0	10,20	0,1	2,0	1,0	3	0,87
MT-4285	2,0	10,20	0,1	2,0	1,0	3	0,69
MT-4219	2,0	10,20	0,1	2,0	1,0	3	0,79

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Evaluación de floculantes



Fuente: Elaboración propia

4.1.7. Pruebas de acidificación mediante CO₂.

Luego de precipitar los metales base a pH mayores a 9,5 se realizó las pruebas de acidificación mediante CO₂, con la finalidad de regular el pH de la solución clarificada. Las pruebas se realizaron con volumen mínimo de 50 litros.

De las pruebas se obtuvo los siguientes datos:

- La dosificación y consumo de CO₂ por m³ de solución tratada.
- Tiempo para la estabilidad del pH con el CO₂.
- Grado de disminución del pH.

Las condiciones de las pruebas acidificadas en soluciones neutralizadas fueron las mostradas a continuación

Tabla 17. *Condiciones de pruebas de acidificación en soluciones neutralizadas*

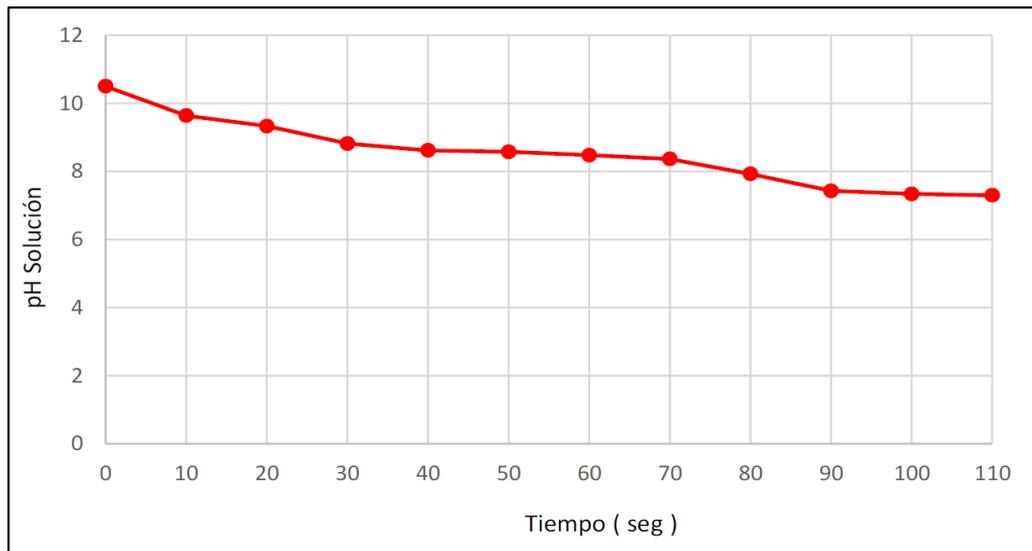
Flujo CO ₂ (L/min)	Presión interna (Bar)	Presión de salida (Bar)	Volumen de solución (L)
0,48	62	2,5	19,3

Fuente: *Elaboración propia*

Esta tabla presenta las condiciones de las pruebas de acidificación de soluciones neutralizadas con inyección de CO₂, el flujo inyecta fue 0,48 L/min, la presión interna del balón de CO₂, 62 bar y presión de salida del gas CO₂ de 2,5.

El volumen de solución neutralizada fue de 19,3 L, con un pH inicial de 10,20

Figura 14. Variación del pH



Fuente: Elaboración propia

La Figura N° 14, presenta la variación de pH de solución y tiempo de inyección de CO₂. El pH inicial de la solución neutralizada fue 10,20 se aplicó un flujo de 0,48 L/min de CO₂, se observa que después de 50 segundos, el pH desciende a 8,58 luego se aprecia un ligero descenso, y finalmente el remanente de CO₂, continúa reaccionando hasta alcanzar un pH final de 7,34.

Se aprecia un ligero exceso de CO₂, presente en la solución. Teniendo en cuenta el valor de rango final de pH: 7,34 el consumo de CO₂ fue de 30 g/m³.

4.1.8. Caracterización físico química de la solución tratada

Al realizar los análisis químicos de solución tratada de las aguas ácidas de mina, de las pruebas metalúrgicas como son: neutralización a pH 10,20 en 20 minutos de contacto con lechada de cal, el cual fue acidificado con CO₂ a nivel banco. Para estos análisis se tomaron 2,0 litros de muestra representativa, los que se enviarán para el análisis de: pH, NTU's, TSS, TDS, ICP metales totales, ICP metales disueltos, Mercurio, Aceites y Grasas, CN total, TSS, Cr hexavalente parámetros de acuerdo al DS N°010-2010 MINAM, los cuales presentaron una densidad de agua ácida fue 0,995 gr/cm³, con un pH final de 7,34.

Tabla 18. Caracterización físico química de la solución tratada.

Código de muestra	Conductividad $\mu\text{mho/cm}$	pH*	CN Total mg/L	CN Wad mg/L	Fluoruros mg/L	Alcalinidad $\text{CO}_3=$ mg CaCO_3/L	Alcalinidad HCO_3- mg CaCO_3/L	$\text{NO}_3\text{-N}$ mg/L	$\text{NO}_2\text{-N}$ mg/L
PCW-19	753,2	7,34	<0,005	<0,005	0,6	12	68	0,77	0,017
Cl- mg/L	Cr(VI) mg/L	STS mg/L	$\text{SO}_4=$ mg/L	AcyG mg/L	Dureza Total mg CaCO_3/L	$\text{PO}_4\text{-P}$ mg P/L	Hg(t) mg/L	Hg(d) mg/L	Ag(t) mg/L
3	<0,01	<5	28	<0,50	470	<0,010	<0,0001	<0,0001	<0,002
Ag(d) mg/L	Al(t) mg/L	Al(d) mg/L	As(t) mg/L	As(d) mg/L	Ba(t) mg/L	Ba(d) mg/L	Be(t) mg/L	Be(d) mg/L	Bi(t)* mg/L
<0,002	1,11	0,97	<0,008	<0,008	0,022	0,017	<0,003	<0,003	<0,02
Bi(d)* mg/L	B(t) mg/L	B(d) mg/L	Ca(t) mg/L	Ca(d) mg/L	Cd(t) mg/L	Cd(d) mg/L	Ce(t) mg/L	Ce(d) mg/L	Co(t) mg/L
<0,02	0,042	0,04	142,25	135,43	0,003	0,002	0,05	0,05	<0,002
Co(d) mg/L	Cr(t) mg/L	Cr(d) mg/L	Cu(t) mg/L	Cu(d) mg/L	Fe(t) mg/L	Fe(d) mg/L	K(t) mg/L	K(d) mg/L	Li(t) mg/L
<0,002	<0,004	<0,004	0,007	0,005	0,02	0,02	9,05	8,4	0,108
Li(d) mg/L	Mg(t) mg/L	Mg(d) mg/L	Mn(t) mg/L	Mn(d) mg/L	Mo(t) mg/L	Mo(d) mg/L	Na(t) mg/L	Na(d) mg/L	Ni(t) mg/L
0,098	25,97	24,3	0,039	0,014	0,017	0,015	3,91	3,85	0,006
Ni(d) mg/L	P(t) mg/L	P(d) mg/L	Pb(t) mg/L	Pb(d) mg/L	Sb(t) mg/L	Sb(d) mg/L	Se(t) mg/L	Se(d) mg/L	$\text{SiO}_2\text{(t)}$ mg/L
<0,002	0,07	<0,06	0,01	0,01	0,035	0,034	<0,02	<0,02	8,08
$\text{SiO}_2\text{(d)}$ mg/L	Sn(t) mg/L	Sn(d) mg/L	Sr(t) mg/L	Sr(d) mg/L	Ti(t) mg/L	Ti(d) mg/L	Tl(t) mg/L	Tl(d) mg/L	V(t) mg/L
7,68	<0,007	<0,007	0,116	0,1149	<0,01	<0,01	0,12	0,12	<0,003
V(d) mg/L	Zn(t) mg/L	Zn(d) mg/L							
<0,003	0,021	0,018							

Fuente: Elaboración propia

La muestra del agua acida de mina presento un pH igual a 7,34 la presencia de contenidos metálicos fueron no considerables, los resultados comparados con los parámetros según limite máximos permisibles se alinean y cumplen en su totalidad de parámetro.

Tabla 19. Contenido metálico final.

Parámetro	Unidad	Contenido metálico (inicial)	Contenido metálico (final)	LMP D.S. N° 010-2010	
		mg/l	mg/l	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH	-	3,3	7,34	6-9	6-9
TSS	mg/l	6	<5	50	25
Aceite y Grasas	mg/l	2,58	<0,50	20	16
Cianuro total	mg/l	0,009	<0,005	1	0,8
Arsénico total	mg/l	<0,008	<0,008	0,1	0,08
Cadmio total	mg/l	0,023	0,003	0,05	0,04
Cromo Hexavalente	mg/l	<0,01	<0,01	0,1	0,08
Cobre total	mg/l	0,456	0,007	0,5	0,4
Hierro (disuelto)	mg/l	2,67	0,02	2	1,6
Plomo total	mg/l	0,02	0,01	0,2	0,16
Mercurio total	mg/l	0,0001	<0,0001	0,002	0,0016
Zinc total	mg/l	2,202	0,021	1,5	1

Fuente: Elaboración propia

Recordemos que los parámetros que estuvieron por encima de los LMP según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM fueron el pH, hierro disuelto, zinc total y ligeramente cobre total en cuanto a los demás parámetros se alinean bajo la normativa, ahora veremos una comparación con el contenido metálicos del agua acida de mina inicial y tratada.

Cobre (t) 0,456 mg/L, el hierro (d) tuvo 2,67 mg/L y zinc (t) 2,202 fueron los contenidos al inicio y comparando con el contenido metálico final son: cobre (t) 0,007 mg/L, el hierro (d) tuvo 0,02 mg/L y zinc (t) 0,021.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Análisis y resultados de pruebas realizadas a pH 7.5

De las pruebas desarrolladas evaluamos el pH 7,5 y el tiempo de residencia en función de los contenidos altos como Cu, Fe y Zn (por encima de los LMP), se logran observar que se presenta remoción de 98% de Cu en 20 minutos de contacto, remover 99% de Fe(d) y remover 88,35 % de Zn(t) en un tiempo de 20 minutos

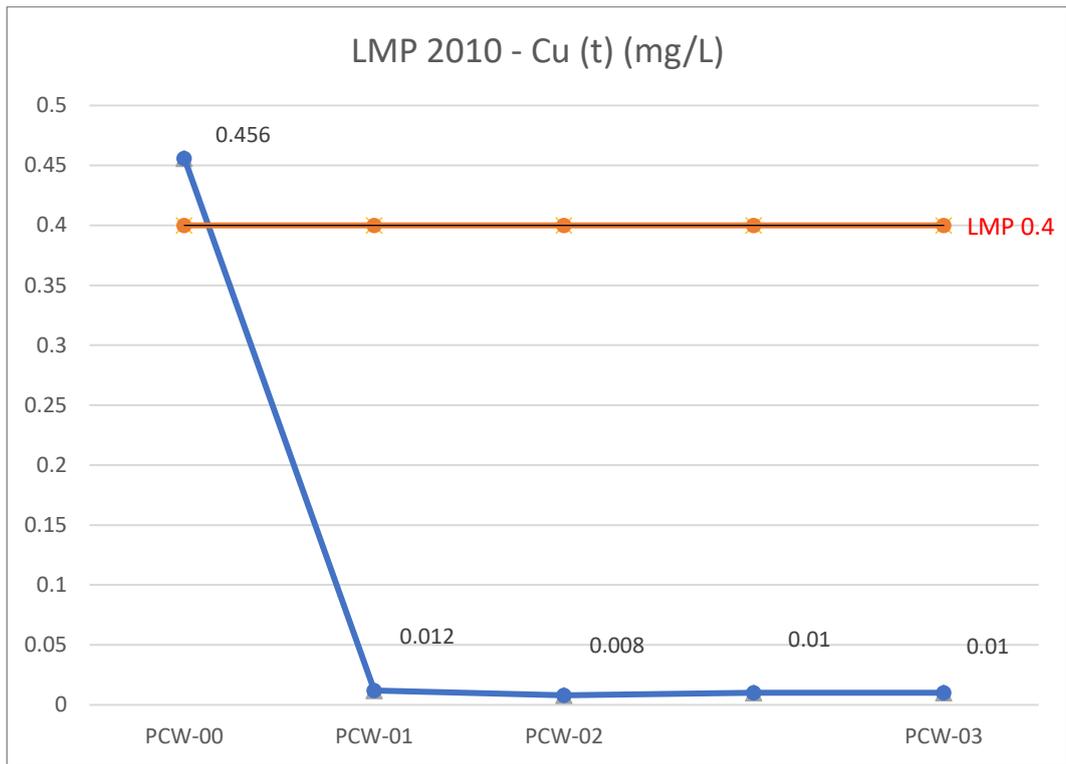
Tabla 20. Análisis y resultados de pruebas a pH 7,5

