



POSGRADOS

MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

RPC-SO-17-NO.363-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

RECUPERACIÓN DE LA ALÚMINA MEDIANTE
PROCESOS DE ACIDIFICACIÓN DE LOS
LADOS RESIDUALES PROVENIENTES DEL
PROCESO DE SEDIMENTACIÓN EN LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE “MAHUARCAY” EN LA CIUDAD DE
AZOGUES.

AUTOR:

JOSÉ ADRIÁN BECERRA LITUMA

DIRECTOR:

RENATO GABRIEL SÁNCHEZ PROAÑO

CUENCA – ECUADOR

2024

Autor:**José Adrián Becerra Lituma**

Ingeniero Ambiental.

Candidato a Magíster en Recursos Naturales Renovables
por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

belipepe@hotmail.com

Dirigido por:**Renato Gabriel Sánchez Proaño**

Ingeniero ambiental.

Máster en Economía Ecológica.

Doctor en Salud Colectiva, Ambiental y Sociedad.

rsanchezp@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2024 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JOSÉ ADRIÁN BECERRA LITUMA

Recuperación de la alúmina mediante procesos de acidificación de los lodos residuales provenientes del proceso de sedimentación en la planta de tratamiento de agua potable “Mahuarca” en la ciudad de Azogues.

Dedicatoria:

Con inmensa gratitud y humildad, deseo dedicar esta tesis, en primer lugar, a Dios, cuyo amor y guía han sido mi faro y fortaleza en cada paso de este viaje académico.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi madre, cuyo amor incondicional y sacrificio han sido mi inspiración y mi sostén. Su dedicación y ejemplo me han motivado a seguir adelante, y su fe en mí me ha impulsado a alcanzar este logro.

Finalmente, dedico este trabajo a mi querido hijo, que con su ternura y alegría me ha llenado de fuerzas y me ha recordado la importancia de perseverar y luchar por nuestros sueños.

A todos ustedes, con amor y gratitud eternos.

Agradecimientos:

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, que me brindó el espacio y el apoyo necesarios para completar esta importante etapa de mi vida. Estoy profundamente agradecido al Ingeniero Renato Sánchez, mi tutor de tesis, por su invaluable orientación, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso.

Asimismo, extiendo mi gratitud a la Empresa Pública EMAPAL EP, que me acogió y facilitó el desarrollo de mi investigación. Agradezco especialmente al Ingeniero César Zhindon, quien me brindó su apoyo y conocimientos, permitiéndome llevar a cabo mi trabajo con éxito.

A todos ustedes, gracias por su confianza y apoyo, que han sido fundamentales para la culminación de esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	15
3.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
3.2. EL AGUA.....	17
3.2.1. AGUA CRUDA.....	17
3.2.2. MICROBIOLOGÍA DEL AGUA CRUDA.....	17
3.2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA CRUDA.....	18
3.3. AGUA POTABLE EN ECUADOR.....	18
3.3.1. REQUISITOS ESPECÍFICOS.....	19
3.3.2. SUSTANCIAS ORGÁNICAS.....	21
3.3.3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PESTICIDAS.....	22
3.3.4. NORMAS MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA POTABLE.....	22
3.3.5. POTABILIZACION DEL AGUA.....	23
3.3.6. PROCESOS DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....	23
3.3.7. CAPTACIÓN.....	23
3.3.8. PRE-SEDIMENTACIÓN.....	24
3.3.9. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN.....	24
3.3.10. PRECIPITACIÓN.....	24
3.3.11. FILTRACIÓN.....	24
3.3.12. DESINFECCIÓN.....	24
3.4. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.....	25
3.4.1. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN RÁPIDA.....	25
3.4.2. CLASIFICACIÓN DE PLANTAS DE FILTRACIÓN RÁPIDA.....	26
3.4.3. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN LENTA.....	26
3.5. PRODUCTOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN LAS PTAP.....	26
3.5.1. POLICLORURO DE ALUMINIO.....	26
3.5.2. SULFATO DE ALUMINIO.....	26
3.6. LODOS DE POTABILIZACIÓN.....	27

3.6.1.	CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS LODOS ALUMINOSOS	27
3.6.2.	RIESGOS ASOCIADOS CON LOS LODOS DE POTABILIZACIÓN.....	28
3.6.3.	APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS ALUMINOSOS	29
3.6.4.	EXTRACCIÓN DE LA ALÚMINA DE LOS LODOS	29
3.7.	ÁCIDO SULFÚRICO.....	30
3.7.1.	ACIDIFICACIÓN	30
3.7.2.	ACIDIFICACIÓN DE LODOS ALUMINOSOS	31
3.8.	TEST DE JARRAS.....	31
3.9.	SOLIDOS DISUELTOS	31
3.10.	SOLIDOS TOTALES.....	32
3.11.	SOLIDOS TOTALES VOLÁTILES.....	32
3.12.	PTAP DE MAHUARCAY.....	32
3.12.1.	MÓDULOS DE COAGULACIÓN.....	33
3.12.2.	UNIDADES DE FLOCULACIÓN.....	34
3.12.3.	SEDIMENTADORES	35
3.12.4.	SISTEMA DE FILTRADO	35
3.12.5.	SISTEMA DE DESINFECCIÓN.....	36
3.13.	MANEJO DE LOS LODOS EN LA PTAP MAHUARCAY.....	37
3.13.1.	PROPUESTAS PARA EL MANEJO DE LOS LODOS ALUMINOSOS	37
3.14.	MARCO LEGAL EN ECUADOR Y OTROS PAÍSES.....	39
4.	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	42
4.1.	TIPO DE ESTUDIO.....	42
4.1.1.	DESCRIPCIÓN DEL ESPACIO FÍSICO Y TEMPORAL.....	42
4.2.	ÁREA DE ESTUDIO	42
4.3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	42
4.4.	MUESTREO	43
4.5.	CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS.....	44
4.6.	ENSAYOS DE TRATABILIDAD.....	45
4.7.	VARIABLE PH.....	48
4.8.	TIEMPO DE AGITACIÓN	49
4.9.	COAGULANTE RECUPERADO	50
4.10.	EVALUACIÓN DEL COAGULANTE RECUPERADO.....	51

4.11.	ENSAYOS CON COAGULANTE RECUPERADO.....	52
4.12.	EVALUACIÓN DEL MATERIAL SEDIMENTABLE.....	52
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
5.1.	RESULTADOS FISICOQUÍMICOS DE LOS LODOS.....	55
5.1.1.	ALUMINIO.....	57
5.1.2.	PH EN LOS LODOS	58
5.1.3.	SOLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD).....	60
5.1.4.	PRESENCIA DE HIERRO EN EL LODO.....	61
5.1.5.	PRESENCIA DE COBRE EN EL LODO.....	62
5.1.6.	NITRITOS NO ₂	63
5.1.7.	NITRATOS NO ₃	64
5.1.8.	FOSFORO PO ₄	65
5.2.	ENSAYOS DE TRATABILIDAD.....	67
5.2.1.	DETERMINACIÓN DEL PH OPTIMO.....	67
5.3.	DISCUSIÓN.....	68
5.3.1.	TIEMPO DE MEZCLA.....	69
5.3.2.	CARACTERIZACIÓN DEL COAGULANTE RECUPERADO	72
5.3.3.	ENSAYOS CON EL COAGULANTE RECUPERADO.....	74
5.4.	DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE COAGULANTE RECUPERADO.....	75
5.4.1.	ANÁLISIS DEL SEDIMENTABLE.....	78
6.	CONCLUSIONES.....	80
7.	REFERENCIAS	82
8.	ANEXOS	85

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 : REQUISITOS ESPECÍFICOS DEL AGUA POTABLE.....	20
TABLA 2: LIMITE DE SUSTANCIAS ORGÁNICAS.....	21
TABLA 3: LÍMITE MÁXIMO DE PESTICIDAS.....	22
TABLA 4:REQUISITOS MICROBIOLÓGICOS.....	23
TABLA 5:CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS LODOS ALUMINOSOS.....	28
TABLA 6: ANÁLISIS LEGAL	39
TABLA 7: CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS LODOS ALUMINOSOS.....	44
TABLA 8: DOSIFICACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO POR MUESTRA.	49
TABLA 9: MODIFICACIÓN DEL TIEMPO DE MEZCLA Y PH EN ENSAYOS DE JARRAS.....	50
TABLA 10: CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PTAP DE MAHUARCAY.....	56
TABLA 11: CONCENTRACIONES DE ALUMINIO EN FUNCIÓN DEL PH Y EL TIEMPO DE MEZCLADO	69
TABLA 12: CARACTERIZACIÓN DEL SOBRENADANTE.....	72
TABLA 13: CARACTERÍSTICAS INICIALES DEL AGUA CRUDA	75
TABLA 14: RESULTADOS DEL TEST DE JARRAS.....	76
TABLA 15: ANÁLISIS DEL SEDIMENTABLE.....	78

ÍNDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1:PTAP MAHUARCAY.....	33
IMAGEN 2: MÓDULOS DE COAGULACIÓN	34
IMAGEN 3: FLOCULADORES.....	34
IMAGEN 4: SEDIMENTADORES.....	35
IMAGEN 5: SISTEMA DE FILTRACIÓN	36
IMAGEN 6: SISTEMA DE CLORACIÓN	36
IMAGEN 7: GENERACIÓN DE LODOS ALUMINOSOS.....	38
IMAGEN 8: RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	43
IMAGEN 9: MEDICIÓN DE MUESTRAS PREVIO ENSAYO.....	46
IMAGEN 10: ENSAYO DE JARRAS CON 1 LT. DE MUESTRAS	47
IMAGEN 11: AGITACIÓN CONSTANTE DE 100 RPM.....	48
IMAGEN 12: PHS. REGISTRADOS.	49
IMAGEN 13: MUESTRAS DEL SOBRENADANTE RECUPERADO.....	50
IMAGEN 14: COAGULANTE RECUPERADO MUESTRAS DE 100 ML.....	51
IMAGEN 15: FILTRADO DEL SEDIMENTABLE.....	53
IMAGEN 16: PESO DE MUESTRAS DEL SEDIMENTABLE.....	54
IMAGEN 17: GRAFICA DE LA CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO SEGÚN MUESTRAS.....	57
IMAGEN 18: VARIACIÓN DEL PH VS AL.....	58
IMAGEN 19: COMPORTAMIENTO DE LOS STD VS CONCENTRACIÓN DE AL...60	60
IMAGEN 20: CONCENTRACIONES DE AL Y FE EN LOS LODOS SEDIMENTABLES	62
IMAGEN 21: CONCENTRACIONES DE AL Y CU EN LOS LODOS SEDIMENTABLES.	63
IMAGEN 22: CONCENTRACIONES DE AL VS COMPORTAMIENTO DE NO ₂	64
IMAGEN 23: CONCENTRACIONES DE AL VS COMPORTAMIENTO DE NO ₃	65
IMAGEN 24: CONCENTRACIONES DE AL VS COMPORTAMIENTO DE PO ₄	66
IMAGEN 25: CONCENTRACIONES DE COAGULANTE RECUPERADO SEGÚN TIEMPO DE AGITACIÓN.....	70
IMAGEN 26: GRAFICA DE LA RECUPERACIÓN DEL COAGULANTE CON RELACIÓN AL PH Y TIEMPO DE MEZCLA.....	71
IMAGEN 27: PH DEL COAGULANTE RECUPERADO.....	73
IMAGEN 28: COLOR DE LOS SOBRENADANTES RECUPERADOS.....	74
IMAGEN 29: RESULTADO OPTIMO TURBIDEZ	75
IMAGEN 30: RESULTADO OPTIMO COLOR.....	76
IMAGEN 31: RESULTADO OPTIMO EN EL PARÁMETRO PH.....	78

RECUPERACIÓN DE LA ALÚMINA
MEDIANTE PROCESOS DE
ACIDIFICACIÓN DE LOS LODOS
RESIDUALES PROVENIENTES DEL
PROCESO DE SEDIMENTACIÓN EN LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
POTABLE “MAHUARCAY” EN LA
CIUDAD DE AZOGUES

AUTOR(ES):

JOSÉ ADRIÁN BECERRA LITUMA

RESUMEN

El aprovechamiento de residuos y la producción más limpia son estrategias clave para aumentar la eficiencia y reducir costos e impactos ambientales. La planta de tratamiento de agua "Mahuarca" de la EP-EMAPAL genera 196 ml de lodos residuales por litro de agua tratada, provenientes de procesos de coagulación-floculación, sedimentación y retro lavado de filtros, los cuales afectan negativamente al medioambiente al ser vertidos en cuerpos de agua cercanos. Este estudio proporciona información sobre la recuperación de la alúmina residual presente en los lodos generados, destacando la importancia de reutilizar la alúmina residual en los procesos de clarificación del agua.

La investigación se centra en la recuperación de alúmina mediante acidificación con ácido sulfúrico. Inicialmente, se realizaron análisis fisicoquímicos de los lodos para determinar su contenido de aluminio, hierro, fosfatos, cobre, nitritos, nitratos, sólidos totales disueltos y pH. En laboratorio, se evaluó la recuperación de sulfato de aluminio utilizando ácido sulfúrico al 98% y ensayos de tratabilidad con el coagulante recuperado en un equipo de Jar Test. Se variaron los parámetros de pH (1.5, 2.5 y 3.5) y tiempos de mezcla (5, 30 y 90 minutos) a una velocidad constante de 100 rpm. Los resultados mostraron que el pH óptimo es 1.5, alcanzando una recuperación del 95% en 30 minutos, mientras que a un pH de 2.5 se obtuvo un 75% de recuperación en el mismo tiempo. El pH de 3.5 y un tiempo de agitación de 90 minutos resultaron en la menor recuperación, con un 59%. El coagulante recuperado demostró tener una gran eficiencia los procesos primarios de potabilización del agua.

Palabras clave: Alúmina residual, acidificación del sulfato de aluminio, recuperación de floculantes de primera generación.

ABSTRACT

The utilization of waste and cleaner production are key strategies to increase efficiency and reduce costs and environmental impacts. The "Mahuarcay" water treatment plant of EP-EMAPAL generates 196 ml of residual sludge per liter of treated water, originating from coagulation-flocculation, sedimentation, and filter backwashing processes, which negatively affect the environment when discharged into nearby water bodies. This study provides information on the recovery of residual alumina present in the generated sludge, highlighting the importance of reusing aluminum sulfate in water clarification processes.

The research focuses on the recovery of alumina through acidification with sulfuric acid. Initially, physicochemical analyses of the sludge were conducted to determine its content of aluminum, iron, phosphates, copper, nitrites, nitrates, total dissolved solids, and pH. In the laboratory, the recovery of aluminum sulfate was evaluated using 98% sulfuric acid and treatability tests with the recovered coagulant in a Jar Test apparatus. The pH parameters (1.5, 2.5, and 3.5) and mixing times (5, 30, and 90 minutes) were varied at a constant speed of 100 rpm. The results showed that the optimal pH is 1.5, achieving a 95% recovery in 30 minutes, while at a pH of 2.5, a 75% recovery was obtained at the same time. The pH of 3.5 and a mixing time of 90 minutes resulted in the lowest recovery, at 59%. The recovered coagulant demonstrated great efficiency in the primary water purification processes.

Keywords: Residual alumina, acidification of aluminum sulfate, recovery of first generation flocculants.

1. INTRODUCCIÓN

La Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) "Mahuarcay" fue la primera de su tipo construida en la ciudad de Azogues. Esta planta abastece diversos sectores urbanos y rurales, con una capacidad de tratamiento de agua cruda de 100 litros por segundo. En esta instalación convencional, se llevan a cabo todos los procesos necesarios para la adecuada potabilización del agua (Zhindon, 2011).

Los procesos iniciales que se dan en las instalaciones de la planta de tratamiento Mahuarcay (PTM) son: cribado, procesos de coagulación, floculación, seguido a estos procesos se encuentran los procesos secundarios que vienen dados por los procesos de: sedimentación, filtración y la aplicación de cloro residual en los tanques de almacenamiento para su posterior conducción y distribución a los diferentes sectores de la ciudad (Zhindon, 2011).

Tras la ejecución de los procedimientos mencionados, se generan varios tipos de desechos, entre ellos los lodos residuales, conocidos como lodos aluminosos. Estos lodos son el resultado del uso de sulfato de aluminio como coagulante en las etapas iniciales del tratamiento de agua potable (Calle, 2017).

Los lodos aluminosos, comúnmente referidos en el contexto de tratamientos de agua, son residuos generados a partir del uso de sulfato de aluminio como coagulante durante el proceso de potabilización del agua. Este coagulante ayuda a aglomerar y precipitar las partículas suspendidas en el agua, formando flóculos que son más fáciles de remover. Una vez que estas partículas se asientan, el resultado es un tipo de lodo rico en aluminio, conocido como lodo aluminoso (Calle, 2017).

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

La utilización de residuos y la implementación de prácticas de producción más limpia son estrategias esenciales para mejorar la eficiencia de los procesos, productos y servicios, reducir costos y minimizar el impacto ambiental. La planta de tratamiento de agua potable "Mahuarcay" de EP-EMAPAL genera 196 ml de lodos residuales por cada litro de agua tratada. Estos lodos se originan en los procesos de coagulación-floculación, sedimentación y retro lavado de filtros, y son descargados en los cauces del río Burgay o, alternativamente, en la quebrada de Mahuarcay, lo que resulta en un impacto ambiental negativo. La recuperación de sulfato de aluminio para su reutilización en los procesos primarios de clarificación del agua es de vital importancia, ya que permite reintroducir un material considerado desecho tóxico en la cadena productiva, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental.

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La ciudad de Azogues cuenta con tres Plantas Potabilizadoras de Agua, la planta con una mayor capacidad de producción, es la Planta Potabilizadora de Mahuarca con un promedio de 100 l/s, los lodos que se producen en los procesos de floculación, sedimentación y filtración son vertidos directamente a la quebrada de Mahuarca, estos lodos residuales cuentan con diferentes concentraciones de alúmina, la misma que mediante procesos de acidificación se la puede recuperar, para volverla a reingresar como materia prima en los procesos de clarificación del agua cruda; en la ciudad mencionada no existen investigaciones que estén enfocadas a la recuperación de la alúmina en ninguna de sus tres Plantas Potabilizadoras, convirtiéndose en un verdadero desafío el adecuado manejo de estos lodos residuales, En la actualidad la ciudad de Cuenca cuenta con Plantas Procesadoras de Agua Potable en la mayoría de sus parroquias rurales, el estudio citado se realizó en la Planta de Tratamiento de Agua Potable en la parroquia Baños ubicada en la Provincia del Azuay Cantón Cuenca. Inicialmente, el estudio involucró la caracterización de los lodos residuales para establecer sus condiciones basales. Se llevaron a cabo análisis que incluyeron la determinación del contenido de aluminio, hierro, fosfatos y sulfatos. Posteriormente, se efectuaron ensayos de tratabilidad utilizando ácido sulfúrico en un equipo de Jar Test, variando el pH a 1.5, 2.5 y 3.5, y los tiempos de mezcla a 5, 30 y 90 minutos a una velocidad constante de 100 rpm. Los resultados óptimos se obtuvieron a un pH de 1.5 y un tiempo de mezcla de 30 minutos, logrando una recuperación del 86% de aluminio y una reducción del 46% en el volumen de los lodos (Jácome, 2020).

