



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica
Unidad de Posgrado

**Optimización del sistema de tratamiento de efluentes
ácidos de una compañía minera para cumplir los
límites máximos permisibles, Huancavelica, 2021**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Gestión Integrada
en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente

AUTOR

Marlit Nemesis MARQUEZ CERRON

ASESOR

Dr. Ernesto Osvaldo ADUVIRE PATACA

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Marquez, M. (2025). *Optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos de una compañía minera para cumplir los límites máximos permisibles, Huancavelica, 2021*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Marlit Nemesis Marquez Cerron
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	45407147
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0009-2094-5718
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Ernesto Osvaldo Aduvire Pataca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	00505273
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0214-0125
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Giuliana Patricia Becerra Celis
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40745335
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Mariano Pacheco Ortíz
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06284228
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Silvia del Pilar Iglesias León
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06018064
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.4.1. Desarrollo de modelos, simulación y optimización de procesos
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.058333333333 Longitud: -77.083333333333
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2020 – 2022
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería ambiental y geológica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02



Acta de Sustentación de Tesis

Sustentación Pública

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los diecisiete días del mes de julio del año 2025, siendo las once horas, se reúnen los suscritos **Miembros del Jurado Examinador de Tesis**, nombrado mediante Dictamen N° 000181-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 14 de julio de 2025, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

Título

«OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES ÁCIDOS DE UNA COMPAÑÍA MINERA PARA CUMPLIR LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES, HUANCAMELICA, 2021»

Que, presenta la Bach. **MARLIT NEMESIS MARQUEZ CERRON**, para optar el grado académico de **MAGISTER** en **GESTIÓN INTEGRADA EN SEGURIDAD, SALUD OCUPACIONAL Y MEDIO AMBIENTE**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente digital N° UNMSM-20220106216, de fecha 29 de diciembre del 2022, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente en conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

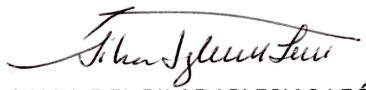
Bueno (16)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el grado académico de **MAGISTER** en **GESTIÓN INTEGRADA EN SEGURIDAD, SALUD OCUPACIONAL Y MEDIO AMBIENTE** a la Bach. **MARLIT NEMESIS MARQUEZ CERRON**.

Siendo las 12:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DRA. GIULIANA PATRICIA BECERRA CELIS
Presidente


MG. MARIANO PACHECO ORTÍZ
Secretario


DRA. SILVIA DEL PILAR IGLESIAS LEÓN
Miembro


DR. ERNESTO OSVALDO ADUVIRE PATACA
Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo DR. ERNESTO OSVALDO ADUVIRE PATACA en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N° 000605-2023-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES ÁCIDOS DE UNA COMPAÑÍA MINERA PARA CUMPLIR LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES, HUANCAMELICA, 2021**», presentado por la BACHILLER MARLIT NEMESIS MARQUEZ CERRON para optar el Grado Académico MAGISTER EN GESTIÓN INTEGRADA EN SEGURIDAD, SALUD OCUPACIONAL Y MEDIO AMBIENTE, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **13%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Lima, 05 de Marzo de 2025

Firma del Asesor:

Nombres y apellidos del asesor:

DR. ERNESTO OSVALDO ADUVIRE PATACA

DNI:

00505273

DEDICATORIA

A mis padres por su paciencia y guía para lograr mi meta.

A mi hijo Adriel por ser mi motor y motivo para culminar mi tesis.

A mis hermanas y hermanos quienes me brindaron palabras de aliento para seguir adelante y alcanzar mi objetivo.

La Autora

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios por brindarme salud y sabiduría.

Al Dr. Ernesto Osvaldo Aduvire Pataca por su compromiso, conocimientos, asertividad y encaminarme en la culminación exitosa de mi tesis y a todos lo que hicieron posible esta meta.

La Autora

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	I
PÁGINA DE ACEPTACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS / GRÁFICOS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
Capítulo I.	
Introducción	01
1.1. Situación problemática	03
1.2. Formulación del problema	05
1.2.1. Problema general	05
1.2.2. Problemas específicos	05
1.3. Justificación	05
1.3.1. Justificación teórica	05
1.3.2. Justificación práctica	06
1.4. Objetivos	07
1.4.1. Objetivo general	07
1.4.2. Objetivos específicos	07
Capítulo II. Marco Teórico –	
Conceptual	08
2.1. Marco filosófico y epistemológico	08
2.2. Antecedentes de estudio	08
2.2.1. Antecedentes nacionales	09
2.2.2. Antecedentes internacionales	14
2.3. Bases Teóricas	18

2.3.1.	Sistema de Tratamiento de efluentes ácidos	18
2.3.2.	Límites Máximos Permisibles	24
2.4.	Marco conceptual	27
2.4.1.	Caudal	27
2.4.2.	Coagulación	27
2.4.3.	Floculación	27
2.4.4.	Precipitación química	27
2.4.5.	Plan de monitoreo	28
2.4.6.	Agentes oxidantes	28
2.4.7.	Sedimentación	28
	Capítulo III. Marco Metodológico	29
3.1.	Tipo y Diseño de Investigación	29
3.1.1.	Tipo de investigación	29
3.1.2.	Diseño de investigación	29
3.2.	Hipótesis de investigación	30
3.2.1.	Hipótesis general	30
3.2.2.	Hipótesis específicas	30
3.2.3.	Matriz de consistencia	30
3.3.	Variables	31
3.3.1.	Variable independiente	31
3.3.2.	Variable dependiente	31
3.3.3.	Matriz de operacionalización de variables	31
3.4.	Unidad de análisis	32
3.5.	Población y Muestra	32
3.5.1.	Población	32
3.5.2.	Muestra	32
3.5.3.	Muestreo	33
3.6.	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	33
3.6.1.	Técnicas	33
3.6.2.	Instrumentos	33
3.7.	Análisis y Procesamiento de la información	33
3.7.1.	Descripción del Tratamiento de aguas en la Planta de tratamiento de agua de mina	34

3.7.2. Reactivos	37
3.7.3. Equipos utilizados para el control de Ph	38
3.7.4. Servicios auxiliares	38
3.7.5. Sistema de emergencia	39
3.7.6. Reutilización del agua tratada	40
Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados	41
4.1. Presentación de resultados	41
4.1.1. Estado del sistema de tratamiento antes de la optimización	41
4.1.2. Registro histórico de excedencias en el agua tratada emitido por laboratorios acreditados	45
4.1.3. Caracterización del efluente ácido antes del sistema de tratamiento	47
4.1.4. Elección de floculante y Determinación de la dosis óptima	49
4.1.5. Sistema de tratamiento después de la optimización	52
4.1.6. Resultados del efluente tratado después de la optimización	53
4.2. Discusión de resultados	56
4.3. Comprobación de la Hipótesis	57
Conclusiones	XIV
Recomendaciones	XVI
Referencias bibliográficas	XVII
Anexos	XXII

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Rango de pH de precipitación de metales	22
Tabla 2.	Sustancias utilizadas para la remoción de iones metálicos	23
Tabla 3.	Límites Máximos permisibles para la descarga de efluentes	
	Líquidos de actividades minero – Metalúrgicos	25
Tabla 4.	Matriz de consistencia	30
Tabla 5.	Matriz de operacionalización de variables	31
Tabla 6.	Registro de caudales de ingreso a PTAM	34
Tabla 7.	Identificación del estado de equipos en el área de preparación de reactivos	42
Tabla 8.	Deficiencias en la dosificación de reactivos	43
Tabla 9.	Condiciones de operación y acciones de mejora	43
Tabla 10.	Pre tratamiento de aguas	44
Tabla 11.	Identificación de deficiencias en la planta de tratamiento convencional y acciones correctivas a implementar	45
Tabla 12.	Excedencias del LMP antes de la optimización.	46
Tabla 13.	Excedencias del LMP respecto al pH y Cobre Total del efluente tratado de antes de la optimización emitido por OEFA	47
Tabla 14.	Caracterización del efluente a tratar	47
Tabla 15.	Control de probetas para prueba	51
Tabla 16.	Resultados del efluente tratado después de la optimización emitido por un laboratorio acreditado	53
Tabla 17.	Resultados del efluente tratado después de la optimización emitido por el laboratorio de la compañía en estudio.	54

ÍNDICE DE GRÁFICOS / FOTOS/ FIGURAS

Foto 1.	Almacén de lechada de cal	38
Foto 2.	Equipo Jar Test	50
Foto 3.	Evidencias de pruebas de sedimentación (4120 – FS 1015)	51
Foto 4.	Detalle del ingreso de efluentes	52
Foto 5.	Detalle de la preparación de la Planta	52
Foto 6.	Detalle de la Planta terminada	52
Gráfico 1.	Variación de pH del efluente tratado antes y después de la optimización del sistema de tratamiento agua ácida	54
Gráfico 2.	Variación de Cu total del efluente tratado antes y después de la optimización del sistema de tratamiento agua acida	55
Gráfico 3.	Variación de Zn total del efluente tratado antes y después de la optimización del sistema de tratamiento agua acida	55
Gráfico 4.	Variación de As Total del efluente tratado antes y después de la optimización del sistema de tratamiento agua acida	56

RESUMEN

Los metales pesados y la acidez que contiene el efluente ácido de mina causan daños significativos a los cuerpos de agua, suelos y otros organismos vivos, que a su vez son difíciles de eliminar a bajo costo y de manera efectiva. La presente investigación tuvo como objetivo determinar la importancia de la optimización del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos de una compañía minera para cumplir los límites máximos permisibles (LMP).

Con esta investigación buscamos que la optimización y/o técnica utilizada perdure en el tiempo con el uso de reactivos, equipos y un control de calidad óptimo de manera que permitan descargas del efluente tratado cumpliendo los límites máximos permisibles. Esta investigación es experimental de tipo aplicada. El tratamiento idóneo para este tipo de efluente es el método activo por neutralización con hidróxido de calcio como reactivo principal en la Planta de Tratamiento de Agua de Mina (PTAM), las aguas a tratar provienen principalmente del interior de la mina, aguas superficiales de contacto, planta concentradora, una parte del agua tratada se reutiliza en las operaciones de la planta concentradora y el excedente es vertido a un cuerpo receptor.

Para optimizar el sistema de tratamiento se adquirieron bombas peristálticas para la dosificación de reactivos, sensores de pH, se optimiza el área de preparación de cal y la construcción de la PTAM, también se realizaron pruebas de sedimentación para determinar la concentración óptima de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, floculante y bisulfito de sodio. Finalmente se concluye con una remoción >99% de metales, por tanto, se cumple con los límites máximos permisibles del Decreto Supremo N° 010-2010 –MINAM.

Palabras Claves: Efluente ácido, neutralización, sistema de tratamiento

ABSTRACT

The heavy metals and acidity contained in acidic mine effluent cause significant damage to bodies of water, soils and other living organisms, which in turn are difficult to remove cheaply and effectively. The objective of this research was to determine the importance of optimizing the acid effluent treatment system of a mining company to meet the maximum permissible limits (LMP).

With this research we seek to ensure that the optimization and/or technique used lasts over time with the use of reagents, equipment and optimal quality control so that discharges of the treated effluent comply with the maximum permissible limits. This research is experimental of applied type.

The ideal treatment for this type of effluent is the active method by neutralization with calcium hydroxide as the main reagent in the Mine Water Treatment Plant (PTAM), the water to be treated comes mainly from inside the mine, surface contact waters, concentrator plant, a part of the treated water is reused in the operations of the concentrator plant and the surplus is discharged to a receiving body.

To optimize the treatment system, peristaltic pumps were acquired for dosing reagents, pH sensors, the lime preparation area and the construction of the PTAM were optimized, sedimentation tests were also carried out to determine the optimal concentration of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, flocculant and sodium bisulfite. Finally, it is concluded with a removal of >99% of metals, therefore, the maximum permissible limits of Supreme Decree No. 010-2010 –MINAM are met.

Keywords: Acid effluent, neutralization, treatment system.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

Los efluentes mineros sin tratamiento, se caracterizan por un pH extremadamente bajo, un alto contenido de metales disueltos y sulfatos (Pereira *et al.*, 2020), por ende, son una de las principales causas de contaminación de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas en el mundo (Nguegang *et al.*, 2022). Por ello se han investigado diferentes métodos para el tratamiento de los efluentes ácidos, las cuales se clasifican en tratamiento pasivo, activo e integrado (Wibowo *et al.*, 2022). La Unidad Minera objeto de estudio, tiene con un plan de manejo de aguas que consiste en captar todas las aguas provenientes de sus operaciones para su respectivo tratamiento convencional en pozas de neutralización, el cual tiene muchas deficiencias:

- El tratamiento no es continuo, solo por algunas horas.
- La capacidad de las pozas no abastece el caudal que genera la compañía

minera.

- Existe un consumo excesivo de reactivos a pesar de que el tratamiento solo es por horas.
- La dosificación de reactivos es manual.
- No cuenta con equipos necesarios para realizar el tratamiento y el control de calidad.

Debido a estas deficiencias, el efluente tratado de la compañía minera presenta excedencias de los límites máximos permisibles, por ello el objetivo de este trabajo de investigación es determinar la importancia de la optimización del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos de una compañía minera para cumplir los límites máximos permisibles (LMP) mediante un tratamiento activo por neutralización con cal viva o cal hidratada (Hou *et al.*, 2021) ya que se adapta a cualquier acidez o caudal.

Para la mejora del tratamiento se ha elevado el pH del efluente ácido a 9.5 - 9.8 añadiendo un reactivo alcalino (hidróxido de calcio) al ingreso de la planta, luego se dosifica el floculante al ingreso de los floculadores para acelerar la sedimentación de los SST y metales pesados. También, se han implementado bombas peristálticas para la dosificación de reactivos, sensores de pH y se optimizó el área de preparación de hidróxido de calcio. También se realizó una caracterización del efluente ácido para determinar las concentraciones óptimas de CaOH y floculante. Como etapa final se regularizó el pH del efluente tratado con metabisulfito de sodio para descargar con un pH <8.5 y así cumplir con los LMP del Decreto Supremo N° 010-2010 –MINAM.

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.

La minería es una actividad económica que permite la explotación y extracción de los minerales. El sector minero es reconocido por su importancia en el desarrollo económico de diversos países, no obstante, su aprovechamiento debe realizarse con las medidas necesarias para proteger el medio ambiente y no generar impactos negativos (Viana, 2018). En este marco uno de los problemas más significativos del sector minero, es la producción de aguas ácidas debido a las actividades propias de explotación y extracción (Levio-Raiman *et al.*, 2021).

Los efluentes ácidos sin tratamiento generan una gran preocupación, ya que el impacto negativo que provoca los contaminantes presentes en este tipo de efluentes sobre las fuentes de agua y las comunidades aledañas son devastadores. Las aguas ácidas de mina se producen mediante el proceso de oxidación de sulfuros metálicos como el FeS_2 (Sulonen *et al.*, 2021).

Las aguas ácidas de mina contienen una gran cantidad de sólidos, elementos traza, compuestos inorgánicos, metales totales y disueltos; además, tienen un pH extremadamente ácido, lo que hace que es altamente corrosivo.

Otro aspecto que se desconoce, son los drenajes ácidos de las minerías ilegales en Perú, ya que existe una incertidumbre sobre quién debe asumir las responsabilidades ambientales. Las actividades mineras pueden generar aguas ácidas durante y después de sus operaciones.

La Unidad Minera en estudio está ubicada a una altitud promedio de 4400 m.s.n.m. en la región de Huancavelica, la cual realiza actividades

mineras de exploración, explotación y beneficio de minerales polimetálicos con altos contenidos o leyes de plomo, plata, zinc y cobre.