	Código de Muestra	pH	Cu (t)	Fe (d)	Zn (t)
			mg/L	mg/L	mg/L
	PCW-00	3,3	0,456	2,67	2,202
	LMP	6-9	0,4	1,6	1,2
% de Remoción	PCW -01	7,5	97,37	99,25	77,66
% de Remoción	PCW-02	7,5	98,24	99,24	88,35
% de Remoción	PCW-03	7,5	97,81	99,25	82,52
% de Remoción	R-PCW -01	7,5	97,40	99,30	77,50
% de Remoción	R-PCW-02	7,5	97,90	99,15	87,20
% de Remoción	R-PCW-03	7,5	92,10	99,24	81,90

Fuente: Elaboración propia

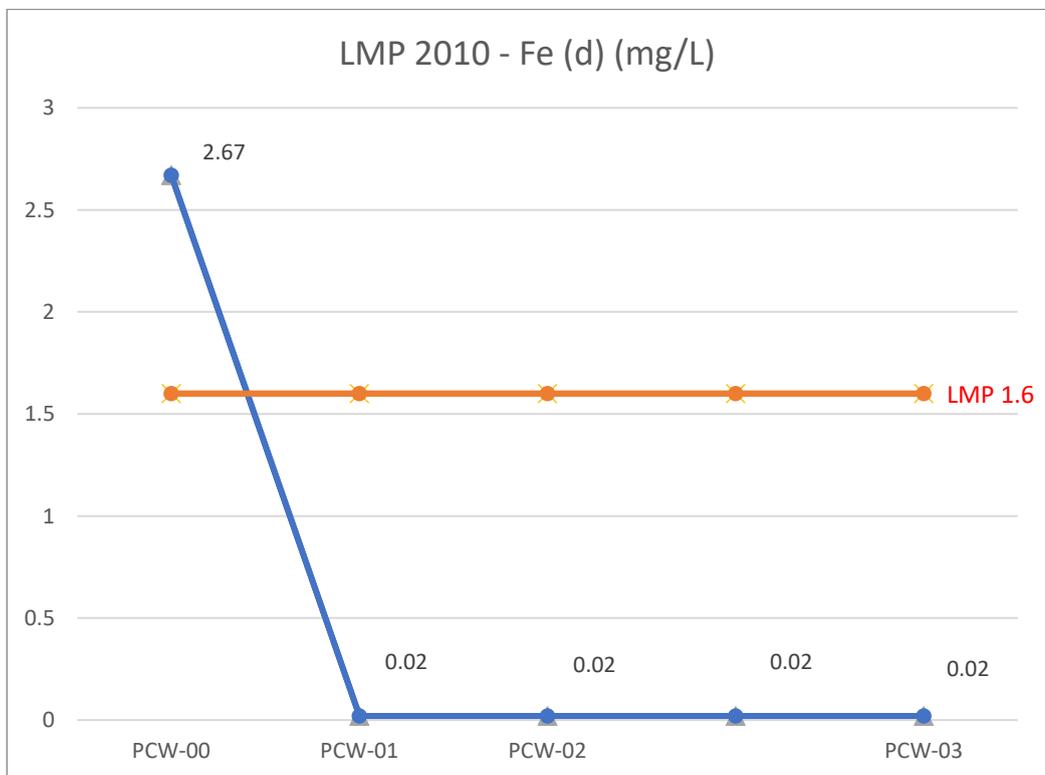
Podemos observar que la evaluación de la precipitación de cobre a pH 7,5 se precipita sin ningún problema el cual desciende de la concentración inicial de 0,456 mg/L a concentraciones de 0,012; 0,008 y 0,01 en 10, 20 y 40 minutos respectivamente observamos que la menor concentración de cobre es de 20 minutos, en cambio en la tabla N° 20 se observa que la concentración del hierro es constante en el minuto 10, 20 y 40 con una concentración de 0,02 mg/L de hierro disuelto.

Figura 15. Evaluación de la precipitación de cobre (mg/L) a pH 7,5



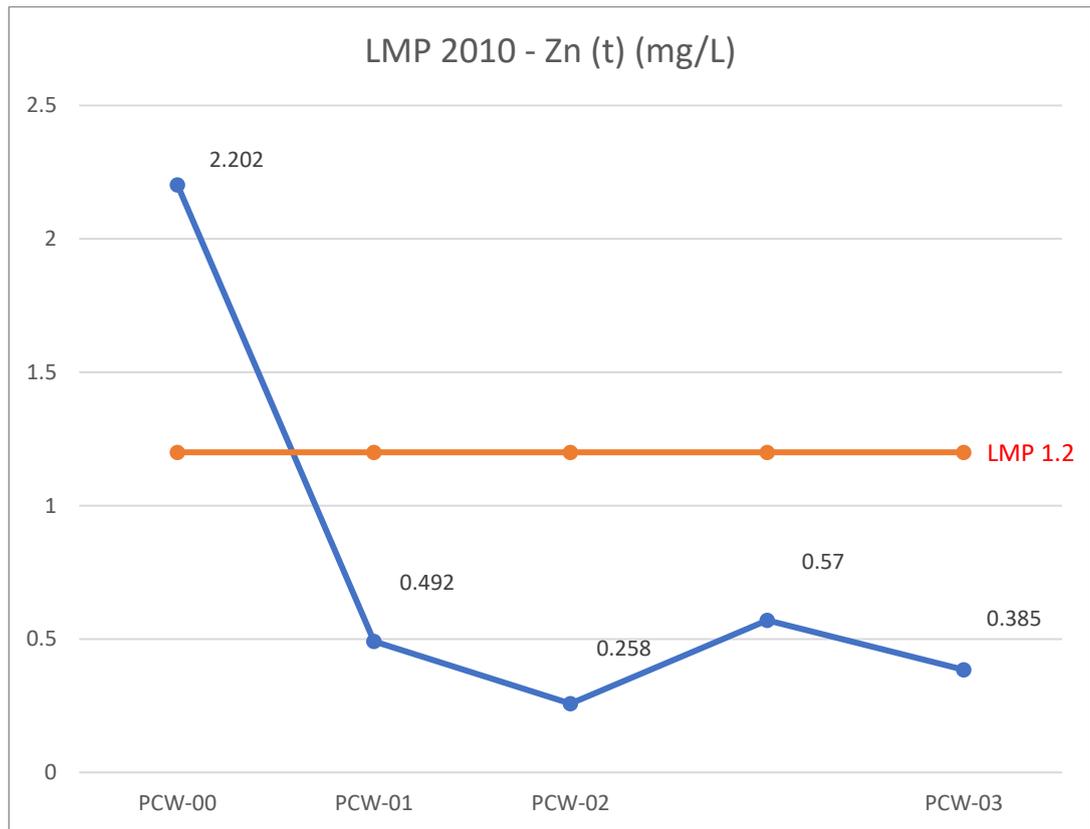
Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Evaluación de la precipitación de hierro (mg/L) a pH 7,5



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Evaluación de la precipitación de zinc a pH 7,5 (mg/L)



Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Análisis y resultados de pruebas realizadas a pH 9,5

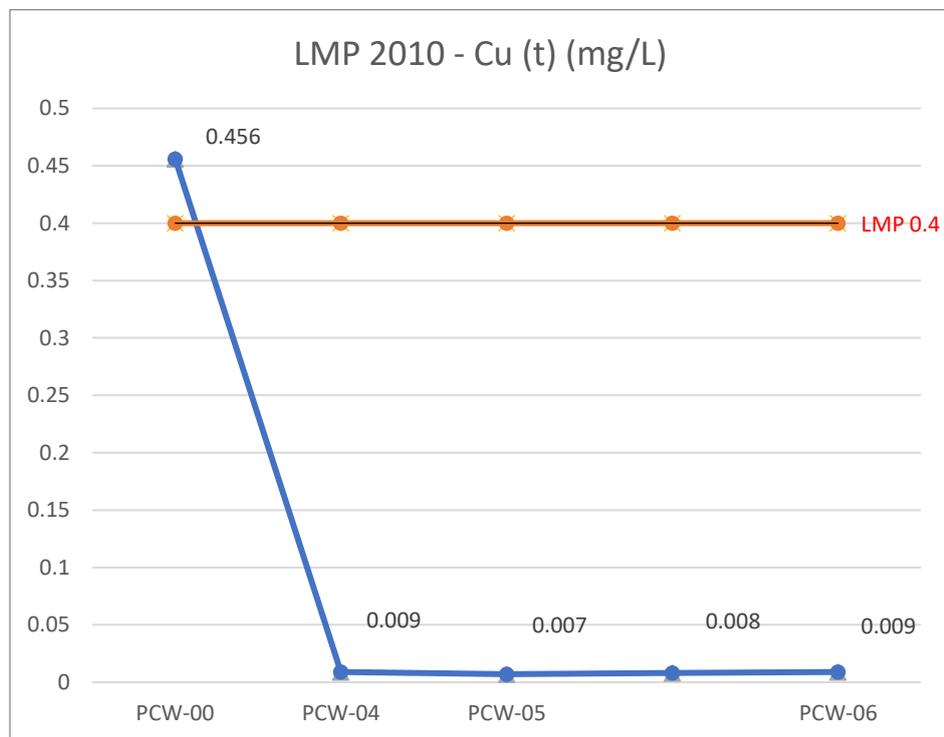
De las pruebas desarrolladas evaluando el pH 9,5 y el tiempo de residencia en función de los contenidos altos como Cu, Fe y Zn (por encima de los LMP), se logran observar que se presenta remoción de 98,46 % de Cu en 20 minutos de contacto, remover 99, 62% de Fe(d) y remover 98,96 % de Zn(t) en un tiempo de 20 minutos.

Tabla 21. Análisis y resultados de pruebas a pH 9,5

	Código de Muestra	pH	Cu (t)	Fe (d)	Zn (t)
			mg/L	mg/L	mg/L
	PCW-00	3,3	0,456	2,67	2,202
	LMP	6-9	0,4	1,6	1,2
% de Remoción	PCW -04	9,5	98,03	99,25	98,77
% de Remoción	PCW-05	9,5	98,46	99,62	98,96
% de Remoción	PCW-06	9,5	98,03	98,13	98,64
% de Remoción	R-PCW -04	9,5	98,10	99,15	98,80
% de Remoción	R-PCW-05	9,5	98,24	99,42	98,91
% de Remoción	R-PCW-06	9,5	97,97	98,34	98,70

Fuente: Elaboración propia

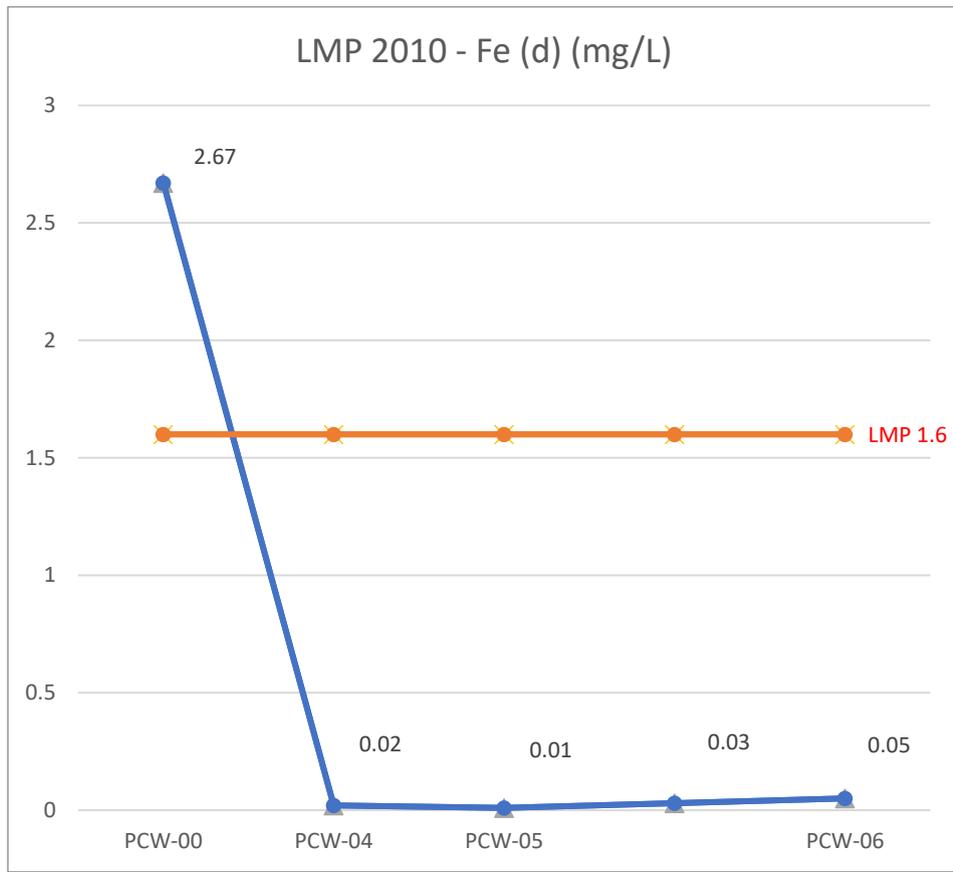
Figura 18. Evaluación de la precipitación de cobre a pH 9,5 (mg/L)



Fuente: Elaboración propia

El Cu (t) a pH 9,5 en el min 20 es de 0,007 mg/L de cobre con bastante claridad.