El autor (Díaz, 2017), En su estudio realizado en la ciudad de Ambato titulado “Aprovechamiento del sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de tratamiento de agua “Casigana” de la EP- EMAPA-A para la clarificación de agua “ El sulfato de aluminio extraído presento características fisicoquímicas adecuadas para ser reutilizado en los procesos de clarificación de agua. En la ciudad de Guayaquil los autores (Castro & Reyes, 2022) en su estudio “RECUPERACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO A PARTIR DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA POTABILIZADORA HERMINIA CABELLO SÁNCHEZ”, destacaron el problema de la mala disposición final de estos lodos en la ciudad de Guayaquil. La cantidad de aluminio existente en los lodos fue de 32.31369 g Al/Kg lodos. El sulfato de aluminio recuperado tuvo una capacidad para reducir la turbidez del agua cruda entre el 53 y el 70 %.

La Universidad Nacional del Centro del PERÚ en su artículo titulado “Evaluación de la recuperación de aluminio en medio ácido de los lodos generados en una planta de tratamiento de agua potable” los resultados obtenidos brindaron porcentajes de recuperación de aluminio entre 75 y 99%, (Gamarra & Romero, 2019a).

En el artículo científico publicado por la revista Dialnet titulado “Recuperación De Sulfato De Aluminio A Partir De Lodos Generados En Plantas De Potabilización De Agua”. Se alcanzaron porcentajes de recuperación de aluminio entre 18 y 64% (Villegas et al., 2018). En el artículo científico “Tratamiento De Lodos Generados En El Proceso Convencional De Potabilización De Agua” publicado por la revista de ingenierías de la ciudad de Medellín, se logró recuperar el 60-70%. La sedimentabilidad presentó mejores condiciones técnicas para el tratamiento de los lodos ensayados (Gutiérrez et al., 2020). Existe infinidad de artículos que abordan el tema propuesto tanto en un ámbito nacional como internacional, pero no existe algún estudio que se lo haya realizado en la Ciudad de Azogues o en alguna de sus PTAP. Las plantas mencionadas manifiestan serios problemas en cuanto a la disposición final de sus lodos y los rubros generados por la compra del sulfato de aluminio generan grandes inconvenientes económicos.

3.2. EL AGUA

El agua (H₂O) es una molécula polar compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, cuyas propiedades la convierten en el solvente universal (Coral, 2021). Es esencial para la vida, jugando un papel crucial en los procesos biológicos, químicos y físicos (Carbajal & González, 2012). Además, su capacidad para existir en estados sólido, líquido y gaseoso, junto con su alta capacidad calorífica, la hace vital como regulador térmico para todos los organismos vivos (Gago & Chambergo, 2020; Díaz, 2017).

3.2.1. AGUA CRUDA

El "agua cruda" se refiere al agua en su estado natural, sin tratar, encontrada en ríos, lagos, embalses y aguas subterráneas. Contiene impurezas como microorganismos patógenos, minerales disueltos, sedimentos y otros contaminantes que requieren eliminación para hacerla segura para el consumo humano (Gavilanes, 2015), así como para usos agrícolas e industriales. Los tratamientos incluyen métodos físicos y químicos como filtración, desinfección (cloración o ozonización), sedimentación, coagulación y floculación para eliminar o reducir estos contaminantes (Jácome, 2020).

3.2.2. MICROBIOLOGÍA DEL AGUA CRUDA

La bacteriología del agua cruda viene dada por el análisis y estudio de los microorganismos que se encuentren presentes en el agua en su estado natural, antes de cualquier tratamiento de saneamiento del líquido. Los microorganismos que se encuentran en el agua cruda van desde, bacterias, virus, protozoos, algas y otros organismos microscópicos. La presencia de estos microorganismos conlleva un alto riesgo de enfermedades para el ser humano, así como para el medio ambiente.

El estudio de la microbiología del agua cruda es de vital importancia para el tratamiento y purificación del recurso. (Urgilés & Viñansaca, 2019).

Las características microbiológicas del agua cruda incluyen una variedad de microorganismos, muchos de estos pueden ser potencialmente patógenos para los seres humanos. Los microorganismos más comunes en el agua cruda son: Bacterias, Virus, Protozoos, Algas, Huevos y quistes de parásitos.

3.2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA CRUDA

Las características físicas del agua cruda varían según su fuente de origen, pero algunas características comunes incluyen:

- **Color y turbidez:** El agua cruda presenta diferentes tipos de tonalidades en cuanto a su color y turbidez, estos factores son de gran variabilidad dependiendo de la presencia de partículas suspendidas, como arcilla, sedimentos, materia orgánica y otros materiales (Agudelo & Aguilar, 2022).
- **Temperatura:** La temperatura del agua cruda varía según la estación del año, la ubicación geográfica y su fuente de origen. Cabe destacar que las aguas superficiales presentan temperaturas de mayor variabilidad que las aguas subterráneas (Gamarra & Romero, 2019).
- **pH:** El pH del agua cruda es un factor de suma importancia para su análisis, esta medida puede variar dependiendo de la composición química de la fuente de origen. Las aguas con características ácidas tienden a tener un pH por debajo de 7, mientras que las aguas de tipo alcalina constan de un pH por arriba de 7 (Gomezcoello & Quintuña, 2018).

Cabe destacar que las características físicas mencionadas pueden variar considerablemente según la fuente del agua cruda y su ubicación.

3.3. AGUA POTABLE EN ECUADOR

En Ecuador, la calidad del agua potable es regulada por la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), que define los parámetros y estándares a través de la Normativa Ecuatoriana Obligatoria (NEO) para agua de consumo humano.

Adicionalmente, el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) establece normativas para el control de agua potable con las siguientes normativas:

- **NTE INEN 1108:** Esta norma especifica los requisitos de calidad para el agua potable, incluyendo parámetros microbiológicos, físicos y químicos.
- **NTE INEN 2776:** Norma que establece los métodos de muestreo y análisis del agua potable para asegurar que cumpla con los estándares de calidad.
- **NTE INEN 2366:** Regula los requisitos para los materiales y equipos utilizados en la producción y distribución de agua potable.
- **NTE INEN 2169:** Establece los criterios para el tratamiento de aguas residuales que serán reutilizadas como agua potable, asegurando que cumplan con los estándares de calidad establecidos.

Estas normativas garantizan que el agua potable en Ecuador cumpla con los estándares de calidad esenciales para el consumo humano seguro, incluyendo parámetros microbiológicos, fisicoquímicos, y orgánicos e inorgánicos.

3.3.1. REQUISITOS ESPECÍFICOS.

En nuestro país el agua potable debe cumplir los siguientes requisitos que a continuación detallamos en la tabla número 1:

Tabla 1 : Requisitos específicos del agua potable.

Fuente (Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108: 2006).

PARAMETRO	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE
Color	UC	15
Turbiedad	-	5
Olor	-	No objetable
Sabor	-	No objetable
pH	-	6.5 - 8.5
Solidos totales disueltos (STD)	mg/l	1000
Aluminio	mg/l	0.25
Amonio	mg/l	1.0
Antimonio	mg/l	0.005
Arsénico	mg/l	0.01
Bario	mg/l	0.7
Boro	mg/l	0.3
Cadmio	mg/l	0.003
Cianuros	mg/l	250
Cloro libre residual	mg/l	0.2
Cloruros	mg/l	1.0
Cobalto	mg/l	0.05
Cobre	mg/l	300
Cromo	mg/l	0.1
Dureza total CaCO ₃	mg/l	1.5
Estaño	mg/l	0.1
flúor	mg/l	1.5
Fosforo	mg/l	0.1
Hierro	mg/l	0.3
Litio	mg/l	0.2
Manganeso	mg/l	0.1
Mercurio	mg/l	0.0
Níquel	mg/l	0.02
Nitratos	mg/l	10
Nitritos	mg/l	0.0
Plata	mg/l	0.5
Plomo	mg/l	0.05
Potasio	mg/l	20
Selenio	mg/l	0.01
Sodio	mg/l	200
Sulfatos	mg/l	200
Vanadio	mg/l	0.1
Zinc	mg/l	3
Tensoactivos	mg/l	0.0
Fenoles	mg/l	0.0

3.3.2.

SUSTANCIAS ORGÁNICAS

La presencia de sustancias orgánicas en el agua potable en Ecuador varía según la fuente y el tratamiento aplicado, con una lista detallada en la tabla número 2 de la norma INEN 1108 (2006) (Sánchez, 2021).

Tabla 2: Limite de sustancias orgánicas.

Fuente (Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108: 2006).

Sustancias Orgánicas	
Alcanos Clorinados	Límite máximo µg/l
Tetracloruro de carbono	2
Diclorometano	20
1,2 dicloroetano	30
1,1,1 tricloroetano	2000
Etanos clorinados	
Cloruro de vinilo	5
1,1 dicloroetano	30
Tricloroetano	70
Tetracloroetano	40
Hidrocarburos Aromáticos	
Benceno	10
Tolueno	170
Xileno	500
Etilbenceno	200
Estireno	20
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)	
benzo pireno	0,01
benzo fluóratenos	0,03

3.3.3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PESTICIDAS

Los compuestos pueden ingresar al agua por escorrentía superficial desde campos agrícolas, lixiviación de suelos con pesticidas y uso de estos en zonas urbanas, con límites máximos permitidos detallados en la tabla número 3 (Sánchez, 2023).