La Unidad Minera cuenta con un estudio de impacto ambiental semi detallado en el cual menciona de manera resumida y básica el plan de manejo de aguas que consiste en captar todas las aguas provenientes de las bocaminas, de la planta concentradora, de pozas de filtraciones, de pozas de subdrenajes, de aguas de contacto y del depósito de relaves para su respectivo tratamiento mediante proceso de neutralización y floculación. Dicho sistema cuenta con pozas de neutralización con un tiempo de residencia que no es favorable para la sedimentación y para todo el caudal que genera. Cabe mencionar que la concentración de los reactivos no son los adecuados, así mismo la preparación y dosificación de reactivos es de forma manual por ello existe un consumo excesivo de reactivos. Además, no cuenta con los equipos necesarios para la preparación y dosificación de reactivos, ni para el control del pH. Esta problemática se agrava en temporada de lluvias cuando el caudal y contaminantes del efluente se incrementa en un 200 %. En ese escenario, el sistema de tratamiento convencional no se abastece por lo que tienen que desviar un 50 % del caudal al depósito de relaves. Por ello, se realizaron pruebas preliminares como medición de caudal del efluente ácido, dosificación de hidróxido de calcio, floculante, bisulfito de sodio, pH, concentración de zinc, cobre, hierro, plomo y sólidos suspendidos totales (SST) y tiempo de residencia.

1.2. FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.2.1. Problema general.

¿En qué medida la optimización del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos de una compañía minera influye en el cumplimiento de los Límites Máximo-Permisibles (LMP)?

1.2.2. Problemas específicos.

- a) ¿Cuáles son las condiciones operativas del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos?
- b) ¿Cuáles son los controles de calidad para el vertimiento de la Unidad Minera para cumplir los LMP?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.3.1. Justificación teórica.

Una mina que produce aguas acidas puede causar efectos devastadores a corto y largo plazo sobre las fuentes de aguas subterráneas y superficiales, También puede afectar a la vida acuática; situaciones que terminan por perjudicar a las comunidades aledañas, ya que se les impide usar este recurso (Sandra, 2020, p.19). Por ello es necesario realizar la evaluación del sistema de tratamiento convencional de la unidad minera para identificar las deficiencias o cumplimientos en el tratamiento. Por tanto, se tiene que evaluar la preparación, concentración, dosificación de reactivos, eficiencia de remoción de sólidos, capacidad y equipos apropiados para el tratamiento. Los resultados emitidos del análisis fisicoquímico del efluente tratado en la planta convencional por los laboratorios AGQ, EQUAS y el laboratorio

interno de la unidad minera nos indican algunas desviaciones en el cumplimiento de los LMP del D.S N° 010-2010-MINAM.

Asimismo, esta normativa ambiental obliga a la compañía a mantener condiciones óptimas de los efluentes generados por sus actividades. Por ello en la presente investigación se optimizará el sistema de tratamiento de efluentes ácidos de una unidad minera para obtener agua tratada que cumpla los LMP, pueda ser reusada para diversas actividades y el excedente será vertido a un cuerpo receptor.

1.3.2. Justificación práctica.

Este estudio toma como base los resultados de los monitoreos de los laboratorios acreditado AGQ, EQUAS y del laboratorio de la unidad minera. Asimismo, se realizó una inspección de la situación actual del sistema tratamiento y se realizaron pruebas de sedimentación. La información obtenida brindará una alternativa de solución a las deficiencias en el sistema de tratamiento y así poder realizar una disposición sanitaria del efluente tratado.

En esta investigación se establece realizar la caracterización del efluente ácido, pruebas piloto (concentración, dosificación, preparación de reactivos), requerimiento de equipos y construcción de una PTAM para lograr con la optimización del sistema de tratamiento y cumplir con los límites máximos permisibles.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.4.1. Objetivo general.

Determinar la importancia de la optimización del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos de una compañía Minera para cumplir los Límites Máximos Permisibles (LMP).

1.4.2. Objetivos específicos.

- a) Determinar las condiciones operativas del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos
- b) ¿Establecer controles de calidad para el vertimiento de la Unidad Minera para cumplir los LMP?

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO FILOSÓFICO Y EPISTEMOLÓGICO.

La epistemología se ocupa de la investigación científica y del resultado que se deriva de ella, con el objetivo de aclarar la esencia y la adquisición de teorías y conceptos científicos (Hurtado-Dianderas Smith y Rivera Leon, 2006, p. 2)

Este estudio adopta el paradigma cuantitativo, dado que nos interesa descubrir las causas y vínculos entre conceptos que se derivan de un esquema teórico anterior. Por ello en esta investigación se utiliza una tecnología para solucionar un problema ambiental con el objetivo de fomentar en nuestro entorno, tal como el autor nos señala en su obra: La ciencia y la tecnología son útiles para incrementar la comodidad social y establecer la diversidad de los dilemas económicos, culturales, ambientales y proteger los recursos naturales. (Olivé Morret, 2011, p38).

Este estudio se refiere a una grave amenaza para disminución de los recursos naturales. La conferencia inaugural de las Naciones Unidas en materia medioambiental tuvo lugar en Estocolmo y, como consecuencia, se

obtuvo el documento conocido como "Una Sola Tierra". En los dos sucesos, se da inicio a un largo proceso para entender y comprender los problemas medioambientales en ese instante y para el futuro. La filosofía de la ética ambiental considera las interacciones éticas entre los individuos y su ambiente natural. Posee un gran impacto en diversas áreas como el derecho, la tecnología, la sociología, la economía, la ecología y la geografía. En la revista *Applied Philosophy* Bertha Nate (1993), introducir la noción ampliamente reconocida del equilibrio ecológico entre las entidades vivas y las entidades inertes. La comunidad científica alerta a nuestra humanidad sobre los grandes desafíos medioambientales como: la pobreza, la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental. Las Naciones Unidas establece que el deterioro ambiental es la causa y el efecto de la interacción entre las actividades de las personas y la naturaleza.

2.2. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

2.2.1. Antecedentes nacionales

- a. Patiño (2022) desarrolló el “tratamiento del efluentes ácidos de la Unidad Minera Arasi usando el método activo para la remoción de metales Fe y Al”. Unidad De Posgrado De La Facultad De Ingeniería Ambiental Y De Recursos Naturales. Universidad Nacional Del Callao. Su objetivo fue evaluar la remoción de metales de Fe y Al del efluente ácido de la unidad minera en mención, mediante el proceso de neutralización usando oxido de calcio. Para ello realizó pruebas de sedimentación a diferentes rangos de pH (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12), utilizando como muestra 40 L de agua ácida del botadero de la minera, con el fin de encontrar el punto óptimo de remoción metales y cumplir la normativa ambiental vigente; luego en

el mismo rango de pH se añadió floculante de 5 y 10 mg/L para encontrar las condiciones óptimas de tratamiento. En esta investigación se encontró que a un pH de 6 a 9, las concentraciones de Al Total y Fe disuelto está por debajo de los LMP para vertimiento de efluentes mineros. Así mismo se comprobó que a un pH de 7.7 y una dosificación de floculante de 6.77 mg/L disminuye aún más la concentración de metales como el Al total y el Fe Disuelto de las aguas ácidas de mina, esto se corroboró en el estudio de regresión que mostró coeficientes de determinación superiores al 95%. Se concluye que, a través de la neutralización con óxido de calcio, el sistema de tratamiento con el método activo presenta una remoción de metales cumpliendo la normativa ambiental vigente (LMP).

- b. Castillo (2021) estudió la remoción de Mn^{+2} con el uso del hipoclorito de sodio ($NaClO$) para mejorar la calidad del agua del Río Yauli. Escuela de Posgrado. Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Universidad Inca Garcilaso De La Vega. Esta investigación se realizó en la Compañía Minera Volcán S.A.A -Yauli. el objetivo de este trabajo fue reducir la concentración de Mn^{2+} por debajo de 0.2 mg/L utilizando el hipoclorito de Sodio, para ello utilizó el agua ácida que sale por las minas de Carahuacra y San Cristobal con un pH de 3.5 a 5.5 y 250 mg/L de Mn^{+2} . realizó pruebas a distintos rangos de pH, concentraciones y dosificaciones de hipoclorito de sodio (mg/L); obteniendo una remoción de manganeso del 99.96%. El rango óptimo de pH es de 8.0 y 8.8, utilizando una concentración de 0.05% y una dosificación de 1mg/l de hipoclorito de sodio. Los resultados de las pruebas a nivel de laboratorio

determinaron que el hipoclorito de sodio presenta resultados óptimos en la remoción de Mn^{+2} , así mismo tiene un costo menor y mayor disponibilidad en comparación con otros agentes reductores.

- c. Aponte (2020) estudió la “Neutralización y Coagulación del efluente ácido de mina para la remoción de metales totales en la Compañía Minera Aurífera Santa Rosa S.A”. Escuela de posgrado de la Facultad de ingeniería metalúrgica y de -materiales de la Universidad Nacional del centro del Peru. Su objetivo fue demostrar la eficiencia de la neutralización, coagulación para el tratamiento del drenaje ácido de la unidad minera COMARSA. Para el cual realizó pruebas a nivel de laboratorio de tiempo de sedimentación, concentraciones de floculante y coagulante para diferentes rangos de pH, donde se encontró que el rango óptimo de floculante es 1mg/L y de coagulante férrico es de 60 mg /L para un pH de 9. Concluyó que los metales que precipitan con hidróxido de sodio a un pH de 6 a 9 son: Fe, As, Pb, Cu, Zn, para el caso del Mn se tiene que incrementar el pH de 9.0 a 9.5, así mismo es importante tener en cuenta que el LMP según el D.S N° 010-2010 MINAM para la descarga de efluentes mineros metalúrgicos es de 6 a 9. Las pruebas a nivel de laboratorio de sedimentación mediante el método de neutralización y coagulación del efluente ácido en COMARSA, fueron eficientes obteniendo una remoción del 99.5% de Cu, 99.99% de Fe 96.67% de Pb, 99.94% de zn, y 97.55% de SO_4 .
- d. Guillen (2020) estudió el “Descarga de efluentes ácidos de la mina marta en la contaminación de las aguas del rio Tinyaclla” Unidad de

posgrado. Facultad de Ingeniería de Minas. UNCP, El objetivo de la investigación fue evidenciar que la descarga del efluente minero de la mina Marta no contamina las aguas del río Tinyacclla, tras llevar a cabo un tratamiento de las aguas ácidas con el método activo. El diseño de investigación es descriptivo y comparativo, donde realizaron muestreos antes y después de la del tratamiento del efluente ácido. La población es la toma de datos diarios desde el mes de enero hasta junio del 2012, estos parámetros son registrados en una base de datos para su análisis. Para el tratamiento de las aguas ácidas se diseñó una planta de tratamiento por el método activo que consiste en utilizar un reactivo alcalino como la soda caustica y para acelerar la sedimentación se utilizó el floculante magnafloc-351, las muestras fueron enviados a un laboratorio acreditado y los resultados obtenidos del efluente tratado con el método propuesto cumple los límites máximos permisibles que están establecidas en el Decreto Supremo 010 – 2010 Ministerio del Ambiente. Se concluyó que la descarga del efluente liquido de la mina Marta no contamina al río Tinyacclla.

- e. Puente (2019) presentó una “Optimización del sistema de tratamiento y disposición sanitaria de aguas residuales industriales para vertimiento clase III, provenientes de la boca mina del nivel 250 (EF 03) al río San José” Unidad de posgrado. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos Su objetivo fue gestionar todos los requisitos necesarios para optimizar la planta de tratamiento como elaborar los procedimientos, estándares y gestionar los permisos legales con el fin de asegurar cumplimiento con

la normativa ambiental vigente para un vertimiento tipo III. Y en su resumen muestra que el sistema de tratamiento encierra una descripción particular que la distingue de los tratamientos convencionales. Esta distinción se observa cuando todos los efluentes como las industriales, domésticas, de escorrentía, de precipitaciones pluviales, lagunas etc., se almacena en el depósito de relaves que funciona como una poza de sedimentación. Después por rebose el espejo de agua son transportados por tuberías a la zona de Nv.400, aguas abajo del depósito de relaves existen canales provistos de las perforaciones diamantinas que conectan el NV 250 del túnel Paul Novejans, lo que permite el ingreso de estos efluentes al interior mina. A este túnel que tiene más de 7.5 kilómetros de longitud ingresa 187 L/s de efluentes ácidos de la mina Animon que comprende el mayor caudal de las zonas de operación de la mina en mención, así mismo ingresa aguas pluviales, filtraciones de lagunas, aguas subterráneas. Por lo que asciende a un caudal total de 687 L/s, este efluente ácido debe de ser tratado antes de su descarga al río San José, cumpliendo el ECA para vertimiento tipo III, ya que es un aportante al Río Mantaro. La responsabilidad ambiental es muy alta porque las comunidades aledañas la utilizan esta agua para regar sus pastizales, así mismo la preservación de las aguas para consumo humano, es un estricto cumplimiento del marco legal emitido por el Ministerio del Ambiente. Desde el año 2004 se llevó a cabo una serie de evaluaciones de diferentes métodos de tratamiento para mejorar el sistema de tratamiento y descargar un efluente que cumpla con los límites máximos

permisibles, por esta razón se inició con la investigación, evaluación y análisis de los procesos operativos para determinar el rango y las concentraciones óptimas de tratamiento y se concluye que se controló el pH en 8.2, añadiendo hidróxido de calcio en la salida del túnel y con esto disminuyó el contenido de metales en el vertimiento cumpliendo los LMP, así mismo se incrementó el tiempo de residencia en la tercera poza de sedimentación de 600 L/s, mejorando así la eficiencia del sistema. El pH adecuado para precipitar el contenido metálico establecido en el DS 010-2010 MINAM es de 8.2 a 8.6.

2.2.2. Antecedentes internacionales

- a. Dr. Ing. Zamora¹ y M. Sc. Meza² (2022) describieron la Formación, prevención e innovación en el tratamiento de drenajes ácidos en operaciones mineras, el cual se caracteriza por tener un pH extremadamente ácido, metales totales, metales disueltos, sulfato. Las aguas ácidas se generan cuando los sulfuros entran en contacto con el agua y el oxígeno. Hoy en día se considera una de las fuentes más significativas de contaminación, principalmente las que se generan en los botaderos y relaveras. Por ello en esta investigación se presentó los principios básicos de la generación de los efluentes ácidos y métodos de prevención del manejo ambiental de todos los residuos que generan aguas ácidas y finalmente, las últimas tecnologías en los métodos de tratamiento de los drenajes ácidos. Se han investigado diferentes métodos de tratamiento para este tipo de efluentes para evitar una contaminación de los recursos hídricos cercanos a las operaciones mineras; entre ellas tenemos, la neutralización, adsorción, intercambio

iónico, membranas, bacterias sulfato-reductoras y la electrólisis. Sin embargo, todos estos métodos necesitan el uso de equipos, reactivos, supervisión y mano de obra, controles que nos permita tener una descarga que cumpla la normativa ambiental vigente. Por ello, se han desarrollado estrategias para prevenir la generación de las aguas acidas, mediante una segregación adecuada de todos los residuos estériles producidos en las operaciones mineras y también, la desulfurización de los relaves, antes de su disposición final o su reprocesamiento; y finalmente realizar un tratamiento de los efluentes ácidos al interior de la mina.