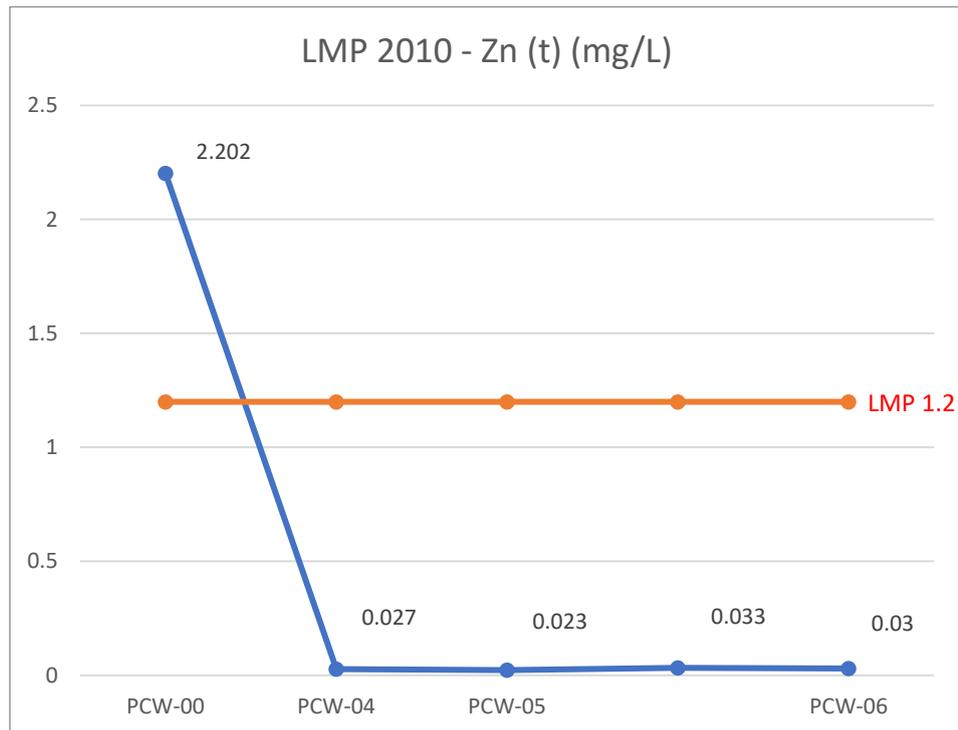
Figura 19. Evaluación de la precipitación de hierro a pH 9,5 (mg/L)



Fuente: Elaboración propia

Observamos una diferencia a pH 9,5 el cual ya no es constante la concentración de hierro disuelto, existe una resolución cuando esta la solución en contacto con Ca(OH)_2 .

Figura 20. Evaluación de la precipitación de zinc a pH 9,5 (mg/L)



Fuente: Elaboración propia

La evaluación de la precipitación de zinc a pH 9,5 presenta valores ligeramente diferentes, podemos observar que la concentración menor del zinc total se realiza en el minuto 20 con un valor de 0,023 mg/L y a mayor tiempo que está en contacto la concentración es mayor como observamos en el minuto 40 con un valor de 0,03.

A pesar de ello estamos muy por debajo de la concentración del límite máximo permisible del zinc total presente en una solución que es 1,2 mg/L.

4.2.3. Análisis y resultados de pruebas realizadas a pH 10,20

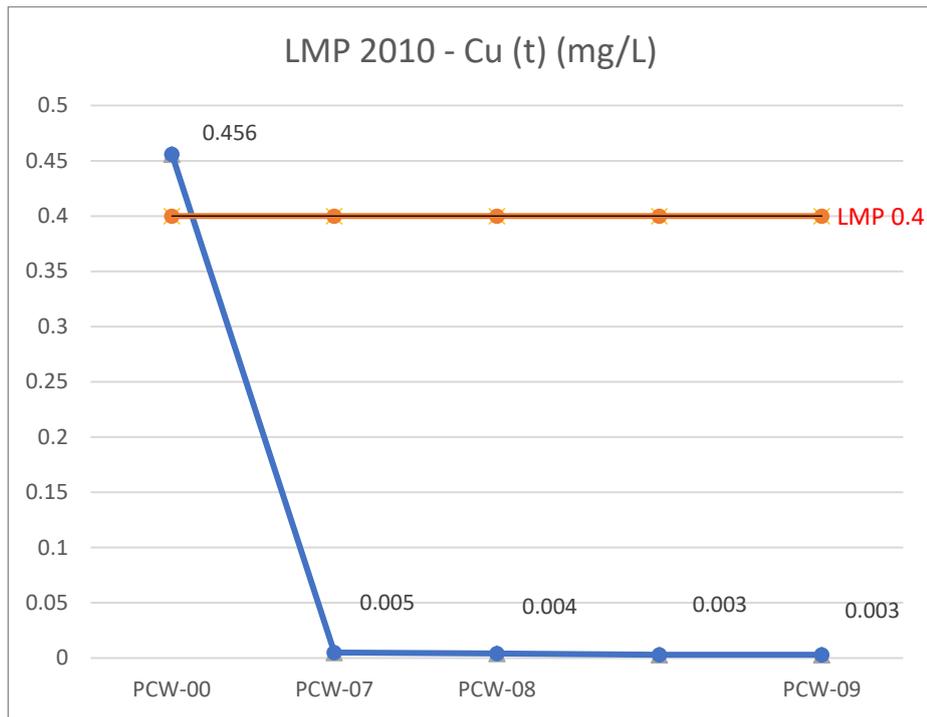
De las pruebas desarrolladas evaluando el pH 10,20 y el tiempo de residencia en función de los contenidos altos como Cu, Fe y Zn (por encima de los LMP), se logran observar que se presenta remoción de 99 % de Cu entre 20 y 40 minutos de contacto, remover 98,49 % en el minuto 20 de Fe(d) y remover 98 % de Zn(t).

Tabla 22. Análisis y resultados de pruebas a pH 10,20

	Código de Muestra	pH	Cu (t)	Fe (d)	Zn (t)
			mg/L	mg/L	mg/L
	PCW-00	3,3	0,456	2,67	2,202
	LMP	6-9	0,4	1,6	1,2
% de Remoción	PCW -07	10,20	98,90	97,75	98,50
% de Remoción	PCW-08	10,20	99,12	98,49	98,28
% de Remoción	PCW-09	10,20	99,34	97,75	98,77
% de Remoción	R-PCW -07	10,20	99,00	97,70	98,45
% de Remoción	R-PCW-08	10,20	99,20	98,30	98,30
% de Remoción	R-PCW-09	10,20	99,30	97,80	98,69

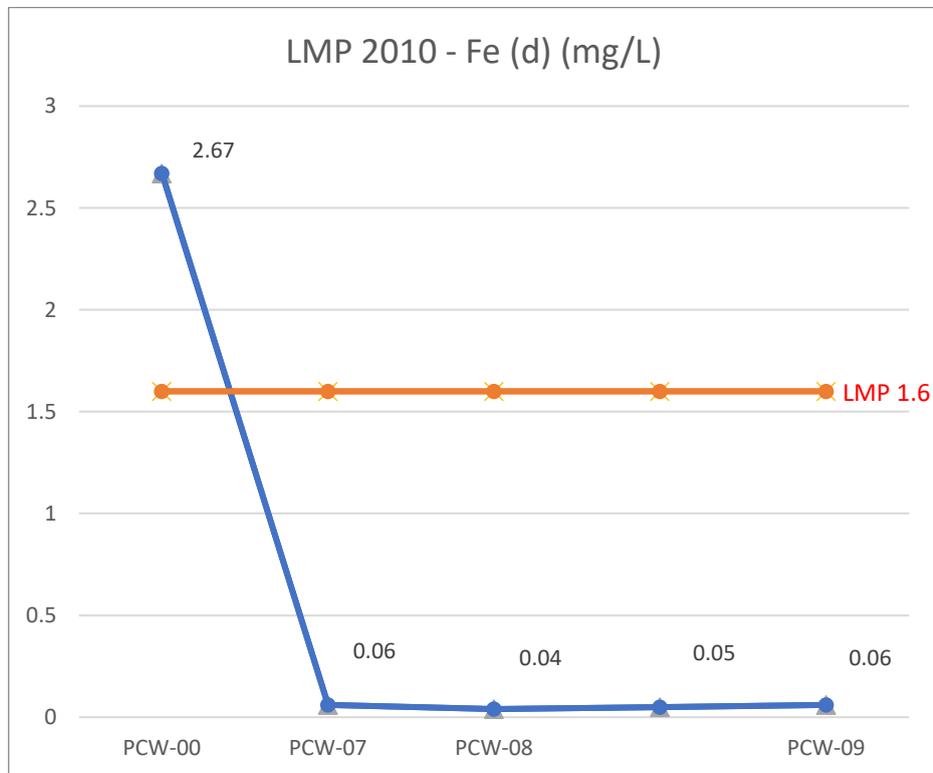
Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Evaluación de la precipitación de cobre a pH 10,20 (mg/L)



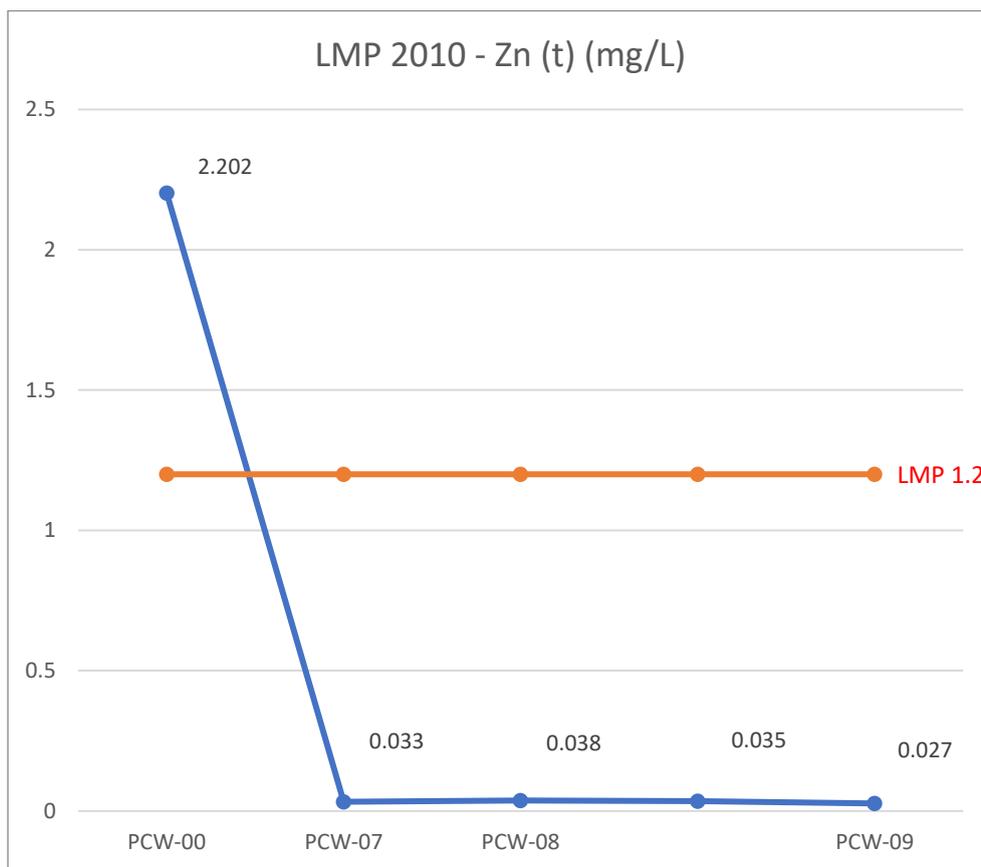
Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Evaluación de la precipitación de hierro a pH 10,20 (mg/L)



Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Evaluación de la precipitación de zinc a pH 10,20 (mg/L)



Fuente: Elaboración propia

El Cu (t) a pH 10,20 en el minuto 20 es de 0,004mg/L, sin embargo en el minuto 40 es de 0,003 mg/L, la concentración de hierro disuelto, presente en la solución con el valor mínimo es el minuto 20 con un valor de 0,04 mg/L. La evaluación de la precipitación de zinc a pH 10,20 presenta valores ligeramente diferentes, podemos observar que la concentración menor del zinc total se realiza en el minuto 40 con un valor de 0,027 mg/L, se observa también que la concentración es mayor en el minuto 20 con un valor de 0,038. A pesar de ello estamos muy por debajo de la concentración del límite máximo permisible del zinc total presente en una solución que es 1,2 mg/L.