Tabla 3: Límite máximo de pesticidas

Fuente (Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108: 2006)

Pesticida	Límite máximo $\mu\text{g/l}$
Isoproturon	9
Lindano	2
Metoxyclo	10
Pendimetalin	20
Pentaclorofenol	9
Permetrin	20
Propanil	20
Piridato	100
Simazina	2
Trifluralin	20
Herbicidas	90
Dicloroprop	100
Fenoprop	9

3.3.4. NORMAS MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA POTABLE

En Ecuador, la calidad microbiológica del agua potable se evalúa mediante parámetros como coliformes totales, Escherichia coli, Enterococos y Heterotróficos mesófilos, según la norma INEN 1108 (2006). Además, existen otros requisitos específicos detallados en la tabla número 4.

Tabla 4: Requisitos Microbiológicos

Fuente (Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108: 2006)

Prueba	Máximo Permisible
Coliformes totales (1) NMP/100ml	< 2*
Coliformes fecales NMP/100ml	< 2*
Cryptosporidium, # de quistes/100l	Ausencia
Giardia Lamblia, # de quistes/100l	Ausencia

3.3.5. POTABILIZACION DEL AGUA

Los procesos de potabilización transforman el agua cruda en potable, haciéndola segura para el consumo humano. Estos incluyen la eliminación de sólidos volátiles, uso de floculantes como sulfato de aluminio o policloruro de aluminio para precipitar impurezas, seguido de filtración y desinfección mediante cloración (Díaz, 2017).

3.3.6. PROCESOS DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA

La potabilización del agua implica que el agua cruda, que usualmente proviene de un río, captaciones o zonas de recargas hídricas, pase a través de varias etapas de tratamiento fisicoquímico. Estas etapas incluyen la captación, pre-sedimentación, floculación, precipitación, filtración y desinfección (Galarza & Barros, 2022).

3.3.7. CAPTACIÓN

Durante esta fase del procedimiento, se adquiere agua cruda procedente de dos fuentes distintas: aguas subterráneas o aguas superficiales.

Para su extracción y traslado a la planta de potabilización, se emplean bombas o diseñan sistemas de conducción desde la captación (por gravedad) hasta llegar a la entrada de la PTAP (Galarza & Barros, 2022).

3.3.8. PRE-SEDIMENTACIÓN

En esta etapa se produce el desarenado que tiene como objetivo eliminar las partículas de arena suspendidas en el agua para prevenir daños en las partes mecánicas de la planta. esta arena recolectada se elimina a través del proceso de lavado (Urgilés & Vintimilla, 2023).

3.3.9. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

La coagulación implica el proceso de desestabilización y aglutinación de partículas en suspensión coloidal, logrado mediante la adición de compuestos químicos o productos poliméricos como el PAC (Policloruro de Aluminio), que facilita la aglutinación de los sólidos en suspensión. Por otro lado, la floculación se refiere a la acumulación de estas partículas desestabilizadas, llamadas flóculos, que se depositan en el fondo de las unidades de floculación de las plantas potabilizadoras (Vallejo & Ullauri, 2022).

3.3.10. PRECIPITACIÓN

La precipitación en los procesos primarios del tratamiento del agua cruda radica en eliminar contaminantes disueltos en el agua. Este método incluye la adición de productos químicos que reaccionan con las impurezas, formando compuestos insolubles que sedimentan, es decir, se separan del agua formando sólidos (Castro & Reyes, 2022).

3.3.11. FILTRACIÓN

Este es un paso crucial del proceso que posibilita la eliminación de partículas que pudieron haber quedado después de las etapas anteriores. Se utilizan lechos filtrantes compuestos por capas de antracita, grava y arena (Jácome, 2020).

3.3.12. DESINFECCIÓN

En este proceso consiste en inyectar una solución de hipoclorito de sodio en cantidades que varían entre 0,6 y 0,8 mg/L de agua tratada. Esto elimina los microorganismos patógenos presentes y garantiza que el agua producida sea segura

para el consumo humano. El cloro residual resultante de este proceso previene la contaminación del agua en las líneas de distribución, desde la planta potabilizadora hasta las viviendas de los usuarios (Gamarra & Romero, 2019).

3.4. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

Las instalaciones encargadas de purificar el agua potable pueden ser divididas en dos categorías principales al principio: plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta (Fernández & Tuso, 2020).

3.4.1. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN RÁPIDA

Las plantas de filtración rápida son denominadas de esta forma debido a que los filtros funcionan a una velocidad entre 80 y 300 m³/m². d, lo que ocasiona que los filtros se saturen en aproximadamente 40 horas, dependiendo de las condiciones del agua sedimentada. Por esta razón, se instala un sistema de retrolavado de filtros. Este proceso de retrolavado dura entre 5 y 15 minutos y de esta forma la PTAP puede seguir funcionando (Castro & Reyes, 2022).

3.4.2. CLASIFICACIÓN DE PLANTAS DE FILTRACIÓN RÁPIDA

Según la tecnología empleada, se pueden categorizar en:

- Sistemas de tecnología convencional clásica.
- Sistemas convencionales de alta tasa.
- Sistemas de tecnología patentada.

3.4.3. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE FILTRACIÓN LENTA

Los filtros lentos funcionan a velocidades que varían entre 0,10 y 0,30 m/h. La filtración lenta imita el proceso natural de percolación del agua de lluvia a través de la capa superficial de la tierra (Castro & Reyes, 2022).

3.5. PRODUCTOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN LAS PTAP

Se emplean agentes coagulantes químicos como el policloruro de aluminio (PAC), sulfato de aluminio o cloruro férrico, junto con floculantes como poliacrilamidas y poliaminas. Aunque estos aumentan la claridad del agua tratada, su uso resulta costoso y está limitado a ciertos tipos de agua. El hipoclorito de sodio en solución se utiliza como agente desinfectante (Gamarra & Romero, 2019a).

3.5.1. POLICLORURO DE ALUMINIO

Este producto químico se emplea como coagulante inorgánico en el tratamiento tanto del agua cruda como de las aguas residuales con el fin de disminuir la turbidez y el color. Este coagulante no altera el pH del agua tratada. Además, se ha observado que puede reducir la concentración de fosfatos, metales pesados y virus en el agua tratada (Castro & Reyes, 2022).

3.5.2. SULFATO DE ALUMINIO

Este compuesto, conocido como alúmina con la fórmula química $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, es una sal de aluminio empleada como coagulante en el tratamiento del agua. Se

obtiene a partir de la reacción entre un mineral con contenido de aluminio, como el caolín o la bauxita, y ácido sulfúrico. El sulfato de aluminio facilita la formación de flóculos durante la potabilización del agua, pero al generar estas partículas, modifica el pH del agua, haciéndola más ácida (Pacheco & Santander, 2022).

3.6. LODOS DE POTABILIZACIÓN

Los residuos sólidos resultantes del proceso de purificación del agua cruda, conocidos como lodos, contienen impurezas y restos de productos químicos empleados en el tratamiento del agua. Estos lodos tienen una composición coloidal que incluye hidróxido de aluminio, lo que les confiere una textura gelatinosa. Se estima que alrededor del 39% de su peso está compuesto por aluminio (Basantes & García, 2020).

3.6.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS LODOS ALUMINOSOS

Las propiedades de estos lodos varían según el tipo de agua cruda tratada en el proceso, los compuestos químicos añadidos como: floculantes, coagulantes y agentes desinfectantes, conjuntamente los factores climáticos como las estaciones de estrés hídrico y lluviosa, afectan la turbidez del agua. Es decir que, durante la temporada de lluvias, la turbidez del agua cruda aumenta, mientras que en la temporada seca se produce una proliferación de algas. Los lodos de potabilización muestran una apariencia gelatinosa y tienen una consistencia viscosa, además de contener óxidos e hidróxidos metálicos, así como materia orgánica (microorganismos) e inorgánica como los son las arcillas y limos, las características generales de los lodos sedimentables se detallan en la tabla número 5 (Jácome, 2020).

Tabla 5: Características generales de los lodos aluminosos

Fuente (Gamarra & Romero, 2019)

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	6.5 - 8.0
Concentración de Aluminio (Al)	mg/L	50 - 200
Concentración de Hierro (Fe)	mg/L	10 - 50
Concentración de Fosfatos (PO ₄)	mg/L	5 - 15
Concentración de Sulfatos (SO ₄)	mg/L	100 - 300
Sólidos Totales	mg/L	500 - 1500
Materia Orgánica	%	5 - 10
Densidad	g/cm ³	1.05 - 1.10
Viscosidad	cP	10 - 20
Conductividad	μS/cm	500 - 1000

3.6.2. RIESGOS ASOCIADOS CON LOS LODOS DE POTABILIZACIÓN.

La verdadera peligrosidad de los lodos de potabilización no ha sido completamente determinada. Sin embargo, debido a cómo se desechan en la mayoría de los países, existe el riesgo de contaminación de las fuentes de agua con metales pesados como aluminio o hierro, los cuales están presentes en su composición. En la mayoría de los casos, estos lodos son liberados al medio ambiente sin tratamiento alguno. Esto puede resultar en la degradación de la calidad del agua superficial, limitando sus usos para actividades domésticas, agrícolas e industriales aguas abajo (López & Rivas, 2018).

En el acuerdo ministerial 097-A emitido por el Ministerio de Ambiente del Ecuador se prohíbe la descarga directa de efluentes a la naturaleza, ya sea en cuerpos de agua, alcantarillado o suelo. Sin embargo, los lodos de potabilización no son considerados efluentes, ya que son desechos semisólidos.

Además, este acuerdo establece que, en aguas dulces con un pH inferior a 6,5, el límite máximo de aluminio para la preservación de la vida acuática y silvestre debe ser de 0,005 mg/l (Registro Oficial N ° 387, 2015).