- b. Masindi *et al.* (2018) realizó una investigación sobre la recuperación de agua y síntesis de yeso y piedra caliza a partir del proceso de tratamiento de drenaje ácido de mina utilizando una combinación de nano láminas de magnesita pretratadas, cal y burbujeo de CO₂ en la Universidad de Sudáfrica (UNISA). En este estudio, se utilizó una integración de magnesita pretratada, cal y burbujeo de CO₂ para el tratamiento del drenaje ácido de mina (AMD), el objetivo principal fue recuperar agua limpia y sintetizar minerales valiosos. Este proceso de tratamiento comprende tres pasos que incluyen la neutralización usando magnesita (síntesis de yeso), usando cal y síntesis de piedra caliza mediante burbujeo de CO₂. Los resultados piloto revelaron que los hidróxidos amorfos de Fe, yeso y piedra caliza pueden obtenerse del lodo/producto secundario. Los materiales obtenidos fueron de alta pureza (>75%). El pH inicial del AMD fue de 2.5 y se incrementó a pH 10 y >12 después de estar en contacto con magnesita y cal

respectivamente. Para estabilizar el pH se inyectó CO_2 y el pH llegó a <7.29, así mismo se obtuvo una remoción >99% de especies metálicas y >95% de sulfato. Concluyó que la aplicación del proceso integración de magnesita pretratada, cal y burbujeo de CO_2 puede neutralizar el AMD y recuperar productos valiosos, este proyecto novedoso y autosostenible contribuirá en gran medida a reducir los impactos del AMD al valorizar los minerales del producto y explotar el valor comercial resultante, lo que ayudará a compensar los costos operativos del proceso de tratamiento.

- c. Balladares *et al.* (2018) realizó un estudio sobre la neutralización y coprecipitación de metales pesados por adición de cal a efluentes de planta de ácido en una fundición de cobre realizado en la Universidad de Concepción, Chile. El objetivo de este trabajo fue mostrar el desarrollo e implementación de un circuito de neutralización con óxido de calcio para efluentes ácidos. La neutralización se realizó mediante la adición progresiva de óxido de calcio como agente modificador del pH. Se realizaron pruebas discontinuas y continuas para evaluar el potencial de neutralización entre pH 1 y 11 en un efluente que contiene As, Cu, Fe, Zn, Ni, Pb, Cd, Hg, Sb, Mn, Mo, Al y SO_4 . La eficacia de la neutralización discontinua con cal fue del 97 % para el Pb, del 98 % para el Sb y del SO_4 y del 99,5 % para el resto de los metales excepto el cloruro, con sólo un 19 %. El uso de un circuito en serie propuesto para la producción tentativa de yeso limpio mostró que a pH 1 a 2 y con un mínimo de cuatro lavados, fue posible obtener un precipitado de yeso que cumple con las normas vigentes de peligrosidad. residuos sólidos y

posibilita la comercialización. Las pruebas continuas confirmaron los resultados de las pruebas por lotes. Se notó que la cal residual puede elevar significativamente el pH. Las pruebas de diferentes floclantes mostraron una mejora sustancial en la tasa de sedimentación con aumentos del orden de 300 a 1000% para pH 1.7 y 11, respectivamente. Se estableció la necesidad de utilizar estos reactivos para un proceso a escala industrial.

- d. Carneiro *et al.*, (2020) realizó un estudio sobre el tratamiento de efluentes ácidos de mina por neutralización que fue desarrollado en la Universidad Católica do Rio Grande do Sul Brasil. El drenaje ácido de mina (AMD) representa un problema importante en la industria minera a nivel mundial debido al riesgo de la contaminación del agua y del suelo. Su tratamiento activo implica la adición de reactivos alcalinos como NaOH o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para incrementar el pH y precipitar los metales disueltos, aunque cantidades sustanciales de los iones disueltos pueden persistir, por ello el objetivo de este trabajo fue evaluar la características químicas y físicas del efluente tratado y evaluar sus efectos ecotoxicológicos en pez cebra. La muestra de AMD estudiada, altamente asociada a pirita, presentó alta contenido de sulfato e iones metálicos disueltos y se sometió a las siguientes condiciones de tratamiento: NaOH a pH 7,0 y 8,7, y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a pH 7,0 y 8,7. Todos los tratamientos de neutralización resultaron en un resultado satisfactorio reducción de la concentración de metales, se concluye se obtuvieron mejores resultados con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a pH 8,7; aunque Mn y As aún permanecía por encima o muy cerca de los límites máximos de descarga según la legislación

brasileña. Por lo tanto, se empleó un paso adicional para la adsorción de Mn y As por la biomasa de algas. Con respecto a los ensayos toxicológicos in vivo, no se registró una letalidad significativa en todos los grupos de DMAE tratados. Los grupos de Ca(OH)_2 se desempeñaron más cerca del control que los grupos tratados con NaOH. El tratamiento adicional de la etapa de pulido con el alga *Scenedesmus* sp. permitió tener mejoras en términos de remoción de cantidades residuales de As y Mn, pero no en la toxicología características de la DMAE tratada. Concluye que la muestra de AMD sin tratar utilizada en este trabajo presentó un pH de 2,5 y una concentración muy alta de metales y sulfatos. Los tratamientos AMD realizados a través de la neutralización/precipitación han demostrado ser efectivos en la eliminación de la mayoría de los metales, excepto la presencia de Mn y As, por encima de los estándares establecidos para descarga de agua en Brasil. El paso adicional de biosorción en un sistema vivo para el crecimiento de algas ayudó en el proceso de tratamiento, ya que contribuyó a la reducción de los niveles de Mn y As.

2.3. BASES TEÓRICAS.

2.3.1. Sistema de tratamiento de efluentes ácidos.

2.3.1.1. Efluentes Industriales:

En los efluentes industriales, se pueden encontrar diferentes tipos de contaminantes como metales disueltos, totales y sólidos suspendidos totales. Las sustancias disueltas pueden ser compuestos orgánicos como la demanda química de oxígeno soluble o inorgánicos como los iones que pueden presentar cierta toxicidad (Cadorin *et al.*, 2007).

Los efluentes más importantes del sector minero son los drenajes ácidos de mina (DAM), aguas de escorrentía y aguas provenientes de las operaciones de plantas concentradoras (Levio - Raiman *et al.*, 2021).

A. Drenajes Ácidos de Mina

El Drenaje Acido de Mina (DAM), es un agua proveniente de las operaciones mineras, que se genera por la oxidación de los minerales sulfurados, especialmente la pirita (FeS_2). Esta reacción se produce cuando los minerales están expuestos al agua y al oxígeno, ocasionando la acidez del agua y el transporte de los metales presentes en los minerales (Moreno, 2014).

Esta agua ácida, contiene concentraciones elevadas de diferentes contaminantes que sobre pasan los límites máximos permisibles del DS 010-2010 MINAM, por lo tanto, podría generar un impacto negativo y devastador sobre los recursos hídricos y se evidenciaría en las corrientes de los ríos, arroyos y lagos (Hu *et al.*, 2022).

Este drenaje contiene pH ácido, sulfatos, metales disueltos y totales, nutrientes, núclidos radioactivos, sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales.

(Sandra, 2020) indica que una las preocupaciones más importante para sector minero es la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por la descarga de efluentes ácidos sin tratamiento y los efectos serian:

- ✓ Afectación a la calidad del agua, volviéndola no apto para el consumo humano y/o otros usos.
- ✓ Daños al medio ambiente especialmente en comunidades biológicas

existentes en los recursos hídricos.

✓ Degradación del paisaje

a. Características del drenaje ácido de mina

Los drenajes ácidos de mina se caracterizan por su pH ácido y por sus concentraciones elevadas de sulfatos y metales como Mn^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Mo^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} y Zn^{2+} (Forigua *et al.*, 2017).

Una correcta caracterización debe contemplar la medición de parámetros de campo y laboratorio como el caudal, pH, conductividad, sulfatos, alcalinidad total, acidez o alcalinidad neta (expresadas como $CaCO_3$); además de contenidos de Fe^{2+} , Fe total, aluminio y manganeso

b. Tratamiento de efluentes ácidos

Se han desarrollado diversos métodos para el tratamiento de los efluentes ácidos, las cuales se clasifican en tratamiento pasivo, activo e integrado (Wibowo *et al.*, 2022). El tratamiento activo requiere el uso de agentes de neutralización, absorbentes, resinas de intercambio iónico, adsorción, electrocoagulación, electrodiálisis, tecnologías de membranas y ósmosis inversa (Nguegang *et al.*, 2022). El tratamiento pasivo se utiliza principalmente después de que se cierran las minas y se adaptan mejor a los AMD que tiene una acidez baja y un índice de flujo bajo (Levio-Raiman *et al.*, 2021) y pueden ser los humedales artificiales, barreras biológicas, barreras reactivas permeables, humedales aeróbicos, humedales anaeróbicos y drenajes de cal (Nguegang *et al.*, 2022) y por último el tratamiento integrado.

c. Tratamiento por métodos activos

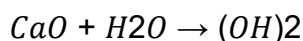
Los tratamientos activos, se realizan con la adición de sustancias alcalinas para neutralizar las aguas ácidas y ayudar a la sedimentación de los metales. Para realizar los tratamientos de los drenajes ácidos de mina por métodos químicos, comúnmente denominados tratamientos convencionales, es necesario conocer las reacciones de oxidación que se realizarán para formar sustancias ácidas (Balladares *et al.*, 2018).

Los tratamientos convencionales de las aguas ácidas abarcan diversos métodos fisicoquímicos, que conllevan un uso desmedido de sustancias químicas y capital, al usar un reactivo neutralizante, energía y la demanda de personal para las operaciones de tratamiento. El tratamiento activo, es un método en el cual se utiliza un álcali para neutralizar y realizar la oxidación del ion ferroso a la su forma soluble y realizar la remoción de los metales totales y disueltos mediante la etapa de sedimentación (Rodríguez *et al.*, 2016).

Las sustancias más utilizadas para el método activo son la cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa cáustica, carbonato sódico o amoníaco, con el fin de conseguir la neutralización del agua ácida y alcanzar las condiciones idóneas para la sedimentación de los metales pesados (Aduvire, 2006). También se puede adicionar la dosificación de floculantes para acelerar la separación sólida/líquido. El reactivo más usado para el método activo es el óxido de calcio, debido a su bajo costo y alta eficiencia, pues la cantidad que se requiere es inferior a 0.1 kg/1000L, para efluentes ácidos con pH de 3.5 y 5.0 (Montoya, 2015).

El óxido de calcio en presencia de agua y metales presenta la

siguiente reacción.



El tratamiento activo presenta dos etapas, el primero es la neutralización de las aguas ácidas con hidróxido de calcio y la precipitación de los iones metálicos y el segundo es la clarificación y/o filtración (Cadorin *et al.*, 2007).

d. Tratamiento químico de efluentes ácidos

Consiste en dosificar sustancias alcalinas como el óxido de calcio, sosa caustica, carbonato sódico, con el fin de neutralizar las aguas ácidas y se realice la precipitación de los metales totales, la cuales precipitan como hidróxidos insolubles en un rango de pH de 8.5 a 10 (Aduvire, 2006).

Tabla 1. Rango de pH de precipitación de metales

Elemento	pH (precipita)
Hierro	Fe^{+3} entre 3.7 a 6 y Fe^{+2} superior a 8.5
Manganeso	Superior a 9.5
Aluminio	• 5.5 (precipita en el agua). • Superior a 8.5 (soluble)
Zinc	Superior a 8.5

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el tipo de tratamiento, se tiene que evaluar la concentración y que contaminantes contiene el efluente ácido (Masindi *et al.*, 2018).

Generalmente se trabaja a un pH de 9.0, pues en condiciones más alcalinas también se incrementa la solubilidad del Pb y Zn. La precipitación de hidróxidos en los diversos tratamientos activos de efluentes ácidos se realizó en 3 pasos (Aduvire, 2006).

- ✓ Oxidación química (para convertir Fe^{2+} en Fe^{3+})

- ✓ Dosis con álcalis sal iónica básica de un metal alcalino, especialmente Ca(OH)_2 , Na(OH)_2 , y NaHCO_3 .
- ✓ Sedimentación de flóculos.

En las plantas de tratamiento, la oxidación se genera principalmente por una mezcla hidráulica. Sin embargo, se puede aplicar otros enfoques mecánicos o sustancias químicas como el peróxido de hidrogeno y en el proceso de alcalinización cada reactivo tiene sus ventajas y desventajas. Principalmente se usa el óxido de calcio por ser la más económica, sin embargo, si se quiere precipitar manganeso, zinc o cadmio, la sosa caustica es más barato todavía y si el área de la planta es muy pequeña, lo más recomendable es utilizar amoniaco en estado de gas (Aduvire, 2006), ver tabla 2.

Tabla 2. Sustancias utilizadas para la remoción de metales pesados por sedimentación.

Agente de precipitación	Ventajas	Desventajas
Cal apagada Ca(OH)_2	El costo es bajo Tratar caudales altos	Contiene Impurezas, precipitación lenta CaSO_4 , CaCO_3
Carbonato sódico	Soluble. Rápido	Caudales pequeños, Costo alto Concentraciones bajas de hierro
Hidróxido sódico	Limpio. Rápido	Para caudales pequeños, Costo relativamente alto, Peligro en la manipulación
Amoníaco	Soluble. Rápido	Formación de complejos, nitrato amónico residual
Sulfuro sódico	Productos muy insolubles	Desprende H_2S
Ácido sulfúrico	Rápido. Costo bajo	Precipita CaSO_4
Ácido clorhídrico	Rápido. Limpio	Costo relativamente alto
Dióxido de carbono	Disponibles gases combustibles	

Fuente: Aduvire, O. (2006).

e. Tratamiento por métodos pasivos

El tratamiento pasivo es un método muy atractivo para las compañías mineras en la fase de cierre y/o abandono, las ventajas de este método es que no se requiere personal de forma permanente, ni el uso de electricidad,

ni reactivos químicos y raras veces se requiere el tratamiento de los subproductos (Sandra. 2020). Los tratamientos pasivos más utilizados son los filtros de piedra caliza (aeróbico y anóxico), reactores bioquímicos, humedales artificiales aeróbicos y anaeróbico, barreras reactivas permeables y sucesivos sistemas productores de alcalinidad (Balladares *et al.*, 2018). También estos métodos pasivos pueden dividirse en biológicos y químicos; el primero se caracteriza por utilizar bacterias anaerobias, y el segundo se basa en las reacciones de oxido-reducción (Nguegang *et al.*, 2022).

f. Tratamiento por método integrado

En algunos casos es posible tratar efluentes ácidos combinando técnicas activas y pasivas conocido como el tratamiento integrado implica el uso de un proceso de tratamiento activo, como la neutralización aguas arriba y la purificación del agua resultante aguas abajo utilizando humedales o biobarreras (Masindi *et al.*, 2018).

2.3.2. Límites Máximos Permisibles

2.3.2.1. Definición

Los límites máximos permisibles es la medida de la concentración de los parámetros físicos, químicos y biológicos, que contiene el efluente tratado de las compañías mineras y que a ser superado puede causar daños significativos en el medio ambiente o ser humano, por tanto, su cumplimiento es de estricto cumplimiento.

2.3.2.2. Marco legal

- a) La Constitución política del Perú 1993
- b) La Ley General del Ambiente N° 28611 (15/10/2005)
- c) La Ley de Recursos Hídricos N° 29338
- d) Decreto supremo N° 001-2010-AG
- e) La ley del Sistema Nacional de gestión ambiental (08/06/2004)
- f) La ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (23/04/2001)
- g) Decreto Supremo N° 016-2009-MINAM de la Ley N° 27446 – Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental.
- h) La Ley del Sistema nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental N° 29325
- i) La Autoridad Nacional del Agua - ANA, creada por Decreto Legislativo N° 997 - Ley de Organización y Funciones del Ministerio de Agricultura
- j) Estándares de calidad Nacionales de calidad ambiental para agua D.S N° 002-2008-MINAM.
- k) Decreto Supremo N° 010-2010 –MINAM: Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero — Metalúrgicas.