4.2.4. Análisis estadístico de cobre

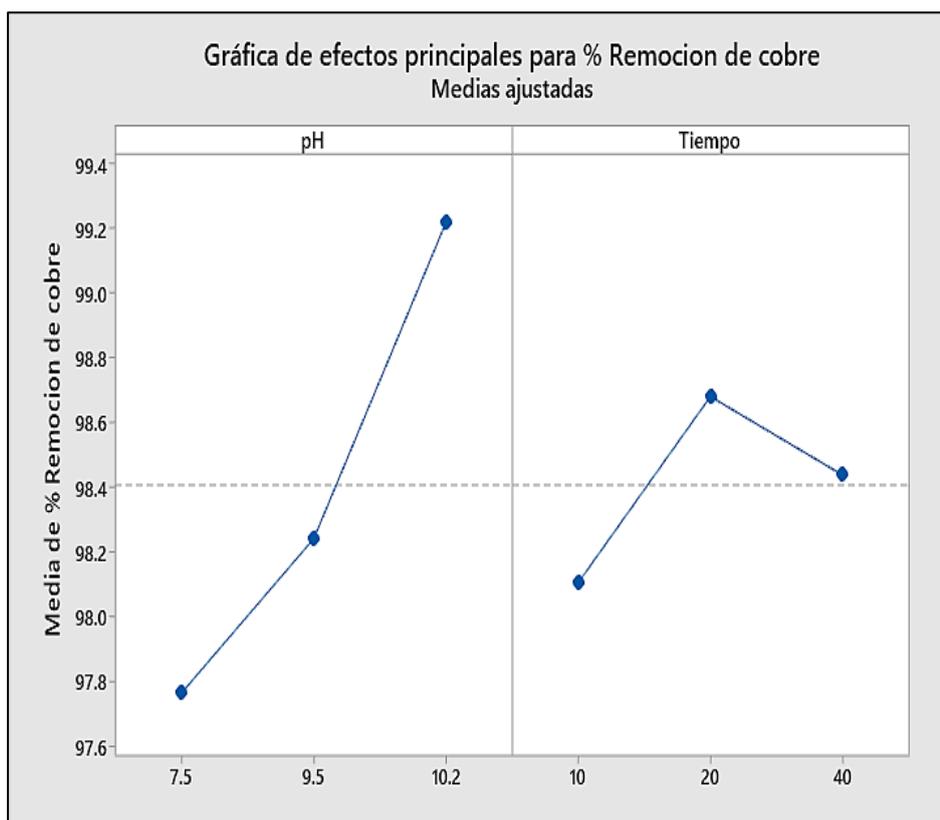
Según los resultados obtenidos se realizó el análisis estadístico para determinar las variables de mayor influencia sobre la remoción de Cu según se detalla a continuación.

Tabla 23. *Tabla de diseño experimental del % de remoción de cobre*

Corrida	A	B	pH	Tiempo (min)	% Remoción de Cu
1	1	1	7,5	10	97,36
2	1	2	7,5	20	98,24
3	1	3	7,5	40	97,8
4	2	1	9,5	10	98,03
5	2	2	9,5	20	98,46
6	2	3	9,5	40	98,03
7	3	1	10,20	10	98,9
8	3	2	10,20	20	99,12
9	3	3	10,20	40	99,34
10	1	1	7,5	10	97,16
11	1	2	7,5	20	98,34
12	1	3	7,5	40	97,68
13	2	1	9,5	10	98,23
14	2	2	9,5	20	98,56
15	2	3	9,5	40	98,13
16	3	1	10,20	10	98,95
17	3	2	10,20	20	99,35
18	3	3	10,20	40	99,64

Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Figura 24. Gráficas de efectos principales para el % de remoción Cu

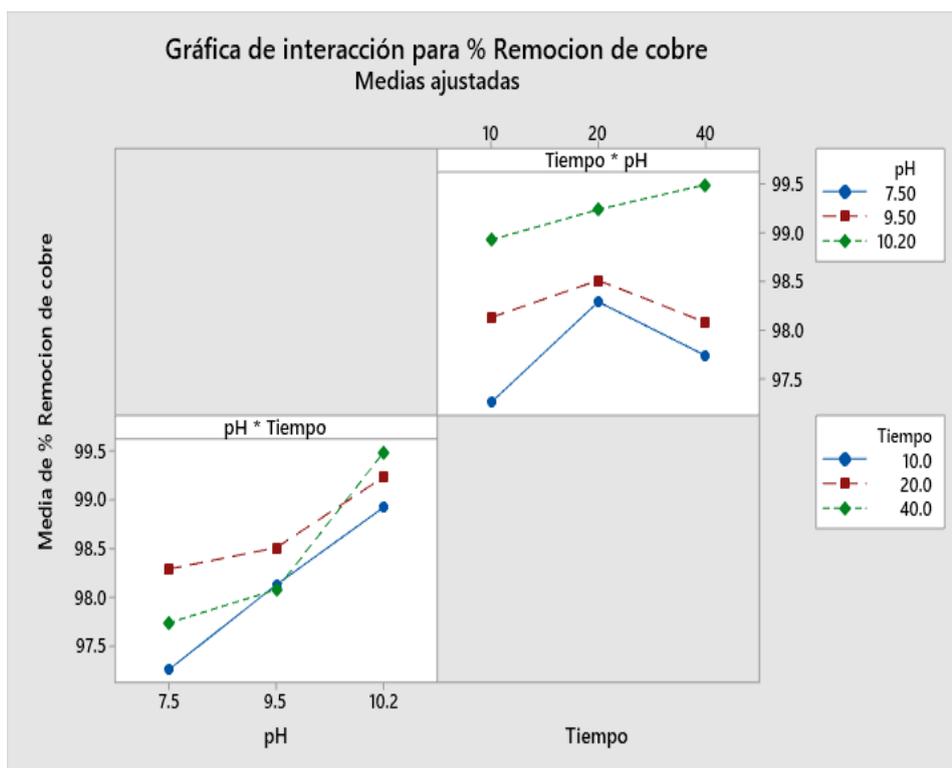


Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Podemos observar en la gráfica de efectos principales en la parte izquierda presentamos al factor A (pH), en los tres niveles (7,5; 9,5 y 10,20) podemos identificar que presenta porcentajes de 97,76, 98,24 y 99,22 remoción de cobre respectivamente

Por otra parte, en la gráfica de la derecha se presentamos al factor B el tiempo el cual puede mostrarse que el minuto 20 presenta una mayor remoción de cobre con un valor de 98,7 % de ahí se presenta una redisolución en el minuto 40 el cual baja levemente el porcentaje a 98,4%, el minuto 10 se presenta 98,10% el más bajo de los tres niveles del factor B.

Figura 25. Gráfica de interacción para el % remoción de cobre.

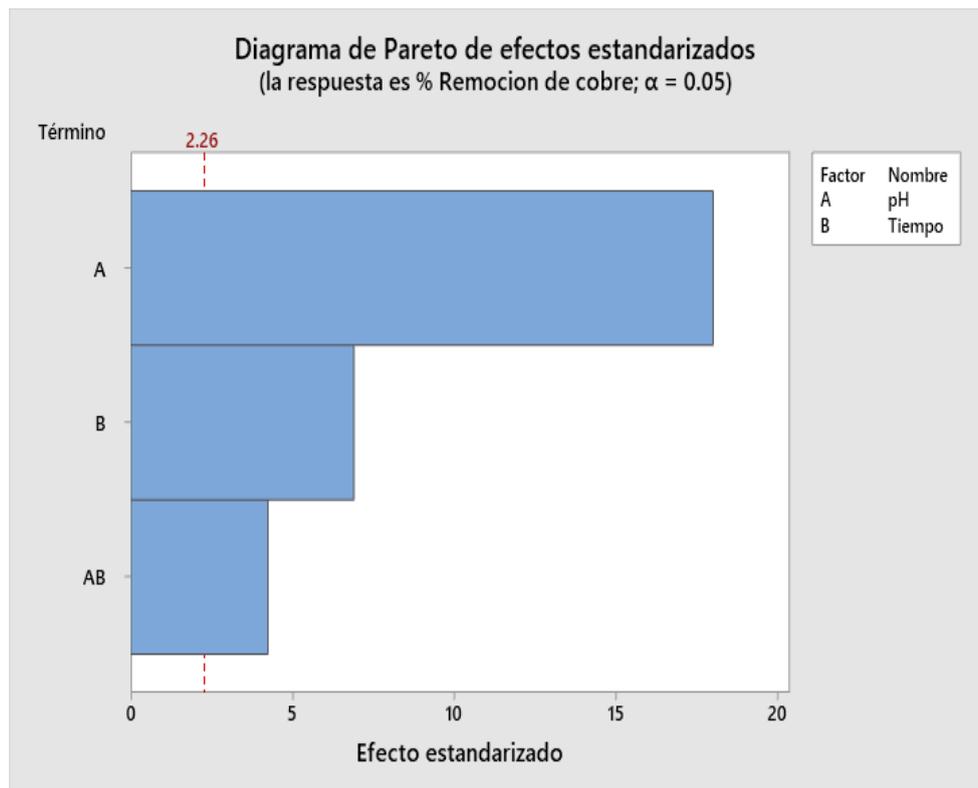


Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

De la gráfica de interacción podemos observar que en la interacción de pH y tiempo (factor A y factor B), se presenta una remoción de 97,26 en un pH 7,5 y la mayor remoción en interacción pH – Tiempo es con valores de 10,20 pH y 40 min para un % de remoción de cobre del 99,49.

En la parte derecha apreciamos la interacción tiempo – pH (factor B y factor A), que la interacción más apreciada son del minuto 20 y 40 en pH 10,20 para el % de remoción de cobre 99,24 y 99,49 respectivamente.

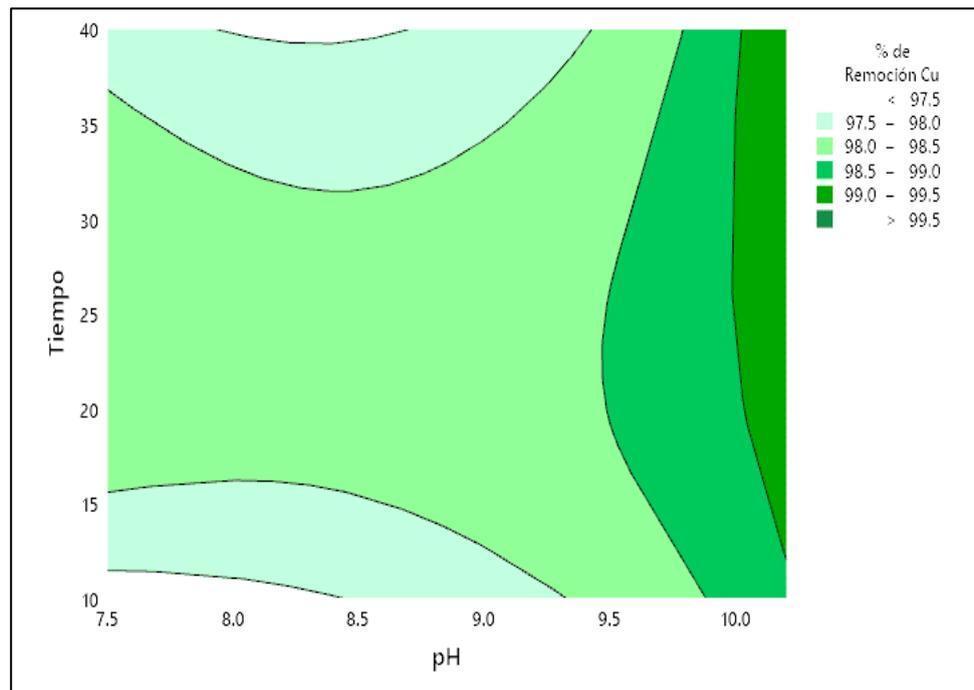
Figura 26. Diagrama de Pareto % remoción de Cu total



Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Según la figura número 26, podemos observar que la variable que presenta un mayor efecto en el % de remoción de Cu es el pH factor A, el cual es mayor que 2,26, como segundo efecto presenta el factor B el cual es el tiempo y por último la interacción del factor A y factor B.

Figura 27. Grafica de contorno de % remoción Cu - tiempo vs pH



Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Podemos observar una gráfica de contorno del % de remoción de cobre en función del pH y tiempo, concluimos que el porcentaje de 99,0 – 99,5 % de remoción de cobre inicia en pH de 10,20 en intersección con un tiempo desde 15 minutos el cual abarca una mayor área en la gráfica desde el incremento de 15 minutos hasta 40 minutos, en cuanto el pH se muestra una pequeña desviación a la izquierda el cual es un mínimo de 9,98 pH en 25 minutos, del cual podemos inferir que un tiempo óptimo sería de 20 min y pH 10,20 obteniendo una remoción de 99 – 99,5 % de cobre.