Según estudios fisicoquímicos y toxicológicos de los lodos, se ha determinado que no son considerados como residuos peligrosos, ya que los análisis indican que la cantidad de aluminio y otros metales pesados no supera los límites permitidos (Alvarado & Mayancela, 2022).

3.6.3. APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS ALUMINOSOS

Los lodos aluminosos generados durante el proceso de purificación del agua pueden ser aprovechados de varias maneras. Algunas posibilidades incluyen su utilización como materia prima en la fabricación de materiales de construcción como ladrillos o bloques, o en la producción de fertilizantes agrícolas debido a su contenido de nutrientes. También pueden ser empleados en la industria cerámica o como componente en la fabricación de cemento. Otra opción es su uso como coadyuvantes en la remediación de suelos contaminados, aprovechando sus propiedades para absorber contaminantes y mejorar la calidad del suelo. Es importante investigar y aplicar prácticas adecuadas para garantizar que el aprovechamiento de estos lodos sea seguro y beneficioso tanto para el medio ambiente como para la salud humana (Blanco, 2014).

3.6.4. EXTRACCIÓN DE LA ALÚMINA DE LOS LODOS

La obtención de aluminio a partir de los lodos de potabilización puede llevarse a cabo utilizando diversas técnicas. Una de las prácticas comunes consiste en acidificar los lodos para disolver el aluminio presente, seguido de procesos de precipitación para separar el aluminio de otros componentes. Posteriormente, el aluminio puede ser recuperado mediante métodos de filtración o sedimentación.

Otra alternativa es la lixiviación ácida, en la cual se emplean ácidos fuertes para solubilizar el aluminio contenido en los lodos. Esta solución se somete luego a procesos de purificación y precipitación con el fin de obtener aluminio de alta pureza. Es crucial resaltar que estos procedimientos deben ser llevados a cabo con precaución para evitar la contaminación ambiental y garantizar la seguridad de los trabajadores.

Además, es fundamental considerar el impacto económico y la viabilidad técnica de la extracción de aluminio de los lodos de potabilización (Gamarra & Romero, 2019).

3.7. ÁCIDO SULFÚRICO

Este compuesto químico, conocido también como "aceite de vitriolo", es un líquido altamente corrosivo de naturaleza inorgánica. En su estado más puro, es incoloro y tiene una consistencia viscosa. El ácido sulfúrico (H_2SO_4) se utiliza como materia prima en numerosos procesos industriales, incluyendo la fabricación de fertilizantes, la refinación del petróleo, la producción de papel y otros productos químicos (Gamarra & Romero, 2019).

3.7.1. ACIDIFICACIÓN

La acidificación mediante ácido sulfúrico implica la adición controlada de este compuesto químico (H_2SO_4) a una solución o sustancia para reducir su pH y aumentar su acidez. Este procedimiento tiene una amplia gama de aplicaciones en campos industriales y científicos, como la fabricación de fertilizantes, la refinación del petróleo, la extracción de minerales en la industria minera y la síntesis de diversos productos químicos. Dado que el ácido sulfúrico es altamente corrosivo y potente, se requiere un manejo cuidadoso y precauciones estrictas durante su uso (Castro & Reyes, 2022).

3.7.2. ACIDIFICACIÓN DE LODOS ALUMINOSOS

La acidificación de los lodos aluminosos consiste en añadir ácido de manera regulada a estos desechos para ajustar su pH y facilitar procedimientos de separación y tratamiento.

Este método se emplea en múltiples contextos, incluyendo la extracción de aluminio u otros metales, la estabilización de los lodos para su disposición final y la disminución de la toxicidad de ciertos contaminantes presentes en estos. Es esencial llevar a cabo este proceso con precaución y en conformidad con las regulaciones ambientales y de seguridad aplicables para este tipo de procesos (Castro & Reyes, 2022).

3.8. TEST DE JARRAS

El test de jarras es un ensayo que nos ayudara a encontrar la cantidad ideal de coagulante para el tratamiento de agua potable. Este procedimiento replica las etapas de coagulación, floculación y sedimentación que se dan en una planta de tratamiento de agua potable y agua residual (Sánchez, 2018). Determinar la dosis óptima es crucial, ya que una cantidad insuficiente de coagulante obstaculiza la formación de flóculos, mientras que dosis excesivas pueden dificultar la sedimentación al generar una gran cantidad de flóculos pequeños y además de esto dejar residuos de coagulante y un gasto innecesario del producto (Alvarado & Mayancela, 2022).

3.9. SOLIDOS DISUELTOS

Se considera a los sólidos disueltos como la medida de la cantidad de materia orgánica o inorgánica con un diámetro superior a 2 μm , este parámetro es un indicador que se utiliza para evaluar la calidad del agua. Los niveles establecidos por la normativa ecuatoriana oscilan entre 2000 y 3000 mg/L, dependiendo del propósito del agua según el Registro Oficial N° 387.

3.10. SOLIDOS TOTALES

Incluyen sales inorgánicas como las de calcio, magnesio, potasio, bicarbonatos, cloruros y materia orgánica en solución en el agua (Alvarado & Mayancela, 2022).

3.11. SOLIDOS TOTALES VOLÁTILES

Los sólidos totales volátiles son los sólidos resultantes después de la incineración de la muestra, estos están asociados con la presencia de materia orgánica en el agua o el lodo sedimentable (Alvarado & Mayancela, 2022).

3.12. PTAP DE MAHUARCAY

La planta de tratamiento Mahuarca se localiza al noreste de la ciudad de Azogues, en la provincia de Cañar, a una altura de 2810 metros sobre el nivel del mar y a aproximadamente 5 kilómetros del centro urbano. Ubicada en la parroquia Bayas, dentro del sector Legabuga de la comunidad rural de Mahuarca, la planta toma su nombre de esta área. La planta potabilizadora comenzó a funcionar en el año 2005. Está diseñada con la expectativa de en el futuro recibir flujos de agua de nuevas fuentes, con el objetivo de satisfacer las demandas de la población hasta un horizonte temporal previsto inicialmente hasta 2020 o incluso 2230. La instalación procesa aguas de Nudpud y Llaucay, suministrando a dos nuevos depósitos de reserva de 800 metros cúbicos cada uno, situados en la misma zona, con una capacidad de producción de entre 50 litros por segundo como mínimo y 110 litros por segundo como máximo (Calle, 2017).

Esta instalación incluye estructuras auxiliares destinadas al almacenamiento y manejo de sustancias químicas, además de un laboratorio de control, una sala de comando, áreas dedicadas a la operación, administración y seguridad, así como caminos para la movilidad interna, jardines y áreas verdes (Calle, 2017).

Imagen 1:PTAP Mahuarcay



En la imagen número 1 se observa la planta de tratamiento Mahuarcay como una instalación tradicional que funciona mediante la gravedad, compuesta por etapas de coagulación, sedimentación, filtración rápida y desinfección. En estos procesos se emplean sulfato de aluminio, polímeros y cloro gaseoso (Calle, 2017).

3.12.1. MÓDULOS DE COAGULACIÓN

En la imagen número 2 se pueden apreciar los módulos de coagulación de la PTAP de Mahuarcay, estos se disponen de un receptáculo de entrada para el flujo que asciende. Tras atravesar el vertedero, el agua fluye por una serie de escalones, donde se produce un salto hidráulico en su base, lugar en el cual se añade el coagulante. En esta sección, el coagulante se mezcla de manera integral con el agua sin tratar (Calle, 2017).

Imagen 2: Módulos de Coagulación



3.12.2. UNIDADES DE FLOCULACIÓN

La planta de tratamiento de Mahuarcay cuenta con dos unidades equipadas con floculadores en forma de serpentin como se pueden observar en la imagen número 3, esto ayuda a mejorar la formación de los flóculos previo tratamiento de coagulación (Calle, 2017).

Imagen 3: Floculadores



3.12.3. SEDIMENTADORES

Las instalaciones de la PTAP. Cuentan con 6 unidades de sedimentadores con placas paralelas, de flujo ascendente, divididas en doce áreas de sedimentación. Estos sedimentadores están diseñados para operar bajo flujo laminar y están formados por placas paralelas como lo indica la imagen número 4 (Calle, 2017).

Imagen 4: Sedimentadores



3.12.4. SISTEMA DE FILTRADO

El sistema de filtración se observa en la imagen número 5, donde el sistema consta de dos conjuntos de filtros, cada uno con cuatro unidades de filtración de lecho dual de antracita y arena, de tipo hidráulico y con funcionamiento de taza declinante. El lavado se realiza de manera recíproca, utilizando el flujo proveniente de las demás unidades (Calle, 2017).

Imagen 5: Sistema de Filtración



3.12.5. SISTEMA DE DESINFECCIÓN

En la planta, el proceso de desinfección se lleva a cabo mediante el uso de cloro gas, almacenado en cilindros de una tonelada bajo presión como se observa en la imagen número 6. Esta acción se efectúa con dosificadores de vacío y una dosificación de la solución desinfectante. La inyección del cloro se realiza en un área donde hay un alto gradiente de velocidad, asegurando así su dispersión rápida y homogénea a través del volumen de agua, justo antes de entrar en la cámara de contacto (Calle, 2017).

Imagen 6: Sistema de Cloración

3.13. MANEJO DE LOS LODOS EN LA PTAP MAHUARCAY

En el proceso de potabilización del agua cruda en la planta de tratamiento de Mahuarca se generan un volumen aproximadamente 93,74 m³/día de lodos de potabilización. Estos son vertidos directamente a la quebrada de Mahuarca o en su defecto al río Burgay sin antes tener ningún tipo de tratamiento que pueda disminuir la concentración del aluminio presente en este desecho (Calle, 2017).