Tabla 3. Límites Máximos permisibles para la descarga de efluentes Líquidos de actividades minero - Metalúrgicos

Límites Máximos Permisibles Descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas			
Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
Ph		6 – 9	6 – 9

Sólidos totales en suspensión	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	0,002	0,0016
Zinc total	mg/L	1,5	1,2

Fuente: Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM

2.3.2.3. Programa de Monitoreo

Este programa es un documento realizado por la compañía minera, en el cual se tiene que especificar la ubicación de los puntos de monitoreo, frecuencia y parámetros. Este documento es de estricto cumplimiento y también nos permitirá identificar problemas y tomar medidas preventivas y/o correctivas (Puente 2019).

2.3.2.4. Protocolo de Monitoreo.

Este protocolo es un instrumento que establece los procedimientos y metodologías estandarizados para el desarrollo completo y adecuado de los monitoreos del agua, con la finalidad que obtener información confiable. La aplicación de los procedimientos estandarizados en todas las fases del monitoreo de la calidad del agua permite minimizar y eliminar errores para garantizar la obtención de datos e información consistente y confiable.

2.4. MARCO CONCEPTUAL

2.4.1. Caudal

El caudal es el volumen del efluente que ingresa a la planta de tratamiento (Aduvire, 2006).

2.4.2. Coagulación

Es un proceso que utiliza coagulantes químicos y energía para realizar el mezclado y desestabilizar la materia coloide y fomentar al choque de las partículas y lograr la formación de pequeños flóculos (Puente, 2019). Los coagulantes más utilizados en el tratamiento de aguas son los de aluminio, hierro, hidróxido de calcio y carbonato de magnesio (Aponte, 2020).

2.4.3. Floculación

En el tratamiento de agua de mina, los floclantes se adicionan después del proceso de coagulación, el cual aglomera y forma flóculos grandes y pesados para acelerar la sedimentación de los metales (Cadorin *et al.*, 2007). Los floclantes más utilizados son el cloruro férrico y sulfato de aluminio (Aponte, 2020).

2.4.4. Precipitación Química

El proceso de precipitación consiste en la obtención de un sólido a partir de una disolución, el cual se lleva a cabo mediante una reacción química, a través de la evaporación del disolvente por el enfriamiento de una disolución

caliente o por alteración de la polaridad de este. El sólido obtenido de esta manera se conoce como precipitado y puede contener impurezas. Por lo general, será imprescindible cristalizarlo y recrystalizarlo (Canales, 2007).

2.4.5. Plan de Monitoreo

Todas las empresas mineras tienen un plan de monitoreo que se encuentra establecido en los EIA o PAMA, según sea el caso. El plan de monitoreo y seguimiento permite establecer la red de monitoreo que garantice el cumplimiento de las normas sobre calidad ambiental.

2.4.6. Agentes oxidantes

Es una sustancia con la capacidad de oxidar otras sustancias. En algunos rangos de pH el oxígeno es imprescindible para que se realice la oxidación de los sulfuros de hierro y la generación de Fe^{3+} (Patiño, 2022).

2.4.7. Sedimentación

La sedimentación es una operación de separación por gravedad de sólido/líquido, este proceso se llama también decantación o clarificación (Patiño, 2022). Este proceso se realiza en cualquier tipo de sedimentador pueden ser las simples, las de placas inclinadas o las unidades de contacto de sólidos (Aduvire, 2006).

Capítulo III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, la cual tiene como propósito utilizar los conocimientos adquiridos para resolver problemas de la sociedad. En este caso, se está optimizando el sistema de tratamiento de efluentes ácidos de una compañía minera para evitar las excedencias en los límites máximos permisibles y así evitar los posibles impactos ambientales.

3.1.2. Diseño de la investigación

Esta investigación es experimental, ya que se centra en la manipulación de la variable independiente, para observar sus efectos en la variable dependiente.

3.2. HIPÓTESIS.

3.2.1. Hipótesis general.

La optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos en una compañía minera permite el cumplimiento de los límites máximos permisibles del vertimiento.

3.2.2. Hipótesis específicas.

- a. Las condiciones operativas del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos influyen en el cumplimiento de los LMP
- b. Los controles de calidad del vertimiento de la Unidad Minera influyen en el cumplimiento de los LMP

3.2.3. Matriz de consistencia.

La tabla 4 nos permite evaluar el grado de coherencia y conexión lógica entre el título problema, objetivos, hipótesis y la metodología de investigación, esta matriz es un instrumento de gran utilidad para este trabajo de investigación.

Tabla 4. Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Metodología
General			
¿En qué medida la optimización del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos de una compañía minea influye en el cumplimiento de los LMP?	Determinar la importancia de la optimización del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos de una compañía minera para cumplir los límites máximos permisibles.	La optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos de una compañía minera permite el cumplimiento de los límites máximos permisibles del vertimiento	Tipo: Aplicada Diseño: Experimental Enfoque: Cuantitativo Población: Los efluentes ácidos provenientes de una compañía minera Muestra: El efluente tratado (vertimiento)
ESPECÍFICOS			
¿Cuáles son las condiciones operativas del Sistema de tratamiento de los efluentes ácidos?	Determinar las condiciones operativas del Sistema de tratamiento de los efluentes ácidos	Las condiciones operativas del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos influyen en el cumplimiento de los	

		LMP	
¿Cuáles son los controles de calidad para el vertimiento de la Unidad Minera para cumplir los LMP?	Establecer controles de calidad para el vertimiento de la Unidad Minera para cumplir los LMP.	Los controles de calidad del vertimiento de la Unidad Minera influyen en el cumplimiento de los LMP.	

Fuente: Elaboración propia

3.3. VARIABLES.

3.3.1. Variable independiente.

Sistema de tratamiento de efluentes ácidos.

3.3.2. Variable dependiente.

Límites Máximos Permisibles.

3.3.3. Matriz de operacionalización de variables.

En la tabla 5 se muestra la identificación de los instrumentos y/o procedimientos a utilizar en variable dependiente e independiente durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Tabla 5. Matriz de operacionalización de variables.

Variables	Dimensión o Categoría	Indicador	Instrumentos y/o Procedimientos
Sistema de tratamiento de efluentes ácidos de una compañía minera	Identificación. Destino. Manejo ambiental	El sistema de tratamiento de efluentes ácidos funciona adecuadamente	Check list de Operación Registro de control de operaciones Registro de verificación de potenciómetros Check list de equipos

LMP	Legitimidad	Los LMP de acuerdo con la norma exceden su concentración antes de la optimización	Registro histórico de análisis fisicoquímico del vertimiento.
	Legitimidad	Los LMP de acuerdo con la norma están controlados en su concentración después de la optimización	Análisis fisicoquímico del efluente tratado
	Afectación	Las zonas de estudio evidencian contaminación o daño ambiental	Análisis fisicoquímico del agua del río Escalera antes y después del vertimiento. Registro histórico de contaminación por la descarga del efluente.

Fuente: Elaboración propia

3.4. UNIDAD DE ANÁLISIS

Refiere el sistema de tratamiento de efluentes ácidos de una Unidad Minera para el cumplimiento de los LMP.

3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.5.1. Población

Los efluentes ácidos provenientes de una Unidad Minera que ingresa al sistema de tratamiento de efluentes ácidos.

3.5.2. Muestra

La muestra está representada por el efluente tratado, monitoreado en el punto autorizado.

Se toma una muestra en un balde de 5 L del cual se saca 1 L para el análisis de metales totales, 1L para aceites y grasas y 500 ml para el análisis de sólidos suspendidos totales. El muestreo se realizó desde el mes de

noviembre del 2020 hasta agosto del 2022 por el laboratorio interno de la unidad minera con una frecuencia diaria y por un laboratorio acreditado, cada 15 días

3.5.3. Muestreo

La selección de la muestra es probabilística (aleatorio simple), se trata del análisis del componente de acuerdo con los criterios establecidos.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

3.6.1. Técnicas

- ✓ Análisis Documental.
- ✓ Observación.

3.6.2. Instrumentos de la investigación

- ✓ Caracterización del efluente ácido
- ✓ Registro de control de operaciones
- ✓ Registro de verificación de potenciómetros.
- ✓ Check List de operación.
- ✓ Check List de equipos.
- ✓ Registro histórico de análisis fisicoquímico del vertimiento.
- ✓ Análisis fisicoquímico del efluente tratado.
- ✓ Análisis fisicoquímico del agua del rio Escalera antes y después del vertimiento.

3.7. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El análisis de la información que consiste en el proceso de evaluación de la neutralización y sedimentación en la PTAM se describe a continuación.

3.7.1. Descripción del Tratamiento de aguas en la Planta de tratamiento de agua de mina

La PTAM trata las aguas provenientes de las instalaciones mineras y está compuesta por los siguientes procesos:

- ✓ Recepción de aguas.
- ✓ Adición de reactivos.
- ✓ Cámaras de floculación
- ✓ Cámaras de clarificación
- ✓ Cámara de lodos
- ✓ Decantación y clarificación.
- ✓ Descarga del agua residual industrial tratada o efluente.
- ✓ Disposición de lodos.

A. Recepción de aguas

Las aguas procedentes de las diversas bocaminas, y el agua clarificada del depósito de relaves son derivados a la caja de recepción del área PTAM.

Tabla 6. Registro de caudales de ingreso a PTAM

Mes	Caudal	Caudal
	Total (L/S)	Total (m3/mes)
Enero 22	87.9	235502.1
Febrero 22	124.9	302337.5
Marzo 22	149.2	399683.1
Abril 22	140.1	363315.3
Mayo 22	122.7	328742.3

Fuente: Registro de la empresa

B. Adición de reactivos

La adición del hidróxido de calcio para estabilizar el pH de trabajo (9.0 a 9.5) se realiza en el cajón de recepción de la PTAM.

Una vez que el agua pasa por el cajón de recepción, se adiciona el floculante, mediante un sistema dispersor para que se distribuya uniformemente, el cual consta de una tubería metálica luego ingresa a las cámaras de floculación.

C. Cámaras de floculación

En este proceso se busca la formación de flóculos consistentes en peso, a mayor peso mayor será la velocidad de sedimentación y por lo tanto será mayor la eficiencia de la planta, la dirección del flujo es en zig-zag y del tipo de resalto hidráulico, por la presencia de tabiques de madera que hacen que se homogenice aún más la mezcla entre el agua a tratar y los reactivos que aceleran el proceso de sedimentación lo cual motiva la formación de los flóculos.

D. Cámaras de clarificación

El paso del agua de la zona de floculación a la zona de clarificación se realiza mediante un canal interno y mediante compuertas se controla el ingreso a cada unidad de clarificación, esto permite repartir el caudal de entrada en partes proporcionales.

El agua que ingresa a cada unidad de clarificación se distribuye en toda la cámara, para este fin se cuenta con un canal central de doble fondo, siendo éste el encargado de distribuir el caudal a cada una de las unidades de clarificación.

La zona de clarificación está conformada por pozas que en su interior están instaladas placas inclinadas y espaciadas en el plano horizontal.

El agua fluye en dirección vertical a través de las vinilonas donde los sólidos

quedan retenidos y se depositan al fondo de la poza, además de mermar la velocidad del agua, la dirección del agua es ascendente ya que ingresa por la parte inferior de los clarificadores y sube hacia las quenas de drenaje de agua clarificada, esto permite que los flóculos más finos aun contenidos en el agua por el peso descieran hacia el fondo del clarificador.

E. Cámaras de lodos

También se ha considerado una cámara de lodos que permite evacuar los lodos cuando se realiza su mantenimiento, estas cámaras (zona de floculación y clarificación), están comunicadas mediante compuertas con todo el sedimentador; desde cada una de estas cámaras se descargan los lodos sedimentados.

F. Descarga del agua residual industrial tratada o efluente

El agua tratada se descarga a un cajón metálico (50 m³) de recepción. El efluente es enviado hacia el proceso en planta concentradora y el excedente es bombeado con una bomba hidrostal de 100 HP por una tubería HDPE de 10" y descargado directamente a un cuerpo receptor, se cuenta con una segunda bomba de las mismas características a la anterior con su respectiva línea con la finalidad de tener mayor evacuación del agua excedente en caso se requiera. Asimismo, se cuenta con una tercera bomba Stand By cerrando de esa manera el círculo y teniendo aguas dentro de los parámetros exigidos.

G. Disposición de Lodos

Los sólidos generados en la PTAM, son evacuados a la poza de lodos, para luego ser bombeado al Depósito de relaves, mediante una tubería HDPE 6" impulsadas por la bomba WARMAN 4D-AHF.

3.7.2. Reactivos:

A. Hidróxido de calcio:

La principal función del hidróxido de calcio es regular el pH para ayudar en la depresión de contaminantes, para ello se realiza la preparación que es el resultado de la adición de cal (cal viva granulada, CaO) con mínimo 86% de pureza que mezclada con el agua se obtiene la lechada correspondiente.

Procedimiento de preparación hidróxido de calcio o lechada de cal al 2.0%

- ✓ Se estableció que el volumen útil de preparación es de 11381 L.
- ✓ El operador de PTAM adiciona 200 Kg de óxido de calcio.
- ✓ El operador realizará la adición de óxido de calcio, lentamente para evitar la propagación de polvo.
- ✓ El sistema se acondiciona por espacio de 1 hora como mínimo.
- ✓ Una vez preparada la solución esta se envía al tanque de almacenamiento de hidróxido de calcio, para la dosificación que se requiere.

Dosificación:

- ✓ La dosificación de hidróxido de calcio se encuentra bajo un rango de trabajo de acuerdo con el pH de ingreso, el rango de trabajo es de 9.0 – 9.5.

B. Floculante:

La floculación sirve para que los flóculos ganen peso y sedimenten por gravedad.

- ✓ Preparación de floculante al 0.06%.

- ✓ Se estableció que el volumen útil de preparación es de 10888 L.
- ✓ El operador de planta pesara 6 Kg de Floculante.
- ✓ El operador de planta realizara la adición de floculante, lentamente y hacia la corriente de agua.
- ✓ El sistema se acondiciona por espacio de una hora y media por lo menos.
- ✓ Una vez preparada la solución esta será enviada al tanque de almacenamiento para ser dosificada según el requerimiento.

3.7.3. Equipos utilizados para el control de pH

Para el control y seguimiento de la eficiencia del tratamiento de las aguas industriales, se realiza el monitoreo constante del pH, para lo cual se tiene potenciómetros estacionarios en la entrada y salida de la planta de tratamiento, a la vez se verifica estos equipos con potenciómetros portátiles calibrados, cabe mencionar que se tiene controles automáticos de dosificación con la instalación de bombas dosificadoras para la cal y el bisulfito.

3.7.4. Servicios auxiliares

Área de almacenamiento y preparación de óxido de calcio.



Foto 1: Almacén de lechada de cal

La zona de almacenamiento, preparación y dosificación de lechada de cal cuenta con las condiciones adecuadas con la implementación de los equipos necesarios para facilitar el trabajo de los operadores y evitar derrames de cal, se ha construido un ambiente totalmente adecuado con esta finalidad.

Almacenamiento

El área de almacenamiento tiene una capacidad de 30 tn , se recepciona los sacos de 1 tn de óxido de calcio, estos son trasladados con la ayuda de un monorriel y un tecele eléctrico de 2 tn de capacidad para ser apilado en el área que e corresponde.