4.2.5. Análisis estadístico de hierro

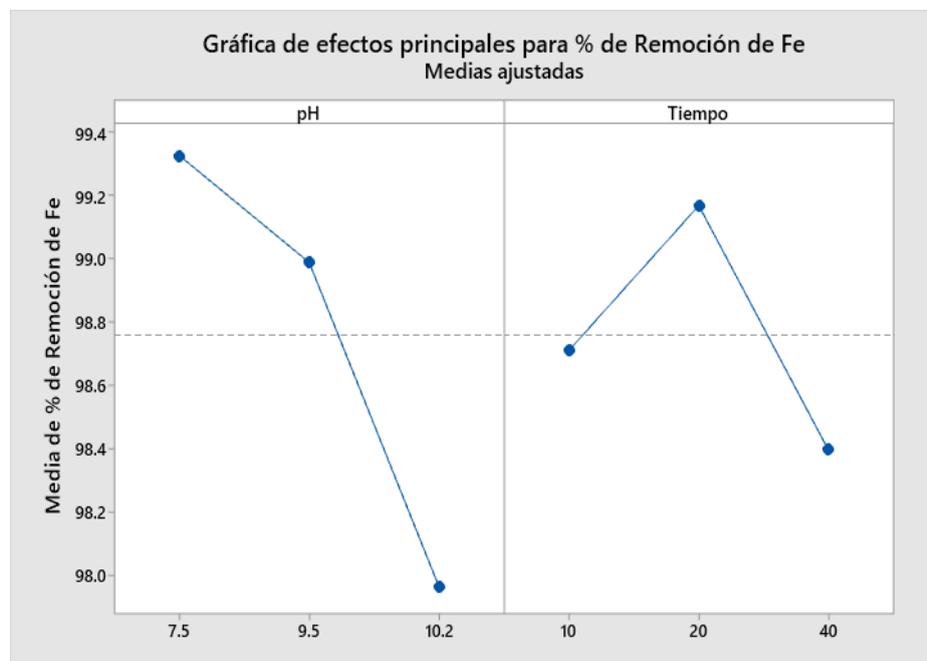
Según los resultados obtenidos se realizó el análisis estadístico para determinar las variables de mayor influencia sobre la remoción de “Fe” según se detalla a continuación.

Tabla 24. Tabla de diseño experimental del % de remoción de hierro

Corrida	A	B	pH	Tiempo (min)	% Remoción de Fe
1	1	1	7,5	10	99,25
2	1	2	7,5	20	99,24
3	1	3	7,5	40	99,25
4	2	1	9,5	10	99,25
5	2	2	9,5	20	99,62
6	2	3	9,5	40	98,13
7	3	1	10,20	10	97,75
8	3	2	10,20	20	98,48
9	3	3	10,20	40	97,75
10	1	1	7,5	10	99,52
11	1	2	7,5	20	99,36
12	1	3	7,5	40	99,34
13	2	1	9,5	10	99,15
14	2	2	9,5	20	99,73
15	2	3	9,5	40	98,05
16	3	1	10,20	10	97,35
17	03	2	10,20	20	98,58
18	3	3	10,20	40	97,86

Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Figura 28. Gráficas de efectos principales para él % de remoción Fe.

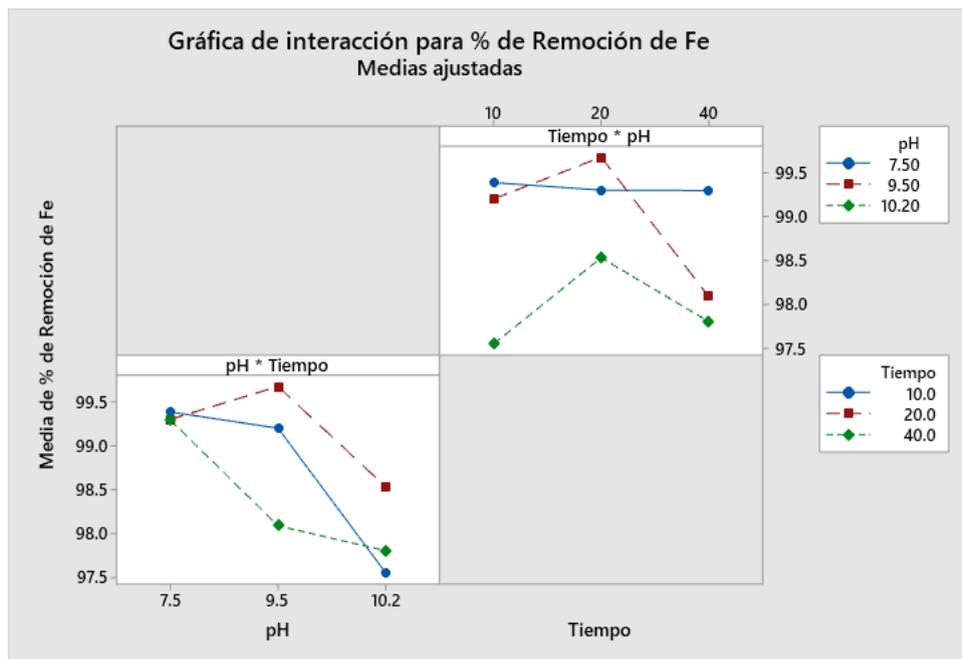


Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Podemos observar en la gráfica de efectos principales en la parte izquierda presentamos al factor A (pH), en los tres niveles (7,5, 9,5 y 10,20) podemos identificar que presenta porcentajes de 99,33, 98,99 y 97,96 remoción de hierro respectivamente

Por otra parte, en la gráfica de la derecha se presentamos al factor B el tiempo el cual puede mostrarse que el minuto 20 presenta una mayor remoción de hierro con un valor de 99,17 % de ahí se presenta una redisolución en el minuto 40 el cual baja el porcentaje a 98,39%, el minuto 10 presenta 98,71%, siendo el % de remoción más bajo de los tres el minuto 40 entre los niveles del factor B.

Figura 29. *Gráfica de interacción para el % remoción de hierro*

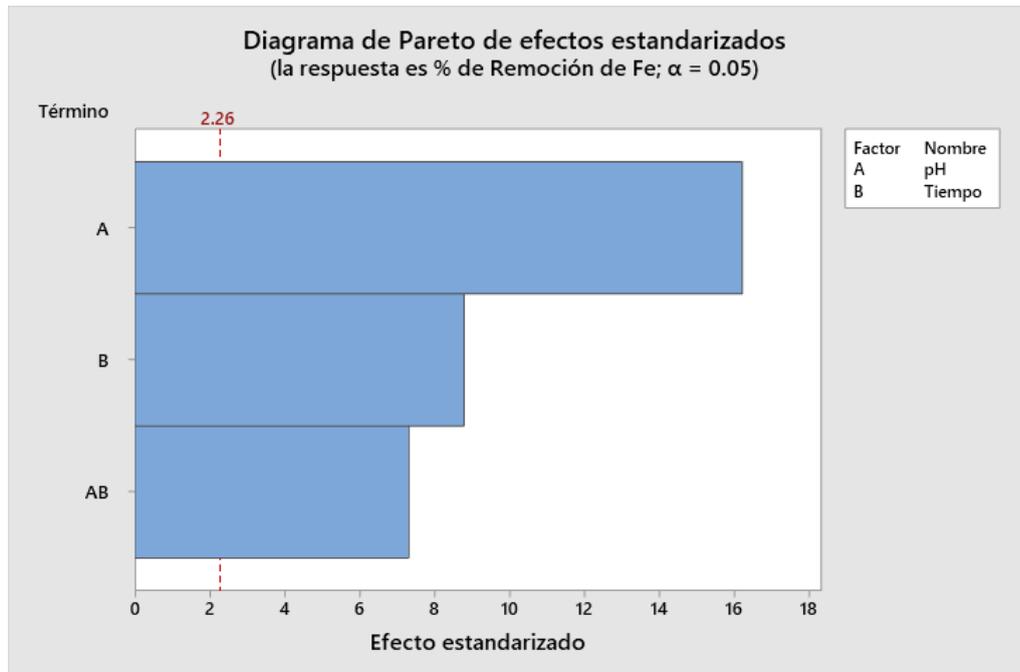


Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

De la gráfica de interacción podemos observar que en la interacción de pH y tiempo (factor A y factor B), se presenta una remoción de 99,67 en un pH 9,5 con 20 minutos y la interacción pH -Tiempo con el menor porcentaje es con valores de 10,20 pH y 10 min para un % de remoción de cobre del 97,5.

En la parte derecha apreciamos la interacción tiempo – pH (factor B y factor A), que la interacción más apreciada son del minuto 20 y 10 en pH 9,5 y 7,5 para el % de remoción de cobre 99,67 y 99,38 respectivamente.

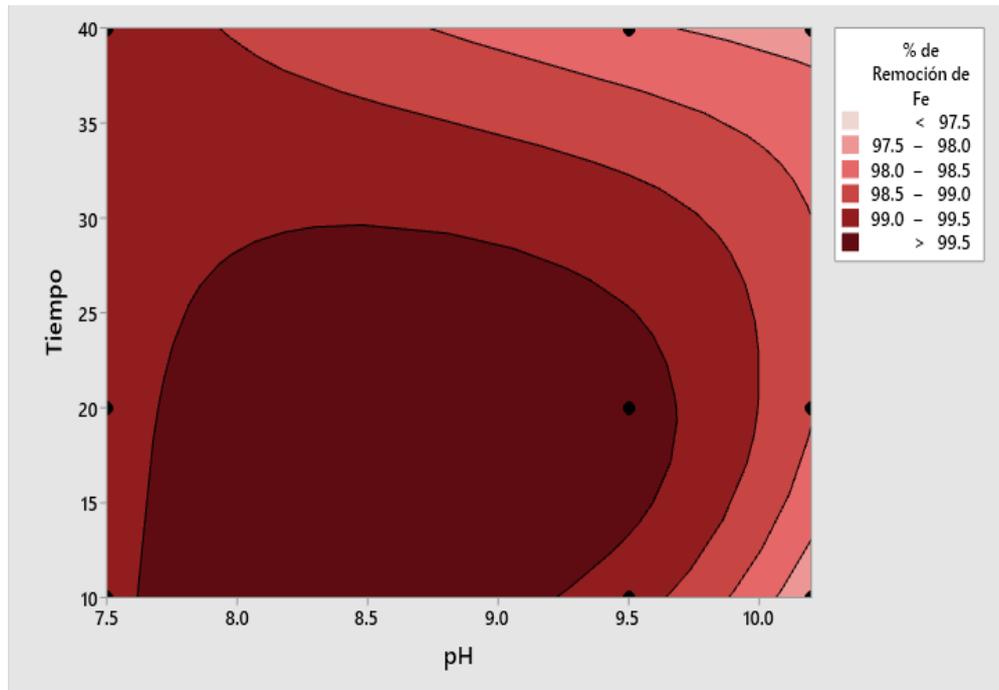
Figura 30. Diagrama de Pareto % remoción Fe total



Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Según la gráfica N° 30 podemos observar que la variable que presenta un mayor efecto en el % de remoción de Cu es el pH factor A, el cual es mayor que 2,26, como segundo efecto presenta el factor B el cual es el tiempo y por último la interacción del factor A y factor B.

Figura 31. Grafica de contorno de % remoción hierro - tiempo vs pH



Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Podemos observar una gráfica de contorno del % de remoción de hierro en función del pH y tiempo, concluimos que el porcentaje de 99,0 – 99,5 % de remoción de hierro inicia en pH de 7,5 en intersección con un tiempo desde 10,18 minutos el cual abarca una mayor área en la gráfica hasta un pH 9,6 y tiempo de 19,78 minutos, concierne al tiempo inicia desde el minuto 10 a 19,78, sin embargo se presenta una interacción puntal el cual sus coordenadas son de 10,19 y 19,85, pH – Tiempo respectivamente obteniendo una remoción mayor del 99,5 % de Fe.

4.2.6. Análisis estadístico de zinc

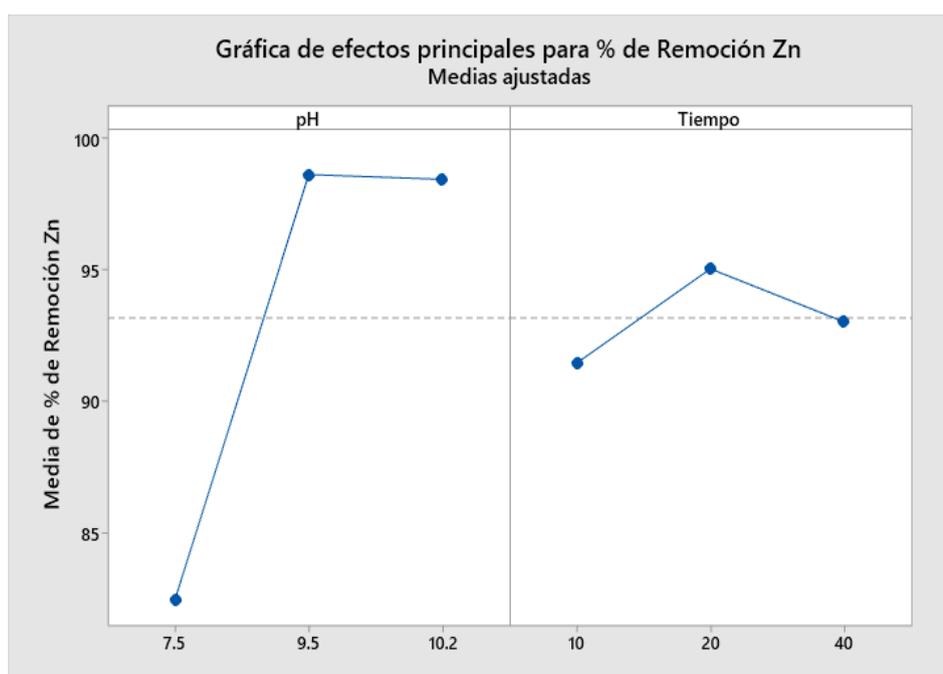
Según los resultados obtenidos se realizó el análisis estadístico para determinar las variables de mayor influencia sobre la remoción de Zn, según se detalla a continuación.