3.13.1. PROPUESTAS PARA EL MANEJO DE LOS LODOS ALUMINOSOS

Por otro lado, se han presentado iniciativas para manejar el tratamiento y disposición final de los lodos aluminosos generados en el proceso de potabilización como se observa en la imagen número 7.

En la PTAP Mahuarca, una de las propuestas consiste en implementar un sistema de recolección, secado y compactación para los lodos. Este método facilita la reducción del contenido de aluminio en los residuos en un 25%, lo que contribuye a disminuir su impacto ambiental.

No obstante, esta propuesta conlleva a la construcción de nuevas unidades que puedan recolectar, secar y compactar los lodos generando altos rubros para el presupuesto de la municipalidad de la ciudad de Azogues, pese a esto se alcanzaría una reducción de aluminio en los lodos de un 25% (Zhindon, 2011).

Imagen 7: Generación de lodos aluminosos.



En otra propuesta, se sugiere la implementación de un sistema especializado para el tratamiento de los lodos generados. Este sistema constaría de un tanque de homogeneización, un espesador de lodos operado por gravedad y dos lechos de secado. El principal objetivo es disminuir el volumen de los lodos mediante deshidratación. De esta forma, los lodos tratados podrían ser dispuestos en un relleno sanitario, evitando la contaminación directa de la quebrada de Mahuarcay o, alternativamente, del río Burgay, que son los sitios de disposición actuales de estos residuos (Zhindon, 2011).

El inconveniente en esta propuesta es el transporte de los lodos ya deshidratados, por el difícil acceso a la planta de tratamiento que se ingresa por vías de tercer orden. Además de esto la municipalidad no posee el equipo caminero que pueda dar abasto al transporte diario de este residuo (Zhindon, 2011).

3.14. MARCO LEGAL EN ECUADOR Y OTROS PAÍSES

Tabla 6: Análisis Legal

Fuente (Urgilés & Viñansaca, 2019)

Nombre de la Legislación	País	Resumen de secciones o artículos aplicables	Resumen
Acuerdo ministerial 097-A	ECUADOR	Norma de los lodos de potabilización : Son considerados desechos de descarga peligrosos por sus características químicas y físicas	En nuestra Legislación actual los lodos de potabilización no son considerados como desechos ya que estos son semisólidos y no entran en el agua (pasa por alto la sedimentación de estos lodos en los cuerpos de agua)
REFORMA TEXTO UNIFICADO LEGISLACION SECUNDARIA, MEDIO AMBIENTE, LIBRO VI, Decreto Ejecutivo 3516, Registro Oficial Suplemento, Acuerdo Ministerial 097 a. Registro Oficial Edición Especial 387 de 04-nov.- 2015 Estado: Vigente		Norma de calidad: No se controla la descarga o límites máximos permisibles en las descargas de este tipo de efluente, como son los lodos aluminoso tanto al agua dulce, alcantarillado o suelo, no exige una remediación o previo tratamiento para uno de sus principales componentes que es el aluminio, controla en general las descargas de Aluminio con un mínimo de 5 (mg/l)	No se controla la descarga de los lodos de potabilización, no existen límites máximos permitidos para la descarga de estos afluentes, pese a su alto contenido de aluminio.
Resolución N 0002 SA-2014. Secretaria del Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito		Art 6. Norma técnica Ambiental y ordenanzas para el control de municipalidades en descargas liquidas o semisólidos.	En esta Normativa la ilustre Municipalidad de la ciudad de Quito considera al residuo de los lodos de potabilización como un desecho peligroso

<p>Resolución NO. 1096. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico -RAS-</p>	<p>COLOMBIA</p>	<p>Título II. Capítulo XIII. Sistemas de potabilización de aguas. Artículo 119. Se regula y se controla las concentraciones de aluminio residual, el tratamiento, manejo y disposición final de los lodos generados en los procesos de potabilización . Prohibiendo el desechar este residuo sin tratamiento directamente al recurso agua o suelo.</p>	<p>Esta resolución establece que para la descarga de estos lodos aluminosos en fuentes de agua o alcantarillado, obligatoriamente debe realizarse un tratamiento previo, para luego realizar monitores del área conjuntamente con estudios ambientales que puedan determinar que no se están violando las regulaciones sobre vertimiento a cuerpos de agua o alcantarillados públicos o al recurso suelo.</p>
<p>Norma Oficial Mexicana NOM-004-, Protección ambiental. - Lodos y biosólidos.</p>	<p>MEXICO</p>	<p>SEMARNAT-2002: Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su tratamiento, aprovechamiento y disposición final.</p>	<p>Esta Norma Oficial Mexicana (NOM -004) establece los límites máximos permisibles de contaminantes en lodos de plantas potabilizadores. Lo curioso en esta Normativa es que NO considera al aluminio como un contaminante, pero al contrario si regula su disposición final , sin embargo se puede desechar este residuo siempre y cuando hayan recibido constancia de no peligrosidad luego de realizar diferentes procesos de tratamiento usando la estabilización alcalina.</p>

La legislación y normativas ambientales específicas sobre el manejo de lodos aluminosos generados en las plantas de potabilización de agua en Ecuador no fueron directamente encontradas en la investigación realizada. Sin embargo, la gestión de estos residuos y su impacto ambiental son áreas de interés y estudio dentro del ámbito de tratamiento de agua. Los estudios y prácticas en torno a los lodos aluminosos se centran en la optimización de su manejo, tratamiento y posibles reúsos, dada su composición y las implicaciones ambientales de su disposición inadecuada. La recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados durante el proceso de potabilización del agua se ha estudiado como una forma de optimizar el uso de recursos y minimizar el impacto ambiental. Este proceso implica la acidificación de los lodos, seguida de pasos que permiten la separación y recuperación del aluminio, lo cual no solo reduce el volumen de lodos a gestionar sino que también recupera materiales útiles para su reutilización en el proceso de potabilización (Zhindon, 2011) .

Además, se ha investigado la valorización de estos lodos, considerando su incorporación en prácticas de economía circular y sostenibilidad.

En cuanto a la legislación específica y los marcos regulatorios, es fundamental que las entidades responsables de la gestión de plantas de potabilización y tratamiento de aguas sigan las directrices y normativas locales e internacionales relevantes para asegurar una gestión ambiental adecuada de los lodos y otros residuos generados. Esto incluiría el cumplimiento de estándares de calidad del agua, gestión de residuos, y protección ambiental (Zhindon, 2011).

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. TIPO DE ESTUDIO

El enfoque metodológico adoptado para esta investigación es el deductivo y experimental. Dicho enfoque parte de la formulación de hipótesis para explicar ciertos fenómenos, los cuales se someten a verificación a través de predicciones derivadas de experimentos controlados. La principal ventaja de esta metodología es su capacidad para generar evidencia robusta que apoye la aceptación o rechazo de las hipótesis, gracias a la experimentación en un ambiente controlado como lo es el laboratorio (Villegas et al., 2018).

4.1.1. DESCRIPCIÓN DEL ESPACIO FÍSICO Y TEMPORAL

La experimentación se llevó a cabo en la PTAP Mahuarcay. Adicionalmente, se efectuaron pruebas para evaluar los niveles de aluminio antes y después del proceso de acidificación.

4.2. ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua potable "Mahuarcay", pertenecientes a la empresa EMAPAL-EP, ubicada en el cantón Azogues, provincia de Cañar, Ecuador.

4.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el proceso de reacondicionamiento del sulfato de aluminio, se implementó una técnica de acidificación de los residuos sedimentables. Este procedimiento consistió en la incorporación de ácido sulfúrico al 98% para modificar la composición química del lodo. Inicialmente, se realizaron análisis fisicoquímicos exhaustivos de los lodos en un entorno controlado de laboratorio.

Seguidos de evaluaciones de tratabilidad destinadas a determinar la proporción ideal para maximizar la recuperación del agente coagulante y minimizar el volumen del residuo.

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos, se seleccionaron el pH y el tiempo de agitación como variables cruciales. La metodología empleada incluyó experimentación mediante pruebas de jarras para identificar las condiciones óptimas de mezcla y el valor de pH que maximizarían la eficacia en la recuperación del sulfato de aluminio, conforme a los hallazgos documentados por Villegas et al., en 2018.

4.4. MUESTREO

La extracción de muestras de lodo se realizó en los seis sedimentadores de la Planta de Tratamiento de Aguas Potables (PTAP) de Mahuarcay, aplicando dos metodologías de muestreo diferenciadas. Para las evaluaciones fisicoquímicas, se recogieron doce muestras unitarias de un litro cada una en dos intervalos: una sesión matutina y otra vespertina. Esta programación responde a la variabilidad diurna en las características del lodo, que presenta mayor viscosidad durante la mañana y una consistencia más diluida por la tarde debido a los ciclos de lavado de los sedimentadores en la instalación. Concurrentemente, para los estudios de tratabilidad, se recolectaron tanto muestras simples como compuestas de los sedimentadores como se observa en la imagen número 8, procediendo posteriormente a su mezcla manual en agrupaciones de sedimentadores (1 y 2), (3 y 4) y (5 y 6), obteniendo así una muestra simple y tres compuestas. Este proceso comenzó con una etapa de agitación para lograr la homogeneización de las muestras, seguida de una mezcla manual. La extracción de todas las muestras se llevó a cabo tras el drenaje del agua utilizada para la limpieza de los sedimentadores. Dado la falta de una normativa específica para el muestreo de lodos aluminosos en el contexto nacional, se tomó como referencia la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 169:98 (Galarza & Barros, 2022).