Preparación

El área de preparación inicia con el traslado del big bag mediante el monorriel hacia una tolva de alimentación de una 1 tn de capacidad, para almacenar y alimentar cal mediante una compuerta, con la finalidad de alimentar cal hacia el tanque de preparación de 8' x 8', la solución es preparada con agitación constante en el tanque y será descargada por rebose hacia el tanque de dosificación de 6'x6'.

Dosificación

El rebose del tanque de preparación, la solución hidróxido de calcio es trasladada mediante una tubería de polietileno Ø 6' (5 metros) hacia el tanque de dosificación 6'x6', la solución de hidróxido de calcio mediante la bomba dosificadora Peristáltica ALH65, es bombeada hacia el cajón de recepción de la PTAM.

3.7.5. Sistema de emergencia

Las plantas de neutralización no pueden detener su operación a menos que cuenten con un sistema de almacenamiento de emergencia. Los tanques de la planta convencional tienen una capacidad de almacenamiento para atender paradas de 3 horas en caso de cortes de energía. La planta contará con un grupo electrógeno de 60 KW que permitirán su operación plena en caso de cortes de energía.

3.7.6. Reutilización del agua tratada

Del cajón metálico de 50 m³, el agua tratada es bombeado para:

- ✓ Planta concentradora para el procesamiento de minerales
- ✓ Limpieza de pisos planta
- ✓ Sellos de bomba de relaves
- ✓ Preparación de reactivos en la planta de tratamiento de aguas

Capítulo IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1.1. Estado del sistema de tratamiento antes de la optimización

Se realizó, una evaluación del sistema de tratamiento convencional en las instalaciones de la compañía minera en el mes de noviembre del año 2020 antes de la optimización. A continuación, se presentan las siguientes observaciones y las acciones correctivas propuestas.

A. Área de preparación de reactivos

Durante la inspección a la planta convencional, se identificó que no cuentan con un procedimiento adecuado para la preparación de reactivos, por ejemplo, no tienen una concentración estándar, por lo cual se plantearon las acciones correctivas para optimizar el área de preparación de reactivos (ver tabla 7) (ver anexo foto N°4 y 17).

Tabla 7. Identificación del estado de equipos en el área de preparación de reactivos

Actividad	Observación	Acción correctiva
Preparación del hidróxido de calcio	Para la preparación y distribución del hidróxido de calcio, solo se utiliza un tanque de 6x6.	Utilizar el tanque que se encuentra inoperativo para la preparación y acondicionamiento, el actual para almacenamiento y distribución
	Para medir la cantidad de óxido de calcio utilizan indistintamente una carretilla o un balde.	Estandarizar un recipiente patrón para la medición del óxido de calcio
	No se realiza el acondicionamiento mínimo de una hora de la lechada de cal.	Mejorar el procedimiento de preparación de hidróxido de calcio.
	No hay un control adecuado sobre la concentración de la lechada de cal, debido a la preparación aleatoria por parte del operador (de acuerdo con sus mediciones puntuales de pH con el papel panpeha).	Definir la concentración del hidróxido de calcio para el tratamiento.
Preparación de Metabisulfito de sodio	No cuentan con un recipiente patrón para la medición de la cantidad de metabisulfito a usar.	Estandarizar un recipiente patrón para la medición del metabisulfito de sodio.
	La cantidad de metabisulfito que usan para la preparación es diferente en cada guardia, ya que no tienen una concentración específica.	Establecer una concentración de trabajo.
Preparación de floculante	Para medir el floculante no cuentan con un recipiente patrón. Solo adicionan la cantidad que cada operario crea conveniente.	Estandarizar un recipiente patrón para la medición del floculante. Establecer una concentración de trabajo.

Fuente: Elaboración propia

B. Dosificación de reactivos

En esta área, se identificó la carencia de equipos para la dosificación de reactivos, el cual generaba un consumo excesivo. Así mismo no había una correcta distribución del floculante por ello se plantearon las siguientes acciones correctivas (ver tabla 8),(ver anexo, foto N°2, 3 y 16).

Tabla 8. Deficiencias en la dosificación de reactivos

Actividad	Observación	Acción correctiva
Dosificación de reactivos	La dosificación de reactivos se realiza mediante válvulas (manual), lo que significa que la dosificación no es constante.	Utilizar bombas dosificadoras
	La dosificación de reactivos solo se distribuye a un punto y por tanto no hay una buena homogenización.	
	La ubicación de los puntos de dosificación de floculante no es correcta, porque existe mucha turbulencia y los flóculos ya formados se rompen	Utilizar quenas dosificadoras para la correcta distribución del reactivo.
	No se evidencia el control y verificación de la dosificación de reactivos	Implementar un formato para el control y verificación de la dosificación.

Fuente: Elaboración propia

C. Control de parámetros

En la Tabla 9 se presenta el resultado de la identificación de las condiciones operacionales precarias en la planta convencional y las soluciones técnicas para optimizar el diseño y funcionamiento de la PTAM propuesto.

Tabla 9. Condiciones de operación y acciones de mejora en la planta convencional

Actividad	Observación	Acción correctiva
Control de PH	- Se utiliza el papel indicador panpeha para la medición de pH, El cual no es un método recomendable para el proceso ya que se debe cumplir con LMP. - Los potenciómetros estacionarios no están calibrados. - Durante la verificación de pH, se evidenció una diferencia significativa entre los resultados del potenciómetro de asuntos ambientales y laboratorio AGQ.	- Implementar un potenciómetro portátil calibrado para verificar los resultados de los potenciómetros estacionarios. - Implementar un registro de verificación diaria del potenciómetro portátil. - Implementar un cronograma de calibración interna de los potenciómetros estacionarios.

Actividad	Observación	Acción correctiva
Control de la medición del caudal	- La medición de caudal lo realizan en un punto del canal donde existe demasiada turbulencia. - No se cuenta con equipo para medir la velocidad del agua.	- Reubicar el punto de medición de caudal - Implementar un correntómetro para la medición de velocidad del agua.

Fuente: Elaboración propia

D. Pretratamiento

En esta zona se ha identificado principalmente la falta de orden y limpieza (ver tabla 10) (ver anexo, Foto N°5, 6, 7, 8, 9, 10, 11).

Tabla 10. Pretratamiento de aguas

Área	Observación	Acción correctiva
Poza de recepción de aguas	- Existen tuberías en desuso. - Las tuberías no están rotuladas.	- Retirar y evaluar la operatividad de las tuberías - Identificar y rotular tuberías
Zona de almacenamiento de reactivos	Se encuentra en mal estado	Mejorar las condiciones del almacén
Zona de Preparación de reactivos	- Falta de mantenimiento de tanques - Falta de identificación de los tanques - Derrame de cal en el suelo	- Pintar los tanques de preparación de reactivos. - Identificar los tanques según el reactivo que se prepara así mismo, la capacidad.
Pozas de Sedimentación	No cuenta con cronograma de limpieza.	Implementar un cronograma de limpieza.
Poza de Filtración	- Falta de mantenimiento de la poza de filtración. - Falta realizar orden y limpieza en los alrededores. - Existe tuberías en desorden por toda el área	- Realizar el mantenimiento de la poza de sedimentación (retirar el lodo, cambio de geomembrana) - Evaluar y Recuperar las tuberías inoperativas

Fuente: Elaboración propia

E. Planta convencional

Se presenta las no conformidades de la planta de tratamiento convencional

(PTC) y las medidas correctivas a considerar en la PTAM propuesta (ver anexo, Foto N°1,12).

Tabla 11. Identificación de deficiencias en la planta de tratamiento convencional y acciones correctivas a implementar

	Observación	Acción correctiva
Planta convencional	Se evidencia el techo de los tableros de control de la planta convencional en mal estado.	Reparar y/o cambiar el techo
Poza de contingencia	Falta mantenimiento a la poza de contingencia.	Realizar el mantenimiento de la poza de contingencia (retirar el lodo, cambio de geomembrana)
Poza de lodos	Falta mantenimiento a la poza de lodos.	Realizar el mantenimiento de la poza de lodos (retirar el lodo, cambio de geomembrana)

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Registro histórico de excedencias en el agua tratada emitido por laboratorios acreditados.

Durante la supervisión de OEFA en el año 2020 y 2021 identificaron excedencias de los LMP respecto a los parámetros de pH, As, Cu, Zn respectivamente. Así mismo los resultados emitidos por laboratorios acreditados también mostraron excedencias en algunos parámetros (ver tabla 11 y 12).

La Tabla 12 presenta los resultados obtenidos del tratamiento convencional aplicado por la compañía minera antes de la implementación del nuevo sistema propuesto en esta investigación. Se observa que varios parámetros fisicoquímicos del efluente superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM.

Entre los parámetros críticos destaca el pH, que alcanza valores de hasta 10.44, indicando una fuerte alcalinidad. Este comportamiento se debe, principalmente, a la dosificación manual de cal y la inexistencia de potenciómetros estacionarios. Asimismo, se observa la excedencia en metales totales como Cu, As y Zn, reflejando las deficiencias del sistema convencional en términos de eficiencia y cumplimiento ambiental.

Tabla 12. Excedencias del LMP respecto algunos parámetros en el efluente tratado de la compañía minera en estudio antes de la optimización.

Elementos	LMP	OEFA NOV.2 0	OEFA (28/05/2 1)	Cia. M (28/05/2 1)	28/07/2 1	10/09/2 1	28/09/2 1	29/10/2 1
pH	6-9	10.40		8.94	9.34	8.34	8.22	9.88
SST	50		6	6.8	14.5			8
A&G	20		0.59	0.84	0.25			0.6
Cromo VI	0.1				0.008			0.008
Cianuro total	1		0.0571	0.0628	0.0186			0.0008
Arsénico total	0.1		1.5367	1.5561	0.1820 8	0.0754 4	0.4757	0.1124 9
Cadmio total	0.05		0.02577	0.02605	0.0153 9	0.0086 2	0.0184 1	0.0025 4
Cobre total	0.5	2.194	0.512	0.5415	0.0467	0.0836	0.0698	0.0219
Mercurio total	0.00 2		0.00007	0.00007	0.0000 7	0.0000 7	0.0000 7	0.0000 7
Plomo total	0.2		0.00421	0.0074	0.0130 4	0.0555	0.1223 1	0.0066 5
Zinc total	1.5		2.91	3.88	1.44	1.87	2.51	0.674
Fe disuelto	2		0.03	0.03	0.03	0.11	0.91	0.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Excedencias del LMP respecto al pH y Cobre Total del efluente tratado de la compañía minera en estudio antes de la optimización emitido por OEFA.

Resultados de ensayo de campo							
1. Resultados							
N.º	Punto de control o muestreo	Fecha	Hora	Temperatura (°C)	pH (Unidad de pH)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	Caudal (m³/día)
1	V-01	2018-11-20	14:32	18,3	10,40	1957	N.D.

N.D.: No Determinado

Fuente: Informe de Mediciones de Campo N° 12-11-2018-OEFA/DSEM-CMIN⁴⁴

Resultados de ensayo de laboratorio

[illegible]

Fuente: Informe de Ensayo: 67942/2018⁴⁵.

Fuente: OEFA - RESOLUCIÓN 2020-OEFA/TFA-SE

4.1.3. Caracterización del efluente ácido a tratar

En la Tabla 14 se muestra los resultados del análisis químico correspondiente al efluente ácido que ingresa al sistema de tratamiento de aguas.

Tabla 14. Caracterización del efluente a tratar

Fecha	Caudal (L/S)	PH	SST	Análisis	Ppm	Ppm	Ppm	ppm	ppm	Ppm	Ppm
			mg/L		Pb	Cu	Zn	Fe	Mn	As	Cd
Nov-20	38.46	7.3	2503	MT	20.39	2.32	238.04	58.18	25.91	-	-
				MD	0.06	0.02	37.57	0.18	15.30	-	-

Fecha	Caudal (L/S)	PH	SST mg/L	Análisis	Ppm	Ppm	Ppm	ppm	ppm	Ppm	Ppm
					Pb	Cu	Zn	Fe	Mn	As	Cd
Dic-20	58.04	6.6 3	859	MT	8.49	3.11	102.19	40.32	17.54	-	-
				MD	0.09	0.55	56.81	0.90	12.43	-	-
Ene-21	105.6 6	4.0 4	1372	MT	12.8 1	10.0 6	198.64	143.55	19.16	-	-
				MD	0.68	4.51	127.65	6.88	13.49	-	-
Feb-21	92.84	5.6 2	2651	MT	25.0 2	14.0 9	243.77	234.24	24.42	-	-
				MD	0.17	1.83	126.66	7.08	15.97	-	-
Mar-21	92.93	4.4 7	2717	MT	15.5 6	12.1 9	244.03	179.66	21.84	-	-
				MD	0.72	4.05	140.13	15.18	14.83	-	-
Abr-21	116.4 0	4.3 8	5629	MT	29.3 8	19.3 0	273.65	379.92	27.87	-	-
				MD	0.86	4.99	180.57	14.87	21.16	-	-
May-21	67.00	5.2 8	277	MT	2.92	4.07	152.14	44.79	22.54	-	-
				MD	0.87	2.79	137.01	14.33	19.36	-	-
Jun-21	68.58	7.2 2	225	MT	0.69	1.28	62.50	22.36	10.33	-	-
				MD	0.08	0.16	35.98	0.80	6.29	-	-
Jul-21	74.88	7.2 8	183	MT	0.45	0.95	47.14	18.74	8.99	-	-
				MD	0.09	0.11	31.89	0.86	5.19	-	-
Ago-21	56.93	7.0 3	210	MT	0.73	1.26	63.94	32.29	12.53	-	-
				MD	0.07	0.13	39.86	1.19	8.27	-	-
Set-21	58.21	6.7 2	241	MT	0.92	1.25	88.94	32.39	17.37	-	-
				MD	0.08	0.21	69.22	3.04	14.06	-	-
Oct-21	61.27	6.7 2	186	MT	0.72	1.45	79.60	40.15	14.72	-	-
				MD	0.14	0.64	55.06	7.47	8.93	-	-
Nov-21	74.01	7.1 1	226	MT	1.03	1.66	67.24	24.71	12.59	-	0.32
				MD	0.07	0.22	40.65	0.33	8.09	-	0.26
Dic-21	93.26	5.6 2	166	MT	0.60	5.52	110.53	41.57	17.04	-	0.76
				MD	0.20	2.74	94.19	8.10	12.92	-	0.67

Fuente: Elaboración propia

MT metales totales

MD metales disueltos

4.1.4. Elección de floculante y determinación de la dosis optima de floculante

En el mes de enero del 2021, se realizó la toma de una muestra de 16L del efluente acido sin la adición de ningún reactivo para realizar las pruebas de sedimentación y elegir el floculante adecuado para este tipo de agua. Los ensayos se realizó en el laboratorio de la unidad minera.

Los floculantes utilizados

- ✓ ISIPFloc
- ✓ ZETAG 4120
- ✓ MAGNAFLOC
- ✓ MT 4302
- ✓ MT 6506

4.1.4.1. Preparación de floculantes

Los floculantes empleados se prepararon de la siguiente manera:

- Se prepararon soluciones de floculante al 0.01% de concentración.
- Se agitó vigorosamente con pastillas magnéticas en una plancha de agitación hasta garantizar la disolución total de los productos.

4.1.4.2. Determinación de dosificación

Se estableció la dosificación estándar de 0.21 ppm, lo que equivale a 2.1 ml/L agua. Se añadió hidróxido de calcio a la muestra para elevar el pH a 9.30

Para la elección del floculante se consideró: la adecuada formación de

flóculos, la rapidez de sedimentación, la claridad en el efluente, y la persistencia en los flóculos.