Tabla 25. Tabla de diseño experimental del % de remoción de zinc

Corrida	A	B	pH	Tiempo (min)	% Remoción de Zn
1	1	1	7,5	10	77,70
2	1	2	7,5	20	88,40
3	1	3	7,5	40	82,50
4	2	1	9,5	10	98,80
5	2	2	9,5	20	99,00
6	2	3	9,5	40	98,60
7	3	1	10,20	10	98,50
8	3	2	10,20	20	98,20
9	3	3	10,20	40	98,80
10	1	1	7,5	10	76,60
11	1	2	7,5	20	88,00
12	1	3	7,5	40	81,20
13	2	1	9,5	10	98,20
14	2	2	9,5	20	98,70
15	2	3	9,5	40	98,40
16	3	1	10,20	10	98,60
17	3	2	10,20	20	97,90
18	3	3	10,20	40	98,60

Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Figura 32. Gráficas de efectos principales para % de remoción Zn

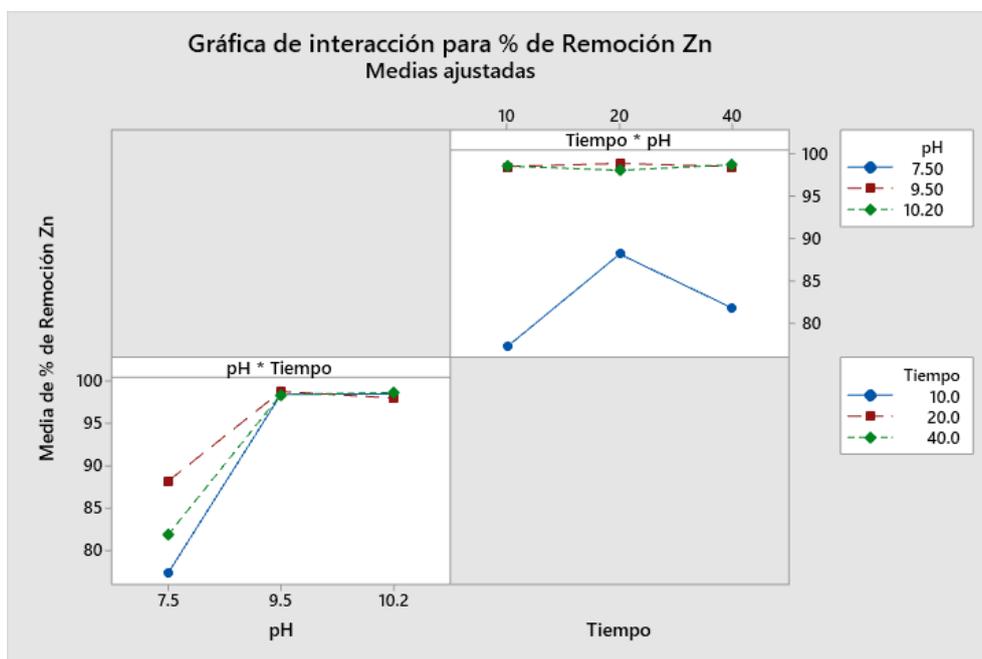


Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Podemos observar en la gráfica de efectos principales en la parte izquierda presentamos al factor A (pH), en los tres niveles (7,5, 9,5 y 10,20) podemos identificar que presenta porcentajes de 82,45, 98,61 y 98,43 remoción de zinc respectivamente.

Por otra parte, en la gráfica de la derecha se presentamos al factor B el tiempo el cual puede mostrarse que el minuto 20 presenta una mayor remoción de cobre con un valor de 95,03 % de ahí se presenta una redisolución en el minuto 40 el cual baja levemente el porcentaje a 93,01 %, el minuto 10 se presenta 91,45 % el más bajo de los tres niveles del factor B.

Figura 33. *Gráfica de interacción para el % remoción de zinc*



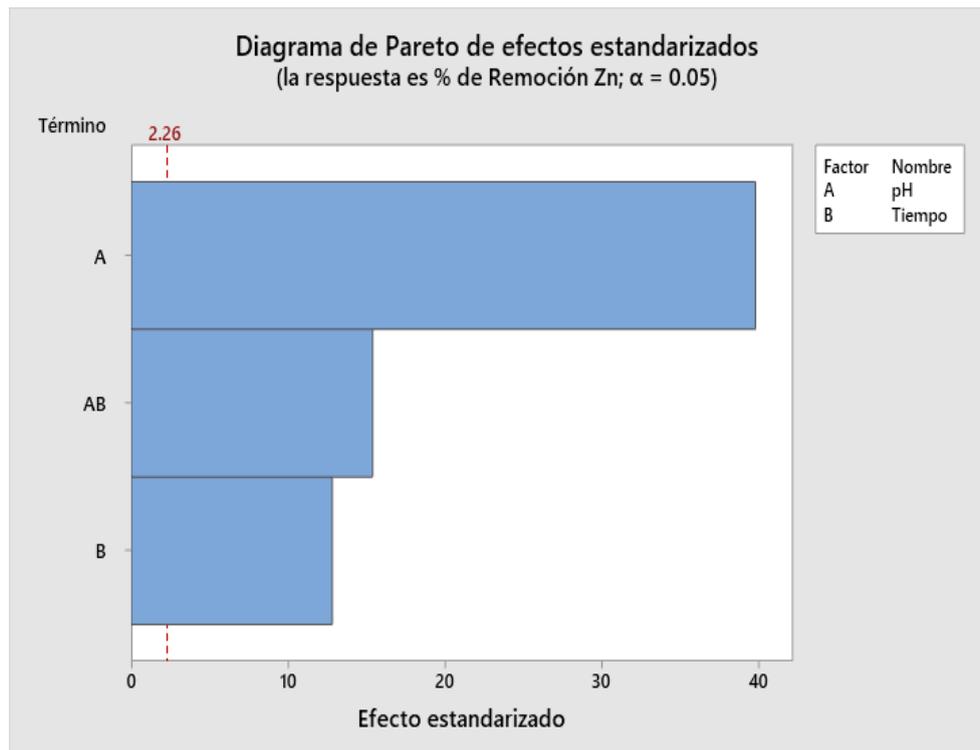
Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

De la gráfica de interacción podemos observar que en la interacción de pH y tiempo (factor A y factor B), se presenta una remoción de 98,05 en un pH 10,2

con 20 minutos y la interacción pH -Tiempo con el menor porcentaje es con valores de 7,5 pH y 10 min para un % de remoción de cobre del 77,3.

En la parte derecha apreciamos la interacción tiempo – pH (factor B y factor A), que la interacción más apreciada son del minuto 20 en pH 9,5 y 10,20 para él % de remoción de zinc 98,85 y 98,05 respectivamente.

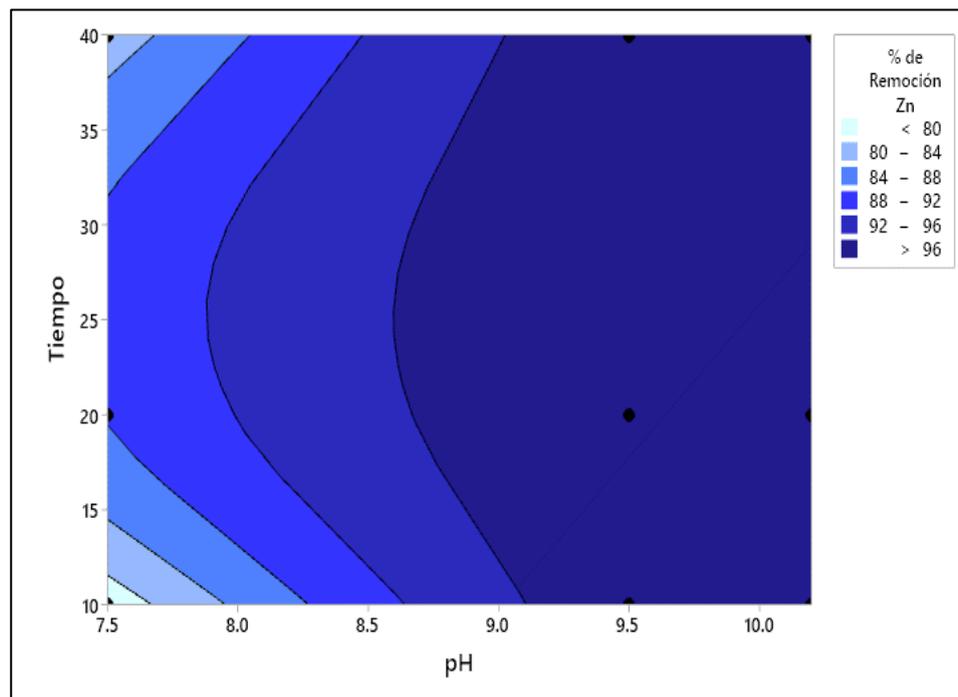
Figura 34. Diagrama de Pareto % remoción Zinc total



Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Según la figura número34, podemos observar que la variable que presenta un mayor efecto en él % de remoción de Zinc es el pH factor A, el cual es mayor que 2,26, como segundo efecto presenta el factor B el cual es el tiempo y por último la interacción del factor A y factor B.

Figura 35. Grafica de contorno, % de remoción de zinc - tiempo vs pH



Fuente: Minitab 2019, Elaboración propia

Podemos observar una gráfica de contorno del % de remoción de zinc en función del pH y tiempo, concluimos que el porcentaje de 92 – 96 % de remoción de zinc inicia en pH de 8,6 en intersección con un tiempo desde 25 minutos el cual abarca una mayor área en la gráfica hasta valores de pH y tiempo mayor, presenta una interacción puntal el cual sus coordenadas son de 10,18 y 20,06, pH – Tiempo respectivamente obteniendo una remoción más del 96 % de Fe.

4.3. Prueba de hipótesis

Existe suficiente evidencia estadística obtenida de las pruebas realizadas de acuerdo al diseño experimental podemos afirmar que el tiempo de acondicionamiento, el pH y la dosificación del floculante MT-6506 influye significativamente en el % remoción de metales presente en las aguas acidas de mina de la poza CW. De acuerdo a las pruebas realizadas los contenidos que sobresalieron por encima de los límites máximos permisibles de acuerdo al DS

N°010-2010 cobre(t), hierro(d) y zinc(t) con valores de 0,456 mg/L, 2,67 mg/L y 2,202 respectivamente y comparando con el contenido metálico final son de cobre (t) 0,007 mg/L, el hierro (d) tuvo 0,02 mg/L y zinc (t) 0,021.

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

H₀: Mediante el tratamiento de aguas acidas de mina **No se podrá** cumplir el DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.

H_a: Mediante el tratamiento de aguas acidas de mina **Se podrá** cumplir el DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima - 2023.

El valor de significancia (p-valor) igual a 0,000 el cual es menor a nuestro alfa (0,05), por lo cual rechazamos la hipótesis nula (H₀) y se acepta la hipótesis alterna afirmando, la evaluación estadística realizada se acepta la hipótesis alternativa y se niega la hipótesis nula debido que los factores A y B (pH y tiempo) respectivamente, así como el ratio de dosificación de lechada de cal, floculante y CO₂, logrando una remoción de metales como (Cu, Fe y Zn) en promedio mayor de 97%. Presentando un consumo de 0,142 kg/m³ de lechada de cal en un tiempo de contacto de 20 minutos utilizando el floculante MT-6506 y teniendo un consumo de un flujo de 0,48 L/min para llegar a un pH final de 7,34, cumpliendo con el D.S.N° 010-2010 MINAM.

4.4. Discusión de resultados

En lo que respecta al primer objetivo determinar el pH con el proceso de Neutralización en las aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima 2023, (Flores Enao & Herrera Salinas, 2022) en su tesis “Evaluación del efecto del hidróxido de calcio (cal apagada) en la estabilización del pH de aguas desembocadas del río Millojahuira en el embalse

Pasto Grande, Moquegua – 2022” trato una agua acida con pH 2,56 el cual logro estabilizan a pH 7,03 dosificando 0,5 g/L de lechada de cal, concluyendo que la lechada de cal presenta un efecto positivo en la neutralización del pH. En el presente estudio se trató aguas acidas de mina el cual presento un pH de 3,3 y se logró neutralizar a pH 10,20 para poder precipitar los contenidos metálicos sin embargo para poder cumplir con el DS N°010 – 2010 se agregó dióxido de carbono llevando el pH a 7,34 el cumple con los límites máximos permisibles el cual es de 6-9. Esto fue llevado a una dosificación de cal de 0,142 kg/m³ y de CO₂ 0,48 L/min.