Imagen 8: Recolección de muestras



La metodología empleada consto de tres fases de análisis:

- Caracterización física y química de los lodos.
- Concentraciones iniciales de aluminio residual.
- Ensayos de tratabilidad.
- Características y pruebas en el agua cruda con el coagulante recuperado (Jácome, 2020).

4.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS

Para la realización de los análisis fisicoquímicos y las pruebas de tratabilidad, se procedió a recolectar un volumen total de 12 litros de muestras, las cuales fueron homogeneizadas manualmente para asegurar la uniformidad en la composición antes de su almacenamiento. Este procedimiento de homogeneización y almacenamiento es crucial para mantener la integridad de las muestras hasta el momento de su análisis. Posteriormente, tras la recolección y adecuada preparación de la muestra, se procedió con la caracterización fisicoquímica de las mismas.

siguiendo métodos estandarizados (anexo 1) para garantizar la reproducibilidad y precisión de los resultados obtenidos. Los análisis pertinentes se realizaron en un

laboratorio especializado en los días inmediatamente posteriores a la recolección, para minimizar cualquier cambio en la composición química que pudiera ser inducido por el almacenamiento prolongado. Esta metodología, detallada en la publicación de Villegas et al., 2018, asegura que los procedimientos seguidos están en conformidad con las prácticas estandarizadas para el análisis de este tipo de muestras, proporcionando así una base sólida para la interpretación de los resultados de las pruebas de tratabilidad y análisis fisicoquímicos. Los parámetros iniciales analizados se detallan en la tabla número 7.

Tabla 7: Caracterización inicial de los Lodos Aluminosos

Fuente (Castro & Reyes, 2022)

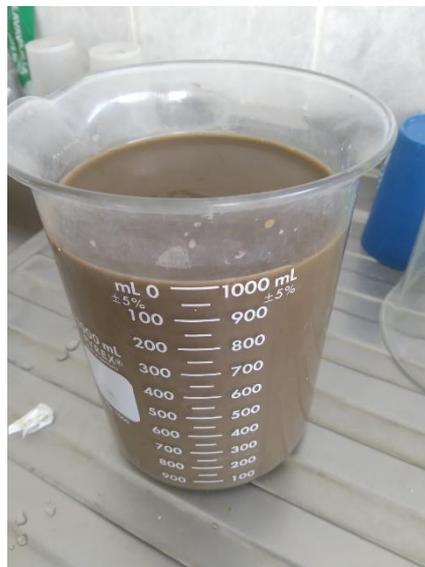
Parámetro	Equipo	Reactivos
pH	OAKTON pH/mv/°C meter	-
STD	Conductímetro HACH EC5	-
Fe	Espectro fotómetro HACH DR 2500	Ferro Ver 1-2-3
Cu	Espectro fotómetro HACH DR 2500	Accuvac
PO ₄	Espectro fotómetro HACH DR 2500	LSK 348
SO ₄	Espectro fotómetro HACH DR 2500	HI 38000
NO ₂	Espectro fotómetro HACH DR 2500	Nitraver
NO ₃	Espectro fotómetro HACH DR 2500	Nitraver
Al	Espectro fotómetro HACH DR 2500	Ascorbic Acid , Aluver,Bleaching 3
Ca	Espectro fotómetro HACH DR 2500	EDTA
Mg	Espectro fotómetro HACH DR 2500	Vario Ascorbic Acid
Alcalinidad	Titulación	Bromcresol Verde metil

4.6. ENSAYOS DE TRATABILIDAD

Mediante la implementación de los ensayos de tratabilidad, se efectuó la recuperación de sulfato de aluminio a partir de los lodos aluminosos, correlacionando las variables como el tiempo de mezcla y el pH conjuntamente con la dosis óptima de ácido sulfúrico concentrado al 98%. Este proceso se orientó a la reducción del volumen de los lodos y a la evaluación de su viabilidad para una posible recirculación y funcionamiento en los procesos iniciales del tratamiento de agua potable (Jácome, 2020).

La recuperación del coagulante se llevó a cabo utilizando la metodología de ensayos de jarras, tal como lo describe (Villegas et al., 2018). Se utilizó un litro de muestra como lo indica la imagen número 9, de lodo por jarra (1000 ml). Los ensayos se realizaron usando el equipo Jar Test With B-KER² Square Jars de Phipps & Bird PB 700TM que incluye un sistema de agitación con control de velocidad manual y tiempo de mezcla, este equipo nos permitió realizar hasta seis pruebas simultáneas con un litro de muestra en cada jarra (Gutiérrez et al., 2020).

Imagen 9: Medición de muestras previo ensayo.



Los experimentos realizados con el equipo de jarras como se lo puede observar en la imagen número 10 que involucraron agitar la muestra a una velocidad de 100 rpm, y se analizó el porcentaje de recuperación de la alúmina a varios tiempos de mezcla y niveles de pH.

Imagen 10: Ensayo de jarras con 1 lt. De muestras



Antes de añadir ácido sulfúrico a las muestras, estas se mezclaron durante 15 minutos a una velocidad de 100 revoluciones por minuto utilizando el equipo de jarras, (Imagen 10), con el objetivo de alcanzar una mezcla homogénea (Villegas et al., 2018).

Una vez finalizado el periodo de mezclado, las muestras se dejaron reposar durante 60 minutos para permitir la sedimentación. Posteriormente, se extrajeron muestras del líquido claro que quedó en la parte superior (sobrenadante) para analizarlas y calcular el porcentaje del coagulante que se recuperó a diferentes niveles de pH (Jácome, 2020).

Imagen 11: Agitación constante de 100 RPM



En la imagen número 10 se muestra un equipo de jarras marca Phipps & Bird, modelo PB-700™ JarTester. El dispositivo está configurado para funcionar a 100 revoluciones por minuto (rpm), como se indica en la imagen número 11, Además se puede observar que el equipo cuenta con una perrilla que permite ajustar la velocidad entre los modos mínimo y máximo.

Al principio, para los estudios de tratabilidad, fue necesario desarrollar un procedimiento que mejorara la recuperación del sulfato de aluminio mediante la acidificación controlada (Villegas et al., 2018), para posteriormente obtener los mayores porcentajes posibles de recuperación de la alúmina depositada en los lodos. Esto implicó la experimentación en laboratorio de las variables de tiempo de mezcla y pH (Gutiérrez et al., 2020).

4.7. VARIABLE PH

Se llevó a cabo una evaluación de cómo el pH, la concentración de coagulante presente en la solución recuperada y el porcentaje de recuperación se correlacionan, con el objetivo de identificar el pH ideal para la extracción eficiente de sulfato de aluminio. Se trabajó con un rango de pH de 1.5, 2.5 hasta 3.5. El ajuste del pH se realizó dosificando lentamente el ácido sulfúrico al 98% de concentración

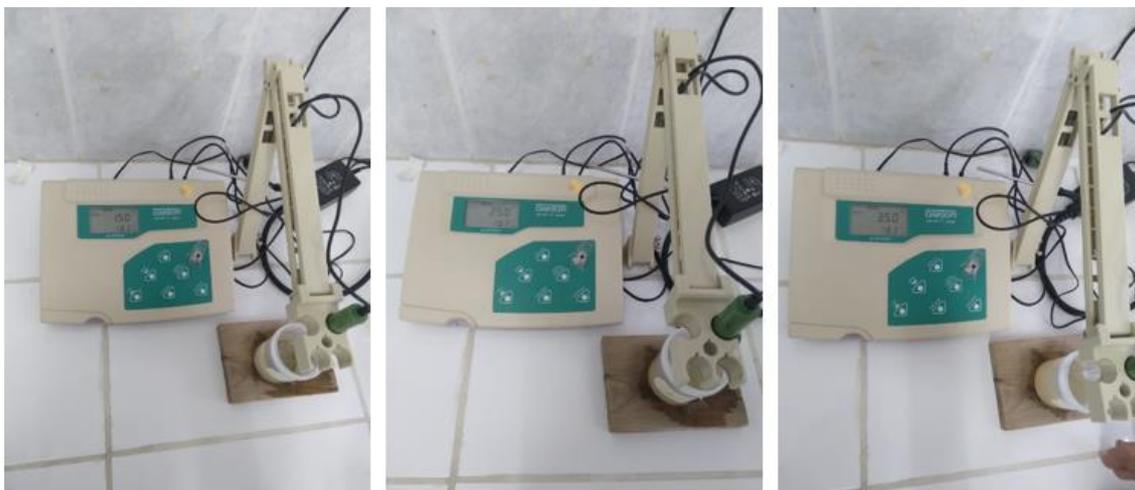
directamente en las diferentes muestras de lodo hasta alcanzar los niveles de pH deseado (Villegas et al., 2018). Las cantidades específicas de ácido necesarias se establecieron a través de estas adiciones directas. En la tabla número 8 se presentan los diferentes volúmenes de ácido sulfúrico utilizados. De la misma forma en la imagen 12 se evidencian los pH registrados.

Tabla 8: Dosificación de Ácido sulfúrico por muestra.

Fuente (Jácome, 2020)

Volumen de lodo (l)	Cantidad de H ₂ SO ₄ (98%) de concentración en ml	pH obtenido
1	6	3.5
1	9	2.5
1	16.5	1.5

Imagen 12: pHs. Registrados.