4.1.4.3. Pruebas en equipo Jar Test

También se corrieron pruebas en el equipo Jar Test para observar el comportamiento de la pulpa con agitación mecánica constante de paletas.

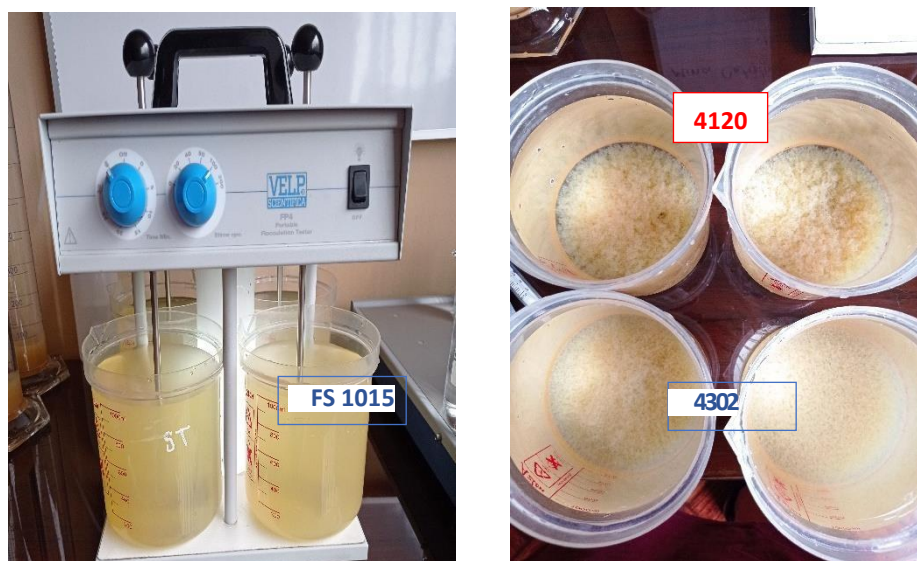


Foto 2: Equipo Jar Test.

4.1.4.4. Pruebas de velocidad de sedimentación

- ✓ Se colocaron las muestras en probetas graduadas de 1 litro c/u sin adición de reactivos
- ✓ Se agitaron 4 veces para homogenizar la pulpa contenida.
- ✓ Se agregó el floculante en cada probeta a la dosificación establecida.
- ✓ Se agitó la pulpa 4 veces más y se dejó sedimentar en forma libre.

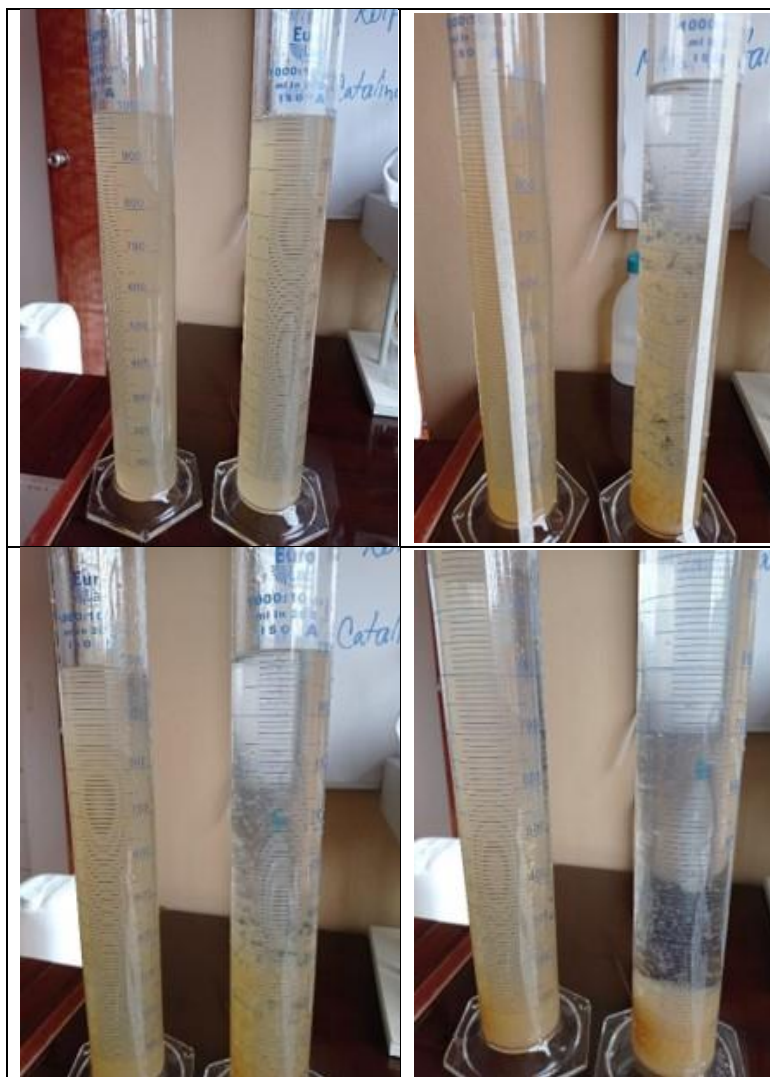


Foto 3: Evidencias de pruebas de sedimentación (4120 – FS 1015)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Control de probetas para prueba

Número de probeta	1	2
Reactivo aplicado	4120	FS1015
	<i>Zetag</i>	ISIPFloc
Dosificación: cc/lit	2.1	2.1
Concentración: %	0.01	0.01
Velocidad: # orden	1ero	2do

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Sistema de tratamiento después de la optimización

4. Construcción de la planta de tratamiento de agua de mina (PTAM)



Foto 4: Detalle del ingreso de efluentes



Foto 5: Detalle de la preparación de la Planta



Foto 6: Detalle de la Planta terminada

La planta de tratamiento de agua de mina (PTAM), se encuentra ubicada en la región de Huancavelica, a una altitud de 4500 msnm.

La Unidad Minera cuenta con un plan de manejo de aguas que consiste en captar todas las aguas provenientes de las bocaminas, de la planta concentradora, pozas de filtraciones, pozas de subdrenajes, aguas de contacto y del depósito de relaves para su respectivo tratamiento mediante proceso de neutralización, y floculación con una capacidad máxima de 150

L/s.

El agua ya tratada se va a utilizar para el procesamiento de minerales en planta concentradora, limpieza de planta, preparación de reactivos y sellos de bombas de relave y solo el excedente es vertido directamente a un cuerpo receptor, previo cumplimiento de los LMP.

Para la evacuación de los lodos tanto de las cámaras de floculación, clarificación como los tanques decantadores y tanques clarificadores, se cuenta con una poza de lodos, desde ese punto se bombea al depósito de relaves.

En el caso de alguna emergencia se cuenta con un grupo electrógeno.

4.1.6. Resultados del efluente tratado después de la optimización

En la tabla 16 y 17 se muestra los resultados de los análisis fisicoquímicos del efluente tratado durante 9 meses después de la optimización de la planta, en el cual se muestra que todos los parámetros están por debajo de los LMP.

Tabla 16. Resultados del efluente tratado después de la optimización emitido por un laboratorio acreditado.

	LMP	01.dic.21	18.ene.22	01.feb.22	05.mar.22	12.abr.22	03.may.22	21.jun.22	21.jul.22	16.ago.22
pH	6-9	8.45	8.58	8.52	8.34	8.45	8.39	8.36	8.47	8.26
Turbidez							6.25		3.9	
Caudal		68					141.87		155.17	
SST	50	7	22	31.6			3		8	
A&G	20	0.62					0.4		<0.4	
Cromo VI	0.1	0.008			<0.008		0.005		<0.005	
Cianuro total	1	0.0008			0.0008		0.0008			
Arsénico total	0.1	0.03045	0.0252	0.06427	0.01364	0.0304	0.03826	0.0496	0.05393	0.0661
Cadmio total	0.05	0.02998	0.00689	0.04345	0.00257	0.03337	0.00672	0.00142	0.00667	0.002
Cobalto Total		0.02238	0.00701	0.00539	0.0007	0.01342	0.00679	0.02866	0.01406	0.00384
Cobre total	0.5	0.122	0.0122	0.2113	0.0102	0.4135	0.02243	0.0645	0.00871	0.00326
Mercurio total	0.002	0.00007	0.00011	0.00007	0.00007	0.00007	0.0004	0.00009	0.00009	0.00009
Plomo total	0.2	0.00648	0.00282	0.09943	0.01054	0.01442	0.0047	0.0155	0.0112	0.0025
Selenio Total		0.00217	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.0013	0.0056	0.002	0.0032
Zinc total	1.5	0.66	0.813	0.96	0.215	1.03	0.4491	0.2102	1.2686	0.2511

Fe disuelto	2	0.03	0.33	1.2	0.03	0.03	0.0013	0.0037	0.0178	0.0073
Zinc Disuelto		2.05	0.809	5.89	0.158	0.302	0.1219	0.0647	1.0301	0.1544

Fuente: Resultados emitidos por el laboratorio AGQ

Tabla 17. Resultados del efluente tratado después de la optimización emitido por el laboratorio de la compañía en estudio.

Mes	Caudal	pH		TSS		Análisis	Pb		Cu		Zn		Fe		Cd	
	L/s	LMP	Unid	LMP	mg/L		LMP	mg/L	LMP	mg/L	LMP	mg/L	LMP	mg/L	LMP	mg/L
Ene-22	71.75	>6;<9	8.61	50	43	MT	0.2	0.08	0.50	0.21	1.50	1.09	N.A.	0.82	0.05	0.01
						MD		0.05		0.03		0.55	2.00	0.09		0.01
Feb-22	--	>6;<9	8.56	50	21	MT	0.2	0.06	0.50	0.20	1.50	0.76	N.A.	0.56	0.05	0.02
						MD		0.04		0.11		0.62	2.00	0.04		0.01
Mar-22	--	>6;<9	8.64	50	16	MT	0.2	0.06	0.50	0.11	1.50	0.86	N.A.	0.33	0.05	0.01
						MD		0.03		0.06		0.33	2.00	0.04		0.01
Abr-22	120.85	>6;<9	8.75	50	18	MT	0.2	0.04	0.50	0.22	1.50	0.92	N.A.	0.39	0.05	0.01
						MD		0.02		0.12		0.23	2.00	0.05		0.00
May-22	100.13	>6;<9	8.58	50	14	MT	0.2	0.05	0.50	0.30	1.50	0.41	N.A.	0.07	0.05	0.01
						MD		0.04		0.21		0.18	2.00	0.03		0.00
Jun-22	--	>6;<9	8.70	50	12	MT	0.2	0.03	0.50	0.33	1.50	0.32	N.A.	0.10	0.05	0.01
						MD		0.01		0.28		0.15	2.00	0.03		0.01
Jul-22	96.64	>6;<9	8.36	50	10	MT	0.2	0.04	0.50	0.08	1.50	0.65	N.A.	0.11	0.05	0.01
						MD		0.02		0.06		0.44	2.00	0.04		0.00

Fuente: Registro de la Unidad Minera

Gráfico 1. Variación del pH del efluente tratado antes y después de la optimización del sistema de tratamiento de agua ácida.

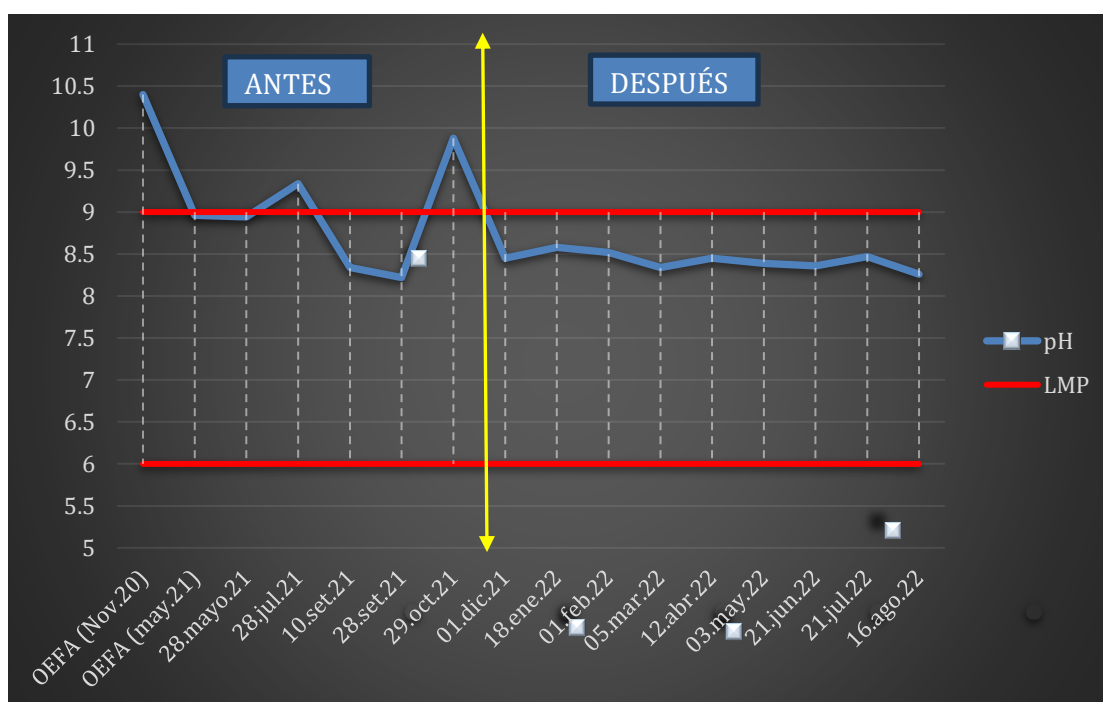


Gráfico 2. Variación de Cobre total del efluente tratado antes y después de la optimización del sistema de tratamiento de agua acida.

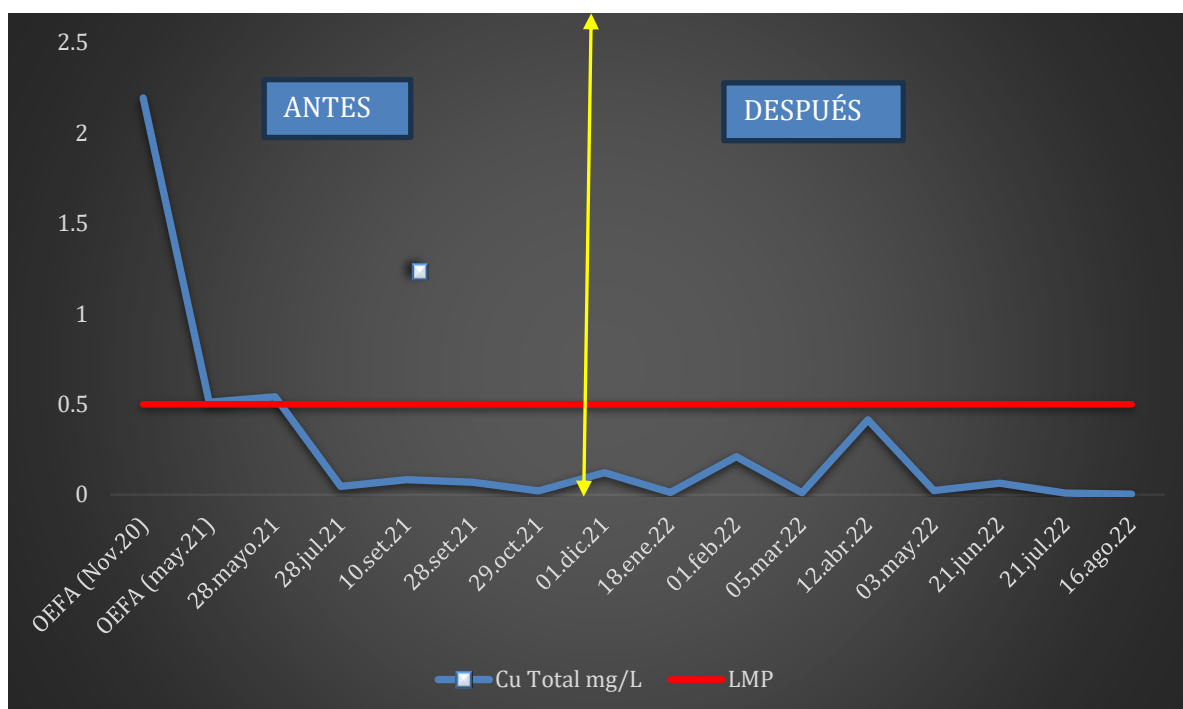


Gráfico 3. Variación de Zinc total del efluente tratado antes y después de la optimización del sistema de tratamiento de agua acida.