En lo que respecta al segundo objetivo determinar las pruebas de oxidación de los metales del agua acida de para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera, Lima 2023, (Ayala Cercado, 2018) en su tesis “Influencia de la dosificación de cal en el tratamiento de las aguas ácidas de la quebrada Mesa de Plata Hualgayoc – 2018” tuvo como propósito determinar el impacto de diferentes dosis de cal en el tratamiento de las aguas ácidas de la quebrada Mesa de Plata. Se procedió a cumplir con los estándares de calidad ambiental, presenta altos niveles de hierro el cual es 6,639 mg/L el cual al ser tratada disminuye hasta 0,068 presentando una remoción de metal 99% del el cual termino con un pH promedio de 8,09 el cual inicio con un pH de 3,55. Logrando adecuarse a los parámetros del D.S N° 004-2017-MINAM, en el presente estudio se oxido y precipito los metales pesados que sobresalieron de los límites máximos permisible los cuales fueron el cobre(t), hierro (d) y zinc (t) con valores de 0,456 mg/L, 2,67 mg/L y 2,202 mg/L respectivamente al ser neutralizado, clarificado y acidificado disminuyo a concentraciones 0,007 mg/L, 0,02 mg/L y 0,021 mg/L de

cobre(t), hierro (d) y zinc (t) los porcentajes de remoción de estos metales pesados vendría a ser de 99,12%, 99,49% y 99,28% respectivamente.

(Panduro Macedo, 2019) en su tesis “Estudio del Tratamiento de Aguas Ácidas Provenientes de los Niveles (Socavones) de una Compañía Minera”, ubicado en el distrito de Tapay, provincia de Caylloma, región Arequipa. Se realizó el tratamiento de aguas ácidas de mina tratando con lechada de cal además utilizaron el floculante MAFLOC 900 (CQT900) el cual fue preparado al 0,45 ppm, el gasto fue de 0,285 g/L el nivel de pH de esta mina fue de 2,3 a pH 6 – 8. En este estudio se evaluó floculantes para la etapa de clarificación después de un proceso de alcalinización a pH 10,2 el de menor turbidez reflejados en NTU's es el floculante MT-6506, el cual se preparó al 0,01% y una dosificación de 1mg/L.

CONCLUSIONES

De las pruebas de tratamiento de aguas acidas de mina de la unidad minera Cori Puno S.A. teniendo como población la poza CW-07 el cual contiene 648 metros cúbicos, con presencia de metales totales y disueltos se concluye:

1. Que la dosificación de lechada de cal como coagulante y neutralizante influye positivamente en el tratamiento de las aguas ácidas mina, logrando alcanzar niveles de pH, para la precipitación de los metales pesados presente en las aguas acidas de mina de la empresa minera Cori Puno S.A.
2. La cantidad de cal utilizado fue calculada en 0,142 kg/m³, con esta dosificación se llegó a un pH de 10,20 para llegar a las curvas de solubilidad para la precipitación de los metales presentes, el tiempo de neutralización con cal fue de 20 minutos en agitación a 150 RPM para la precipitación de los metales Cu, Fe y Zn, después de la precipitación de estos metales se procedió con la regulación del pH con CO₂ con un flujo de 0,48 L/min de CO₂, obteniendo un pH final de 7,34.
3. Los metales que sobrepasaron los límites máximos permisibles en su concentración inicial de las aguas acidas de mina fueron inicialmente el Cu 0,456 mg/L, Fe de 2,67 mg/L y Zn 2,202 mg/L y luego de su tratamiento los valores fueron de Cu 0,007 mg/L, Fe 0.02 mg/L y Zn 0.021 mg/L, al tener los valores de la concentración inicial y final procedimos a calcular el porcentaje de remoción fueron de Cu: 99,12%, Fe: 98,48% y Zn: 98,28%.
4. Finalmente, el tipo de floculante seleccionado fue el MT-6505 el cual se preparó al 0,01% y una dosificación de 1mg/L, al momento de ser añadido se regula la velocidad a 70 RPM durante 05 minutos, luego se detiene los agitadores del Jar Test para dejar reposar durante 120 minutos.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere realizar pruebas a nivel piloto para escalar los parámetros obtenidos en laboratorio en un mayor volumen de solución, lo cual permitirá comprobar los datos o si existe un sesgo debido al volumen trabajo a nivel laboratorio.
2. El efecto de la lechada de cal presenta un efecto muy favorable en el tratamiento de aguas acidas de mina por lo cual se recomienda el uso de lechada de cal para tratar aguas ácidas de mina, debido a su capacidad para aportar iones hidróxidos (OH)-, lo que ayuda a reducir la acidez y aumentar la alcalinidad del agua ácida de mina. Además, su capacidad como coagulante facilita una mejor formación de flóculos durante la etapa de clarificación al añadir el floculante seleccionado.
3. Basándose en las pruebas de neutralización para precipitar metales pesados, se recomienda realizar una caracterización físico-química de la solución a tratar. Este análisis les permitirá identificar los contenidos necesarios para tener presente los niveles de pH de tratamiento de la solución acida, el cual está directamente relacionado con los elementos metálicos que presenten, para poder guiarse revisar las curvas de solubilidad de los metales.
4. Se recomienda evaluar cada floculante disponible con el fin de determinar cuál es el más adecuado para el tratamiento de aguas ácidas de mina. Esto se debe a las características y propiedades únicas de cada reactivo, lo que permitirá mejorar el rendimiento en la formación de flóculos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- Arias, F. G. (2012). El Proyecto de Investigación Introducción a la metodología científica. Caracas - República 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.
- Calderón de Alvarado, J. M., & Tuiro Salvador, M. C. (2021). Precipitación de hierro y manganeso secuencial de efluentes. Lima, Perú: Institución de investigación de la facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas.
- Chaparro Leal, L. T. (2014). Drenajes ácidos de mina formación y manejo. ESAICA, 53.
- 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 Millojahuira 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.
- N.Kerlinger , F. (1975). Investigación del comportamiento: técnicas y metodología. Mexico: Nueva Editorial Interamericana.

Panduro Macedo, D. O. (2019). Estudio del tratamiento de aguas acidas proveniente de los niveles (socavones) de una compañía minera. Arequipa - Perú: Repositorio de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Peñuelas, M. A. (2010). MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN. Mexico: D.R. Universidad Autónoma de Sinalga.

Peruano, E. (2010). Decreto Supremo N° 010-2010 MINAM. El Peruano.

Tamayo y Tamayo, M. (2000). El proceso de la investigación científica. Mexico: Limusa.

ANEXOS

Instrumentos de recolección de datos

Tabla 26. Instrumentos de recolección de datos

Tipo	Nombre	Descripción
Materiales de vidrio	Vaso Precipitado	Los vasos precipitados fueron instrumentos de recolección de datos, debido que permitieron medir la solución de agua acida para ponerlo en el equipo Jar – Test
	Probetas	La probeta permitió recolectar la información de la medición y agregación de los reactivos como el floculante
Balanzas	Balanza analítica	Instrumento imprescindible en el pesaje de reactivos, cal, floculante, lodos precipitados y en la preparación de reactivos por % en peso
Equipos	Jar Test	Equipo que permite la realización de las pruebas en jarras, se regula los RPM de los agitadores del equipo.
	Plancha de Calentamiento	Las planchas de calentamiento permitieron secar los lodos precipitados de las aguas tratadas,
	Peachimetro	Equipo para la medición del pH de cada solución y muestra a tratar, permite la toma de medida en la variación del valor al agregar lechada de cal
	Potenciómetro	Permite medir el potencial el cual será importante para ubicar la región en los diagramas de Pourbaix, junto con el valor del pH.
	Turbidímetro	Equipo para la medición de la turbidez a través de los NTU's, el cual se empleó en la etapa de clarificación.
	Agitador mecánico	Equipo para la homogenización de la muestra inicial, así como cuando la toma de muestra para un análisis exploratorio o de diseño experimental
Envase	Botellas de plástica	Fueron la recepción de muestras tanto de muestra inicial o muestras tratadas, acidificadas.
Cuaderno	Cuaderno de campo	Instrumento para la anotación de datos experimentales de cada uno de las pruebas, tiempo, dosificación, cálculos, densidad, etc.
Cronometro	Cronometro	Instrumento de medición, permite controlar el tiempo de cada prueba, así como de cada etapa de la prueba experimental.

Fuente: Autoría propia

Tabla 27. Matriz de consistencia

TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS DE MINA PARA EL CUMPLIMIENTO DEL DS N° 010-2010 MINAM DE UNA EMPRESA MINERA, LIMA - 2023.				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGIA
¿Se podrá realizar de tratamiento de Aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023?	Tratar las Aguas acidas de mina para para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023.	Mediante el tratamiento de aguas acidas de mina se podrá cumplir el DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023.	VARIABLE INDEPENDIENTE	Enfoque investigación cuantitativa. Tipo de investigación aplicada - tecnológica. Nivel explicativo. Población: Agua acida de mina de la poza CW-07 Muestra: 1 m3 de agua acida de mina de la población proporcionada por la empresa minera Cori Puno S.A.
			Tratamiento de Aguas acidas de Mina INDICADORES pH Dosificación Lechada de Cal Dosificación de Floculante MT-6506	
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICA	VARIABLE DEPENDIENTE	
¿Se podrá determinar el pH de las aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023?	Determinar el pH con el proceso de Neutralización en las aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023.	Realizando el proceso de neutralización con lechada de cal en aguas acidas de mina se determinará el pH para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023.		
¿Cómo oxidar los metales presentes en aguas acidas de para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023?	Determinar las pruebas de oxidación de los metales del agua acida de para el cumplimiento del DS N° 010-2010 de una empresa minera Lima, 2023.	Realizando el proceso de oxidación se precipitará los metales presentes en las aguas acida de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023.	Cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM	
¿Cuál es el proceso para tratar la turbidez de las aguas acidas de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023?	Realizar la etapa de clarificación de las aguas acidas de mina para para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023.	Mediante la etapa de clarificación se tratará la turbidez en agua acida de mina para el cumplimiento del DS N° 010-2010 MINAM de una empresa minera Lima, 2023.	INDICADORES % Remoción de metales (ppm)	