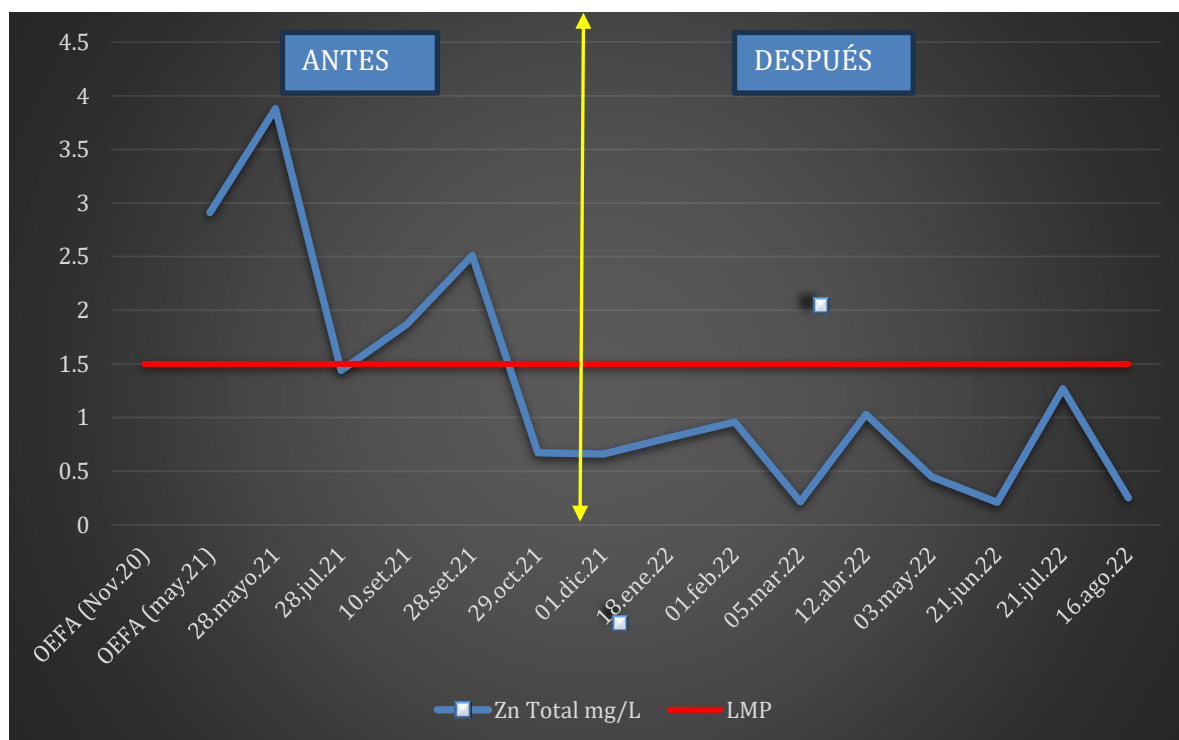
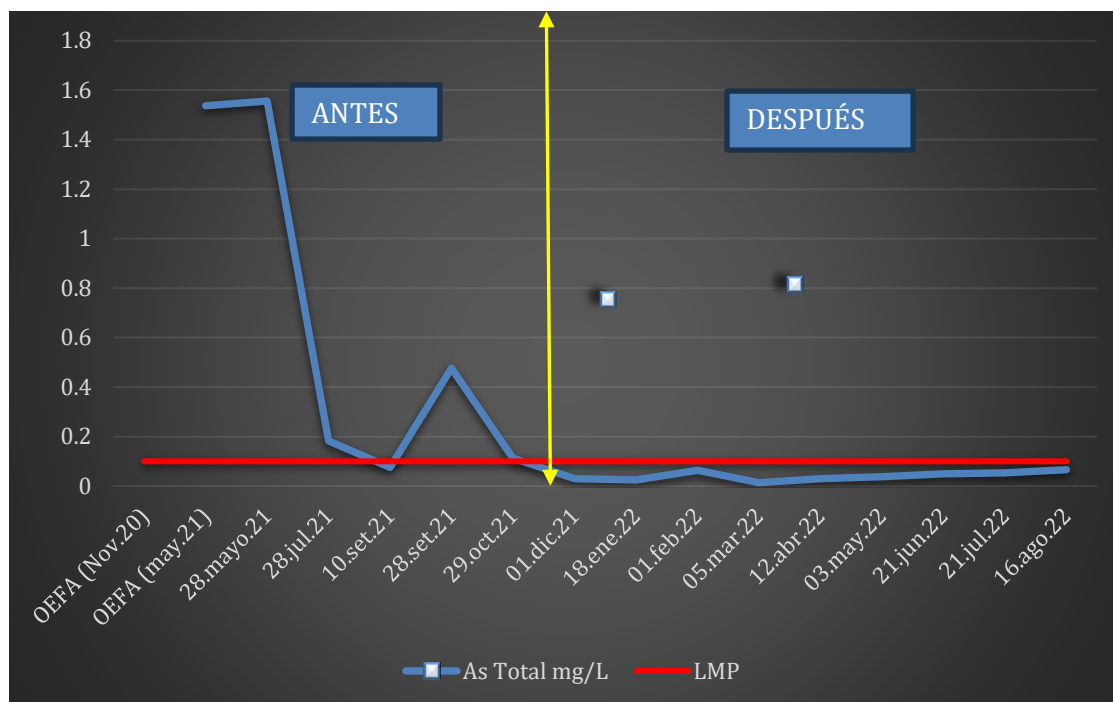


Gráfico 4. Variación de arsénico total del efluente tratado antes y después de la optimización del sistema de tratamiento de agua ácida.



4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De la tabla 6 hasta la 10 se muestra las condiciones operacionales precarias de la planta convencional y las soluciones técnicas para optimizar el diseño y funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas ácidas de mina (PTAM) propuesto. Asimismo, en la Tabla 11 se muestran las excedencias en pH, As, Cu, Zn y otros en el vertimiento del efluente minero. Esto se evidencia en los resultados del programa de monitoreo de la compañía minera y en las actas de supervisión de la Autoridad Supervisora (OEFA) correspondientes a las supervisiones de los años 2020 y 2021; aspecto que hace urgente la implementación de otra planta de tratamiento de efluente en la Unidad Minera. Cuando se completa el proceso de optimización del sistema de tratamiento del agua de mina, en la tabla 16 y 17 se puede observar que no existe excedencias respecto a los LMP. Así, el método ideal para este tipo de

efluente de acuerdo las pruebas realizadas, es el método activo que consiste en neutralizar los efluentes ácidos donde se concuerda con las investigaciones de Patiño (2022) y Guillen (2020). Los reactivos que se usa en la PTAM es el hidróxido de calcio porque en las pruebas de sedimentación resultó ser más eficaz y más económico que el hidróxido de sodio. Asimismo los sólidos generados son partículas más pesadas lo que conlleva un menor tiempo de sedimentación y obteniendo una remoción de metales >99% lo que difiere en el uso de agente neutralizante con Aponte (2020), pero se concuerda que se necesita elevar el pH del efluente a 9.5 para que el manganeso precipite.

En su investigación Puente (2019) menciona que a un pH de 8.2 y 8.6 precipitan todos los metales contenidos en el efluente ácido y cumple los LMP, pero en esta investigación y de acuerdo a la caracterización del efluente ácido de esta compañía minera fue necesario elevar el pH hasta 9.5 y la adición de un floculante al 0.06 % a para obtener la remoción de metales requerida. Como etapa final, se utilizó el metabisulfito de sodio para regular el pH y cumplir con los LMP vigentes para la descarga de efluentes minero-metalúrgicos.

En ese sentido, las mejoras introducidas en el proceso y en el sistema de tratamiento en la PTAM permite un mejor control ambiental en la gestión de las aguas de mina y promueve el desarrollo de proyectos mineros sostenibles.

4.3. COMPROBACIÓN DE RESULTADOS

Para este acápite, solo se emplearán predicamentos descriptivos, dada las circunstancias del estudio.

Hipótesis general.

La optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos en una compañía minera permite el cumplimiento de los límites máximos permisibles del vertimiento.

Comprobación

Las tablas 7 a la 11 nos muestran las mejoras en el sistema de tratamiento de efluentes ácidos, principalmente de carácter físico, con respecto a:

- a. La optimización de la preparación y acondicionamiento del hidróxido de calcio: para ello se ha construido una tolva de 1 tn y se ha instalado un tecele de 2 tn para la manipulación de los big bag de cal viva.
- b. Al metabisulfito de sodio: se estandariza el recipiente patrón y se mejora los niveles de concentración.
- c. La preparación final del floculante: se realiza pruebas de sedimentación con diferentes tipos de floculante para determinar el idóneo para este tratamiento, asimismo para determinar la concentración óptima y obtener resultados favorables.
- d. Bombas peristálticas: instaladas para la dosificación de reactivos. Además, se han instalado quenas dosificadoras en puntos claves para ayudar a la floculación.
- e. Potenciómetros estacionarios: instalados en la entrada y salida del sistema de tratamiento para controlar el pH. Los cuales tienen que ser calibrados y verificados por un potenciómetro portátil que también fue adquirido. Asimismo se ha implementado los registros de verificación de pH.

- f. La forma de medir el caudal de ingreso y salida: se ha mejorado con la reubicación del punto de medición y la adquisición de un correntómetro.
- g. Las tuberías en desuso: se han retirado y se han rotulado los tanques, tuberías, y tableros. También, se ha mejorado el almacenamiento de los reactivos.
- h. Cronograma de limpieza: Se ha definido el cronograma para la limpieza de las pozas de sedimentación, desarenadores y tanques de reactivos.
- i. Eliminación de la poza de filtración.
- j. Al mantenimiento general del sistema de tratamiento: Se ha implementado el mantenimiento considerando pintado, instalación de barandas, accesos, puntos de monitoreo.
- k. Construcción de una planta de tratamiento de agua de mina de 150 L/s.
- l. El lodo de la PTAM es bombeado directamente al depósito de relaves
- m. En la tabla 12 se aprecia las excedencias en algunos parámetros de los LMP antes del proceso de optimización y después del proceso de optimización.
- n. En la tabla 16 y 17 se aprecia que la concentración de metales se ha reducido notablemente y se encuentra por debajo de los LMP establecidos en el DS N° 010 – 2010 – MINAM.

Hipótesis específica 1.

Las condiciones operativas del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos influyen en el cumplimiento de los LMP

Comprobación.

Por lo indicado anteriormente el sistema de tratamiento ha sido mejorado, para este tipo de efluente. El floculante más eficiente en costo/beneficio es el ZETAG 4120 a una concentración de 0.06% y el hidróxido de sodio al 2% para llegar a un pH de trabajo de 9 a 9.5.

Hipótesis específica 2:

Los controles de calidad del vertimiento de la Unidad Minera influyen en el cumplimiento de los LMP

Comprobación.

El resultado que se aprecia en las tablas 16 y 17 son altamente favorables, gracias a los controles que se aplicaron como el monitoreo diario de los parámetros fisicoquímicos por el laboratorio interno de la unidad minera, el monitoreo mensual por un laboratorio acreditado y la verificación del pH a cada hora. Asimismo la calibración de los potenciómetros, son controles que nos permiten que el efluente tratado cumpla los LMP establecidos en la normativa ambiental vigente.

CONCLUSIONES

- La optimización del sistema de tratamiento de agua de mina permite descargar un efluente con una calidad óptima para ser descargado a un cuerpo receptor y que cumple con los LMP de referencia, por tanto, ayuda a la conservación de los ecosistemas acuáticos del entorno y en el caso del agua que se recircula, no afecta la recuperación en la planta concentradora.
- La implementación de mejoras operativas, técnicas y de infraestructura en el sistema de tratamiento de efluentes ácidos ha permitido optimizar significativamente su eficiencia y control. A partir de los resultados obtenidos (Tablas 7 a 11), se concluye que la realización de pruebas de sedimentación y floculación permitió establecer las dosificaciones óptimas de reactivos, mejorando la remoción de sólidos y metales. La incorporación de bombas peristálticas y potenciómetros tanto estacionarios como portátiles facilitó la automatización y el monitoreo continuo del proceso, especialmente del pH. Asimismo, la construcción de una nueva Planta de Tratamiento de Aguas Minero-Metalúrgicas (PTAM) y la mejora de las áreas de almacenamiento, preparación de reactivos y distribución contribuyeron a reforzar la estabilidad operativa del sistema y a garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente
- De acuerdo con los resultados iniciales presentados en la Tabla 12, se detectaron excedencias en los valores de pH y en las concentraciones de metales totales (Cu, As y Zn) respecto a los Límites Máximos Permisibles (LMP), según lo confirmado por OEFA y el laboratorio AGQ. Sin embargo,

tras la optimización del sistema de tratamiento, las Tablas 16 y 17 evidencian una reducción significativa de la carga metálica en el agua tratada, manteniéndose muy por debajo de los LMP establecidos en el Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM, lo que demuestra la eficacia del proceso implementado. Se establecieron controles de calidad más estrictos, entre los cuales destaca el monitoreo diario de parámetros fisicoquímicos por parte del laboratorio interno de la compañía minera, complementado con análisis mensuales realizados por un laboratorio externo acreditado, lo que asegura la verificación constante del desempeño del sistema. Asimismo, se instalaron potenciómetros estacionarios para el control del pH cada hora, permitiendo una supervisión continua de esta variable crítica y garantizando que el efluente cumpla con los Límites Máximos Permisibles (LMP) antes de su descarga a cuerpos receptores, conforme a la normativa ambiental vigente.

RECOMENDACIONES

- ✓ La planta está diseñada para una capacidad máxima de 150 L/s, evitar el tratamiento de mayor caudal para no afectar el tiempo de residencia y por tanto la calidad del agua tratada.
- ✓ Ejecutar un programa de mantenimiento preventivo y correctivo para todos los equipos involucrados en la operación de la planta de tratamiento de agua de mina, con el fin de asegurar su correcto funcionamiento y evitar interrupciones o fallas que puedan comprometer la eficiencia del proceso. Esta actividad debe ser coordinada de manera permanente con el área de mantenimiento de planta, siguiendo un cronograma establecido y respaldado por registros técnicos actualizados.
- ✓ Realizar la limpieza de la planta de tratamiento de agua de mina según el cronograma para evitar saturaciones que afecta a la calidad de agua.
- ✓ Realizar pruebas de tratamiento con coagulantes, con el objetivo de desestabilizar la materia coloidal presente en el efluente. Posteriormente, se debe aplicar floculante para favorecer la formación de flóculos con mayor densidad, lo cual facilitará su sedimentación. Esta estrategia permitiría reducir el tiempo de residencia en el sistema de tratamiento y, en consecuencia, aumentar la capacidad de procesamiento de aguas acidas.
- ✓ Realizar el monitoreo de control de calidad del agua en puntos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la descarga del efluente líquido minero-metalúrgico, con el fin de verificar el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, establecidos por la normativa vigente.

Este monitoreo permitirá evaluar el impacto del vertimiento en el cuerpo receptor y garantizar que no se estén generando alteraciones significativas en la calidad del recurso hídrico

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Instituto geológico y minero de España dirección de recursos minerales y Geoambiente. Madrid España
- Aponte, E. W. (2020) Neutralización y coagulación del efluente ácido de mina para la precipitación de metales totales en la compañía minera aurífera santa rosa s.a. Escuela de posgrado de la facultad de ingeniería metalúrgica y de materiales de la Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Bravo, A., Cano, I., Jofre, r., Gutiérrez, M., y Ramos, Y. (2017). Mass balances in a dam that receives mine drainage. *Procedia earth and planetary science*, (17) , 710 – 713.
- Cadorin, L., Carissimi, E., Rubio, J. (2007) avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas. Universidad federal do rio grande do sul (ufrgs) 80 laboratorio de tecnología mineral e ambiental (ltm) scientia et technica año xiii, no 36. Universidad tecnológica de pereira. Issn 0122-170. Colombia.
- Canales, H. O. (2007) mitigación de aguas ácidas provenientes de las minas subterráneas-caso huarón”. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica. Universidad Nacional mayor de Santos Marcos
- Castillo, R. (2021) la aplicación del hipoclorito de sodio (naclo) en la reducción de la concentración del Mn^{+2} para el mejoramiento de la calidad del agua del rio yauli. Escuela de posgrado. Doctorado en medio ambiente y desarrollo sostenible. Universidad inca garcilaso de la vega.
- Dr. Acosta A., J. A. (2022) regeneración y reutilización de aguas contaminadas mediante la aplicación de tratamientos físicos, químicos y biológicos de bajo coste y respetuosos con el medioambiente. Colombia - escuela internacional de doctorado. Universidad politécnica de cartagena
- Espinosa, M., Arteaga, E., Zambrano, R y González, I. (2010). Cinética de oxidación de la pirita, subproducto ácido del drenaje de la mina la guitarra. *Ingenierías*, vol. Xiii, no. 49, pag 63-69.
- Espinosa, M., Hidalgo, A., Delgado (2016). Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (hds), r1 universidad autónoma de yucatán-méxico
- Forigua, D., Fonseca, N. y Vásquez, Y. (2017). Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica. *Biotechnol. Vo. Xix no. 1*, 92-100
- Guillen (2020) vertimiento de efluentes mineros de mina marta en la contaminación de las aguas del rio tinyaclla. Unidad de posgrado. Facultad de ingeniería de

minas. Universidad nacional del centro del Perú, http://info.igme.es/sidpdf/113000/258/113258_0000001.pdf [links]

MINAM (2012) glosario de términos para la gestión ambiental peruana dirección general de políticas, normas e instrumentos de gestión ambiental.

Montoya, J. (2015). Identificación de drenajes ácidos de mina con sensores remotos (tesis de maestría). Universidad nacional de colombia, medellín, colombia.

Moreno, T. (2014). Enriquecimiento de comunidades sulfato reductoras degradadoras de acetato en condiciones ácidas (tesis de maestría). Instituto potosino de investigación científica y tecnológica, a, c, san luis potosí

Patiño T., J. C. (2022) sistema de tratamiento activo mediante neutralización con óxido de calcio en solución, para la remoción de concentraciones de hierro y aluminio del drenaje ácido de mina de la unidad minera arasi, ocuviri-puno, 2019. Unidad de posgrado de la facultad de ingeniería ambiental y de recursos naturales. Universidad nacional del callao.

Puente R., A. E. (2019) presenta una optimización del sistema de tratamiento y disposición sanitaria de aguas residuales industriales para vertimiento clase iii, provenientes de la boca mina del nivel 250 (ef 03) al río san José. Unidad de posgrado. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica. Universidad nacional mayor de San Marcos

Ruiz V., J. A. (2015), proceso hds en minera sipán para la optimización de remoción de manganeso en aguas de drenaje ácido- cajamarca, peru. Unidad de posgrado. Universidad de piura. Facultad de ingeniería

Salazar, J.P., Hernández, M.L y Arango, A.J. (s.f.). Alternativas de tratamientos de las aguas de los drenajes ácidos de minas: una revisión. Capítulo 19, pag 347-366

Sandra K., A. V. (2020) problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de yacimientos mineros en colombia universidad nacional abierta medellín, colombia 2020

Verdugo, C., Rodríguez G., (2003). Evaluación y optimización de los parámetros de operación de un sistema de tratamiento de agua residual industrial en la ciudad de tijuana baja california, México. Facultad de ciencias químicas e ingeniería. Universidad autónoma de baja california

Viana, R. (2018). Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental. U.d.c.a actualidad & divulgación científica, 21(2):617-637, recuperado desde <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1066>

- Andrea, J., & Cano, M. (2015). *Identificación de drenajes ácidos de mina con sensores remotos*.
- Balladares, E., Jerez, O., Parada, F., Baltierra, L., Hernández, C., Araneda, E., & Parra, V. (2018). Neutralization and co-precipitation of heavy metals by lime addition to effluent from acid plant in a copper smelter. *Minerals Engineering*, 122, 122–129. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2018.03.028>
- Cadorin, L., Carissimi, E., & Rubio, J. (2007). Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas. *Scientia et Technica, ISSN 0122-1701, Vol. 4, N°. 36, 2007, Págs. 849-854, 4(36), 849–854*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4799403&info=resumen&idoma=ENG>
- Carneiro Brandão Pereira, T., Batista dos Santos, K., Lautert-Dutra, W., de Souza Teodoro, L., de Almeida, V. O., Weiler, J., Homrich Schneider, I. A., & Reis Bogo, M. (2020). Acid mine drainage (AMD) treatment by neutralization: Evaluation of physical-chemical performance and ecotoxicological effects on zebrafish (*Danio rerio*) development. *Chemosphere*, 253, 126665. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126665>
- Dutta, M., Saikia, J., Taffarel, S. R., Waanders, F. B., de Medeiros, D., Cutruneo, C. M. N. L., Silva, L. F. O., & Saikia, B. K. (2017). Environmental assessment and nano-mineralogical characterization of coal, overburden and sediment from Indian coal mining acid drainage. *Geoscience Frontiers*, 8(6), 1285–1297. <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2016.11.014>
- Hou, Q., Fang, D., Wang, D., Liang, J., & Zhou, L. (2021). Integration of cascaded aeration and neutralization for the treatment of acid mine drainage: Insights into the formation of jarosite. *Hydrometallurgy*, 206, 105755. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2021.105755>
- Hu, X., Peng, M., Sheng, X., Shi, H., Zhang, J., Liu, J., Yang, L., Shao, P., Luo, X., Hong, M., & Liu, T. (2022). Continuous and effective treatment of heavy metal in acid mine drainage based on reducing barrier system: A case study in North China. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 8, 100152. <https://doi.org/10.1016/J.HAZADV.2022.100152>
- Lee, G., Han, J., Jang, M., & Kim, M. (2022). Long-term treatment of acid mine drainage by alkali diffusion ceramic reactor: Simultaneous metal removal mechanisms. *Chemosphere*, 298, 134186. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134186>
- Levio-Raiman, M., Briceño, G., Schalchli, H., Bornhardt, C., & Diez, M. C. (2021). Alternative treatment for metal ions removal from acid mine drainage using an organic biomixture as a low cost adsorbent. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101853. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101853>

- Masindi, V., Madzivire, G., & Tekere, M. (2018). Reclamation of water and the synthesis of gypsum and limestone from acid mine drainage treatment process using a combination of pre-treated magnesite nanosheets, lime, and CO₂ bubbling. *Water Resources and Industry*, 20, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/J.WRI.2018.07.001>
- Nguegang, B., Masindi, V., Msagati Makudali, T. A., & Tekere, M. (2022). Effective treatment of acid mine drainage using a combination of MgO-nanoparticles and a series of constructed wetlands planted with *Vetiveria zizanioides*: A hybrid and stepwise approach. *Journal of Environmental Management*, 310, 114751.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114751>
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the iron mountain superfund site, California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(7), 3455–3462.
<https://doi.org/10.1073/PNAS.96.7.3455/ASSET/A018C132-6259-4644-806A-33DA17D6AD2C/ASSETS/GRAPHIC/PQ0694484007.JPEG>
- Rodríguez, E., Hidalgo-Millán, & Delgado-Delgado. (2016). *Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS)*. 20(2).
- Sulonen, M. L. K., Baeza, J. A., Gabriel, D., & Guisasola, A. (2021). Optimisation of the operational parameters for a comprehensive bioelectrochemical treatment of acid mine drainage. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124944.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124944>
- Viana Ríos Ricardo. (2018). *Vista de Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental*.
<https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/1066/1523>
- Wibowo, Y. G., Sudibyo, Naswir, M., & Ramadan, B. S. (2022). Performance of a novel biochar-clamshell composite for real acid mine drainage treatment. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100993.
<https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2022.100993>

ANEXOS

MATRIZ DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Facultad de IGMMG

UNIDAD DE POSGRADO



Maestría de Gestión y Control de la Contaminación

Seminario de Tesis II

2023

Matriz de Instrumentos de Investigación

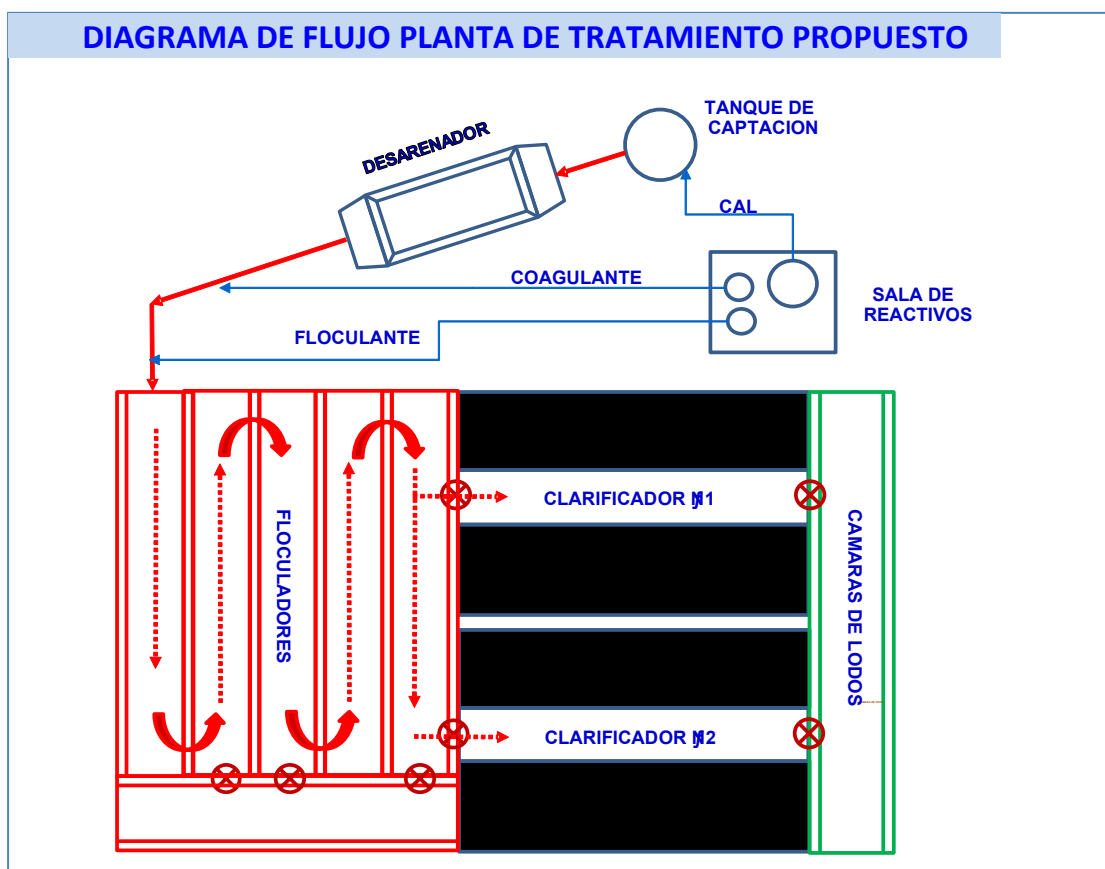
Apellidos y nombres: **Marlit Márquez Cerrón**

Título de la tesis: **Optimización del Sistema de Tratamiento de efluentes ácidos de una Unidad Minera para cumplir los Límites Máximos Permisibles, 2021**

Variable 1	Sistema de tratamiento de efluentes ácidos de una unidad minera		
Técnica	Instrumento	Finalidad	Tabulación
Observación	Caracterización del efluente ácido	Permitirá conocer los contaminantes presentes, el caudal y grado de acidez del efluente ácido.	Se procesan con frecuencia simple y se representan mediante polígono de frecuencia
Observación	Check list de Operación Registro de control de operaciones	Permitirá determinar aspectos sobre el cumplimiento de parámetros del sistema de tratamiento de agua.	Se procesan con frecuencia simple y se representan mediante barras verticales

	Registro de verificación de potenciómetros		
	Check list de equipos	Permitirá determinar el estado de los equipos para su correcto funcionamiento	Se procesan con frecuencia simple y se representan mediante barras verticales
Variable 2	Límites Máximos Permisibles		
Técnica	Instrumento	Finalidad	Tabulación
Análisis Documental	Registro histórico de análisis fisicoquímico del vertimiento.	Permitirá identificar los parámetros que están por encima de los LMP	Se procesan con frecuencia simple y se representan mediante polígono de frecuencia
Observación	Análisis fisicoquímico del efluente tratado	Nos permitirá determinar el cumplimiento de los LMP descritos en el Decreto Supremo N° 010-2010 –MINAM	
Observación	Análisis fisicoquímico del agua del rio Escalera antes y después del vertimiento.	Permitirá analizar si existe daño ambiental en la zona de estudio	
	Registro histórico de contaminación por la descarga del efluente.	Permitirá identificar los parámetros que están por encima de los LMP	

DIAGRAMA DE FLUJO PLANTA DE TRATAMIENTO AGUA DE MINA



VISTAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO ANTES DE LA OPTIMIZACIÓN



Foto N°1: Planta convencional – Pozas de neutralización



Foto N°2: Dosificación manual de hidróxido de calcio



Foto N°3: Dosificación manual de floculante



Foto N°4: Preparación de hidróxido de calcio



Foto N°5: Evidencia de tuberías en desuso



Foto N°6: Evidencia de falta de mantenimiento de la poza de filtraciones y orden y limpieza a sus alrededores.



Foto N°7: Evidencia de falta de barandas en las vías de accesos



Foto N°8: Evidencia de falta de barandas en las vías de accesos



Foto N°9: Tanque inoperativo (se usará para la preparación y acondicionamiento del hidróxido de calcio)



Foto N°10: Falta mantenimiento de los tanques de reactivos



Foto N°11: Almacén de reactivos



Foto N°12: Poza de lodos

VISTAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DESPUÉS DE LA OPTIMIZACIÓN



Foto N°13: Planta de tratamiento de agua de mina



Foto N°14: desarenador N° 2 de la Planta de tratamiento de agua de mina



Foto N°15: clarificadores de la PTAM



Foto N°16: bombas peristálticas para la dosificación de reactivos



Foto N°17: Tolva de una tn para la preparación de óxido de calcio