Fuente: Autoría propia

Figura 36. Turbidímetro



Fuente: Autoría propia

Figura 37. *Equipo desionizador*



Fuente: Autoría propia

Figura 38. *Peachimetro*



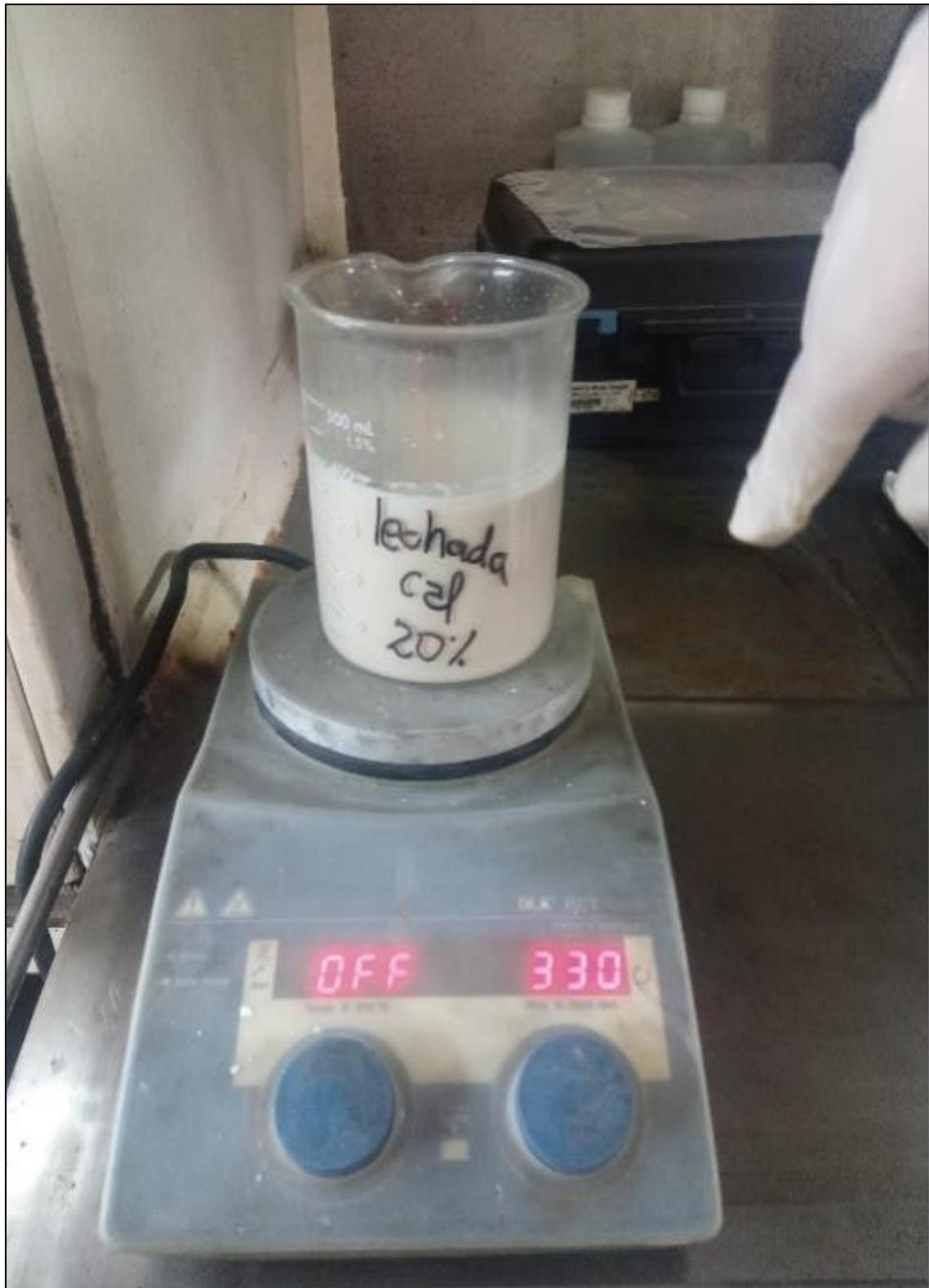
Fuente Autoría propia

Figura 39. Preparación de gflerculante MT 6506



Fuente Autoría propia

Figura 40. Preparación de lechada de cal al 20%



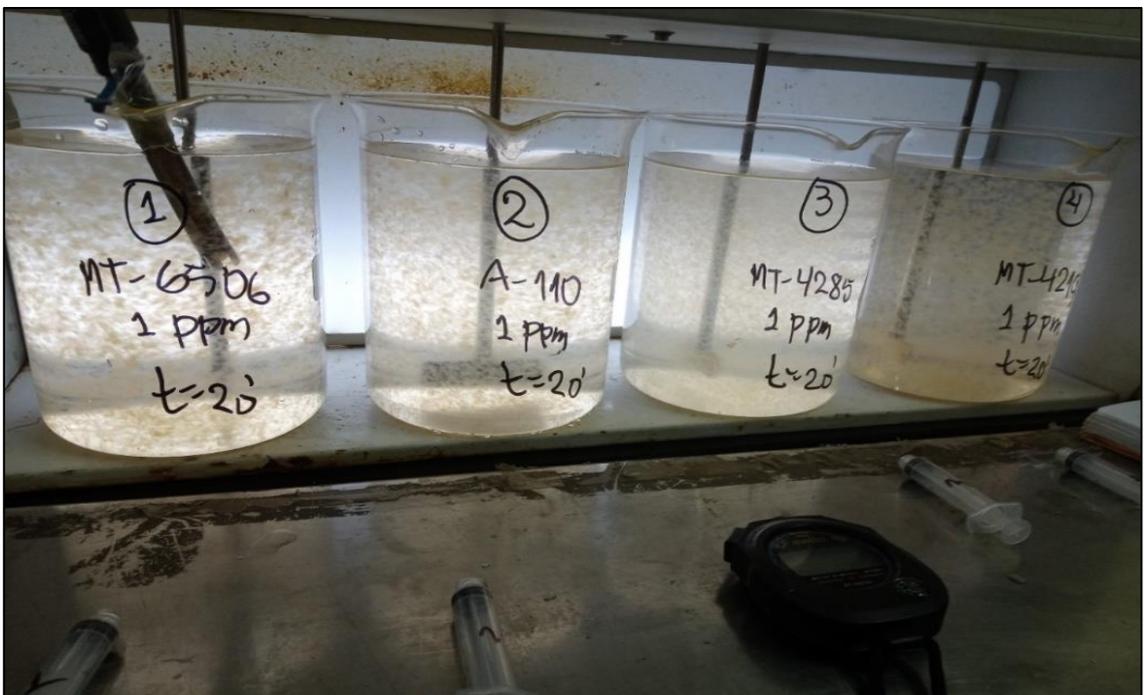
Fuente Autoría propia

Figura 41. Pruebas de exploratorias de neutralización



Fuente Autoría propia

Figura 42. Pruebas de selección de floculante



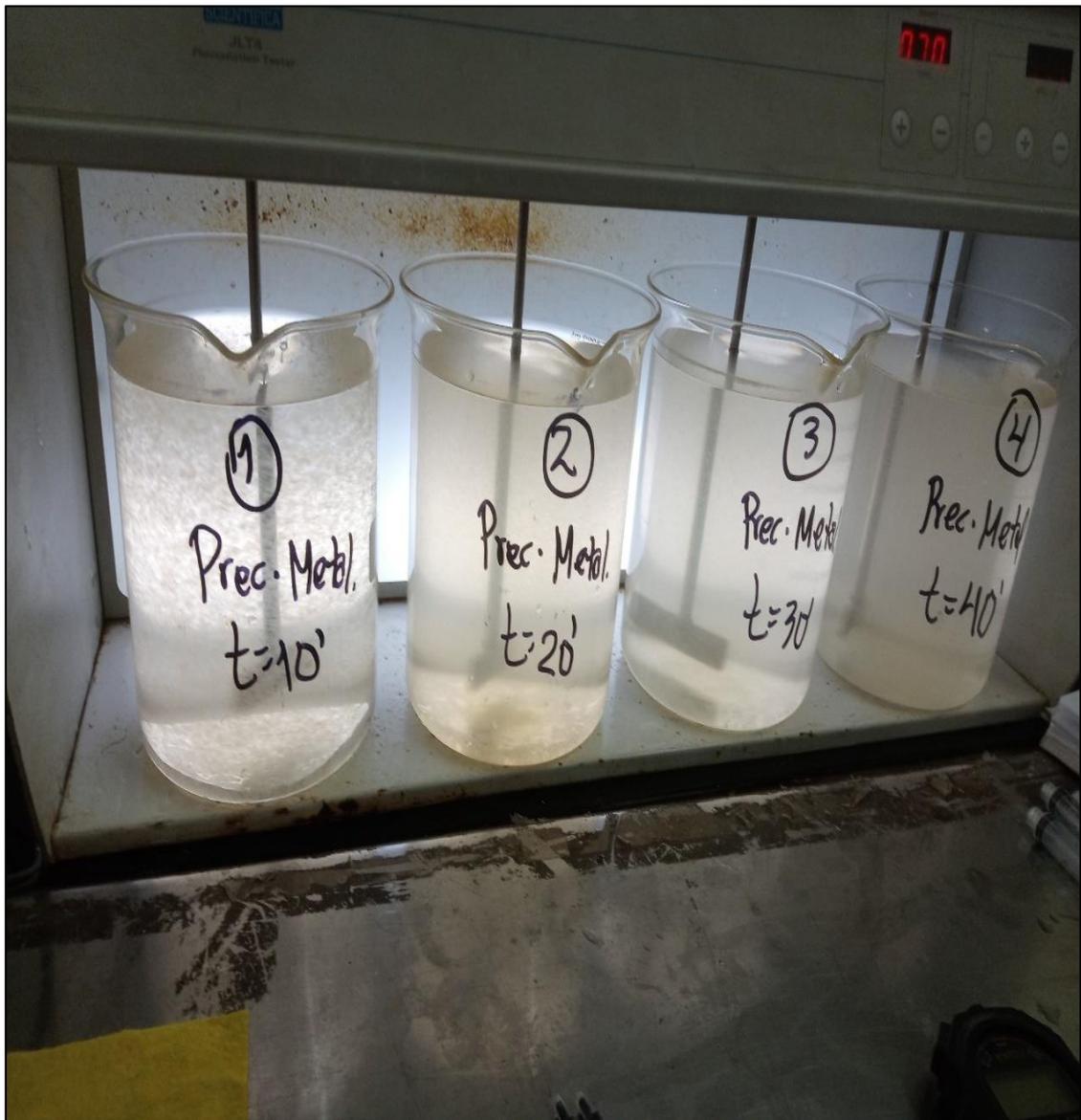
Fuente: Autoría propia

Figura 43. Pruebas de clarificación



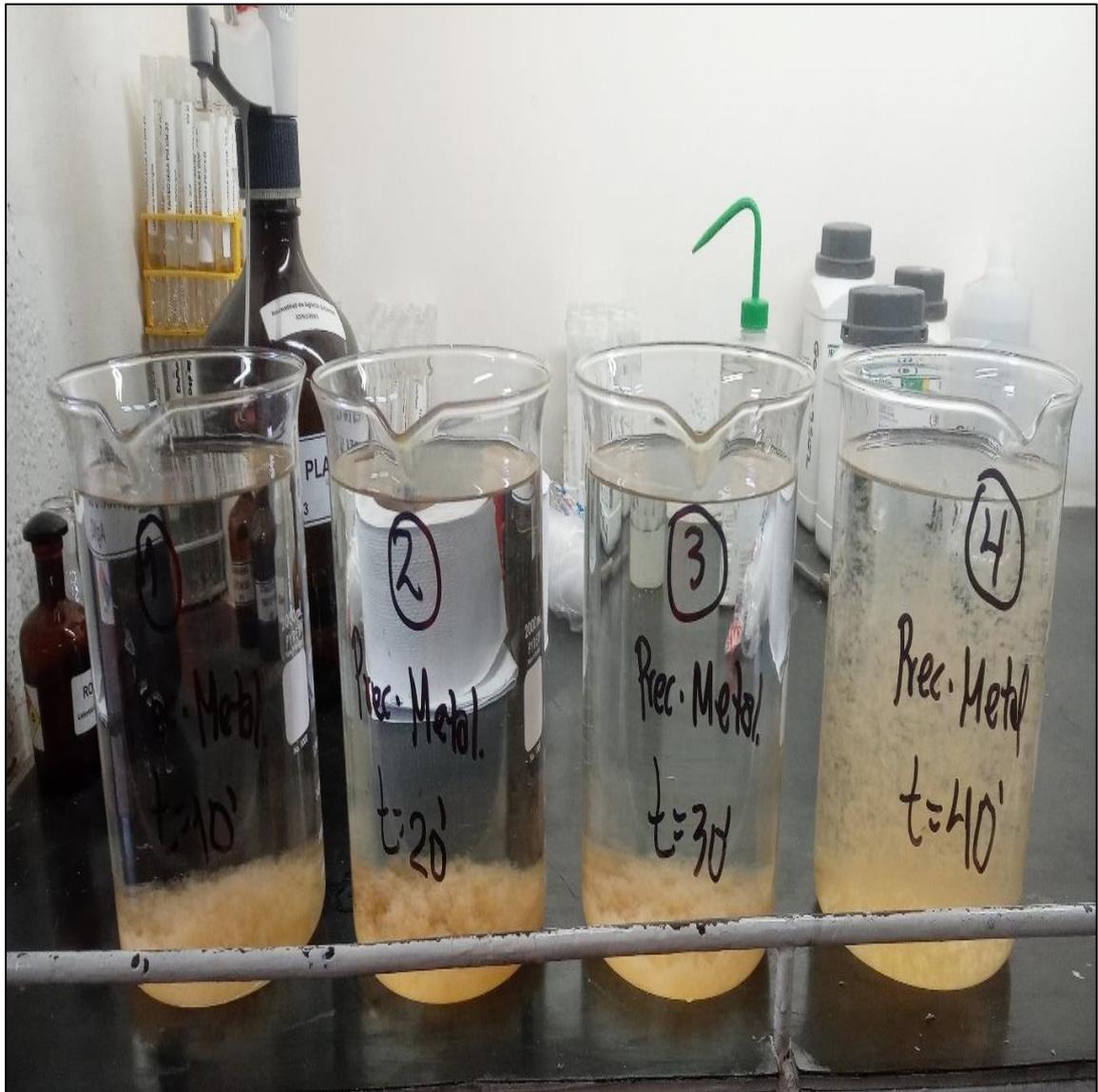
Fuente: Autoría propia

Figura 44. Pruebas de neutralización según el diseño experimental



Fuente: Autoría propia

Figura 45. Cinética de sedimentación



Fuente: Autoría propia

Figura 46. Lectura de NTU's



Fuente: Autoría propia

Figura 47. Pruebas de acidificación



Fuente: Autoría propia

Figura 48. Ficha técnica de cal viva



FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO

NOMBRE COMERCIAL:

FÓRMULA QUÍMICA:

NOMBRE QUÍMICO:

Cal Viva

CaO

Oxido de Calcio

● CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

- CaO Disponible / Útil mínimo	> 85 %	ASTM C-25
- CaO Total	> 92 %	ASTM C-25
- MgO	< 0.5 %	ASTM C-25
- PPC	< 4 %	LECO CS744
- SiO2	< 2 %	XRF
- Fe2O3	< 0.5 %	XRF
- Azufre (S)	< 1 %	LECO CS744
- Flúor (F)	< 150 Ppm	

● CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

- Reactividad (ΔT° 30 seg) Mínimo 15 °C ASTM C-110
- Granulometría típica para distribución

Nota: Puede adecuarse de acuerdo a especificación del cliente.

GRUESO		GRANULADO		PULVERIZADO	
MALLAS	RETENIDO	MALLAS	RETENIDO	MALLAS	RETENIDO
> 3"	< 10 %	> ½"	0 %	#100	< 10 %
3" – 1"	50 – 60 %	½" - #100	50 – 60 %	> #200	< 45 %
< 1"	30 – 40 %	< #100	40 – 50 %	< #200	> 45 %

Nota: Los valores aquí reportados son valores típicos de nuestros productos, los cuales pueden variar.

● PRESENTACIÓN

- Big Bag 1 Tm
- Bolsa 40 Kg
- Granel Bombona

CEMM INDUSTRIAL SAC

Plaza Francia No. 220 Of. 307 Cercado de Lima Telef. 403-4704 Cel. 999 988 688 ssoma@cecm.pe

Fuente: CEMM Industrial