4.8. TIEMPO DE AGITACIÓN

Se determinó el porcentaje de recuperación y la concentración de la alúmina recuperada variando el tiempo de mezcla, mientras se mantenían constantes la velocidad de agitación a 100 rpm y los niveles de pH a 1.5, 2.5 y 3.5. Los tiempos de mezcla fueron ajustados a intervalos de 5, 30 y 90 minutos para identificar el tiempo

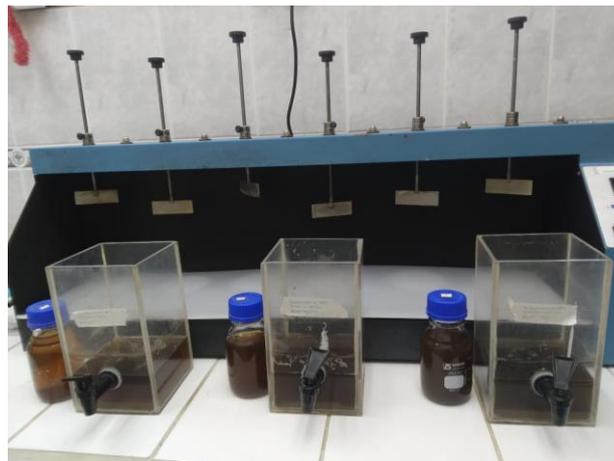
óptimo de mezcla que permita la máxima recuperación del coagulante. Todos estos parámetros se detallan en la tabla número 9 (Jácome, 2020).

Tabla 9: Modificación del tiempo de mezcla y pH en ensayos de jarras

Periodo de homogenización (min)	Duración de mezcla (min)	Taza de agitación (rpm)	pH
15	5	100	1.5/2.5/3.5
15	30	100	1.5/2.5/3.5
15	90	100	1.5/2.5/3.5

Para la recuperación del sobrenadante se utilizaron jeringas de 20 ml para poder retirar el mismo sin que se mezcle con el lodo sedimentable. Notándose un color oscuro del sobrenadante como lo indica la imagen número 13 (Villegas et al., 2018).

Imagen 13: Muestras del sobrenadante recuperado



4.9. COAGULANTE RECUPERADO

Después de completar el período de sedimentación de 60 minutos, se extrajeron muestras del sobrenadante se etiquetaron después como se puede apreciar en le imagen número 14, que correspondía al coagulante recuperado. Se recolectaron muestras de 100 ml de cada uno de los ensayos realizados.

Imagen 14: Coagulante recuperado muestras de 100 ml.



4.10. EVALUACIÓN DEL COAGULANTE RECUPERADO

La caracterización del sobrenadante se realizó de manera similar a la de los lodos residuales, utilizando el mismo equipo y bajo las mismas condiciones. La única diferencia radicó en los parámetros fisicoquímicos examinados, puesto que la evaluación del sulfato de aluminio recuperado se basó en:

- Color.
- pH.
- Turbiedad.
- Concentración de aluminio.

4.11. ENSAYOS CON COAGULANTE RECUPERADO

Para los ensayos con el coagulante recuperado mediante procesos de acidificación inicialmente se tomaron cuatro muestras de agua cruda , para poder determinar las condiciones iniciales del agua sin tratar, luego de contar con los parámetros iniciales en cuanto a su pH, color, turbidez y STD, podremos medir la capacidad de remoción del coagulante recuperado en los procesos primarios de clarificación del agua y su posterior comparación con la normativa vigente de nuestro país (Castro & Reyes, 2022). Después de recolectar las muestras de coagulante recuperado y establecer un control de comparación, se procedió a realizar ensayos con el coagulante recuperado utilizando el mismo equipo de jarras y bajo las mismas condiciones previamente descritas.

Tras concluir los ensayos de jarras, se extrajeron muestras de cada jarra para analizar los siguientes parámetros en el colorímetro:

- Turbidez.
- Color.
- pH.
- STD.

Posteriormente, se determina la alternativa más adecuada, que es la dosis óptima de coagulante, tal como se describe en la tabla número 11. Esta dosis representa la cantidad ideal de coagulante necesaria para el tratamiento, considerando las condiciones iniciales del agua no tratada, según lo documentado por (Villegas et al., 2018).

4.12. EVALUACIÓN DEL MATERIAL SEDIMENTABLE

En la fase inicial de la evaluación del material sedimentable, se implementó un procedimiento de filtración detallado en la imagen número 15. Durante este proceso, se colocó un papel filtro en la boca de entrada de cada embudo con el objetivo de retener el material sedimentable, es decir, el lodo, permitiendo que

únicamente el líquido sobrenadante de todas las muestras fluyera a través del filtro. Esta técnica se empleó sistemáticamente usando embudos y papel filtro hasta acumular una cantidad de lodo cercana a los 100 gramos. Este método asegura que solo el sobrenadante se traslade, mientras que el lodo se acumula efectivamente en el papel filtro situado en la parte superior del embudo, facilitando así su posterior análisis y manejo (Villegas et al., 2018).

Imagen 15: Filtrado del sedimentable



En el procedimiento experimental, se utilizó un crisol de laboratorio para pesar cuidadosamente una muestra de aproximadamente $100 \pm$ g de lodo, destinada a análisis posteriores. Esta cantidad fue seleccionada para garantizar la representatividad de la muestra en los estudios de caracterización subsiguientes. Dicha caracterización se llevó a cabo siguiendo las especificaciones y metodologías detalladas en la imagen número 16, proporcionando un marco estandarizado para evaluar las propiedades y composición del lodo. Este paso es crucial para determinar la calidad y el tratamiento adecuado del material en estudios ambientales o de gestión de residuos.

Imagen 16: Peso de muestras del sedimentable.



En nuestra investigación el análisis y caracterización tanto del sedimentable, así como del sobrenadante son de suma importancia, ya que nos permiten conocer que sustancia o las reacciones químicas que se forman luego de los procesos de acidificación en busca de la recuperación del Alumbre (Villegas et al., 2018).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. RESULTADOS FISICOQUÍMICOS DE LOS LODOS.

El análisis de resultados de los lodos sedimentables comenzó a partir del muestreo. Se recolectaron muestras de lodo residual durante la mañana y en la tarde en el periodo de recolección de las muestras las lluvias fueron intermitentes, lo que resultó en variaciones en los análisis fisicoquímicos de cada muestra. Los resultados de la caracterización fisicoquímica de las muestras no acidificadas se presentan en la tabla número 10. Los debidos procedimientos para obtener los resultados mencionados se describen en el Anexo 1.

Tabla 10: Caracterización fisicoquímica de los lodos residuales de la PTAP de Mahuarcay.

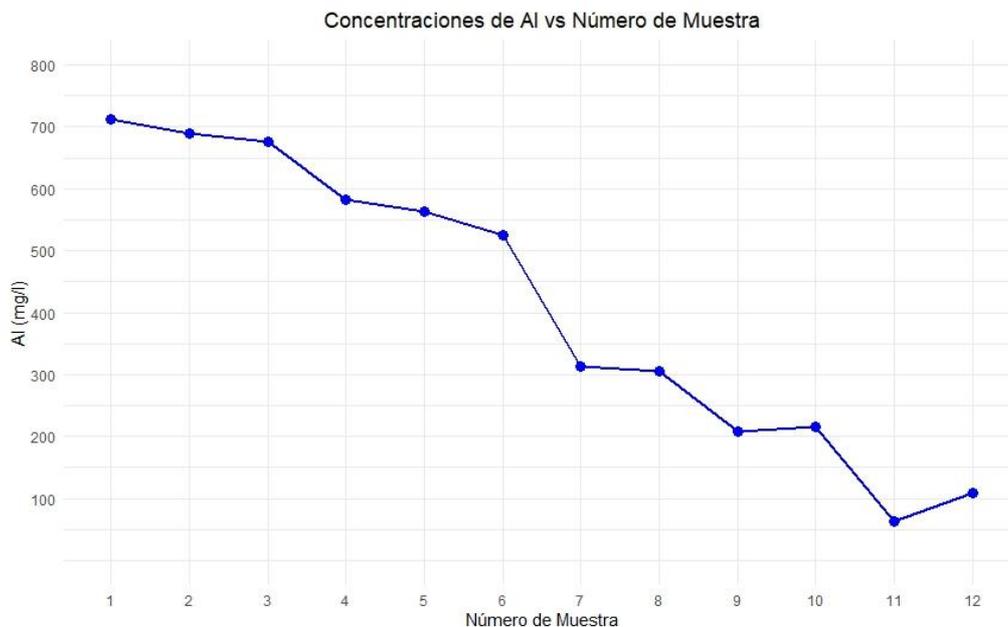
# Muestras	Al (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	pH (mg/l)	STD (mg/l)	Fe (mg/l)	Cu (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	Alcalinidad (mg/l)
1	712.3	523.4	96	3.2	705	289	87	181	200	89	215	400
2	689.5	458.6	90	3.5	694	246	84	176	186	83	202	395
3	676.3	411.2	87	3.7	614	239	78	165	164	85	102	372
4	582.3	369.7	74	3.6	586	224	82	156	152	89	169	384
5	524.3	327.4	68	3.8	512	219	76	142	190	73	256	369
6	563.8	303.6	57	4.6	412	194	78	138	215	89	128	356
7	312.6	227.6	48	4.2	502	175	68	128	148	70	112	349
8	305.7	275.7	59	4.6	305	185	72	135	157	64	220	352
9	207.7	198.7	61	5.2	213	178	73	125	186	81	257	367
10	215	278.3	52	6.2	200	156	62	142	127	96	115	379
11	63.5	78.2	28	7.2	198	134	42	123	115	100	110	382
12	109.2	124.3	46	6.7	403	153	57	132	153	98	183	361
Media	413.5	298.1	63.8	4.7	445.3	199.3	71.6	145.3	166.1	84.8	172.4	372.2

En la tabla numero 10 podemos observar la caracterización inicial de los lodos aluminosos de la PTAP de Mahuarcay, comenzaremos el análisis de los resultados obtenidos analizando las relaciones de mayor interés para nuestra investigación.

5.1.1. ALUMINIO

Cuando la presencia de aluminio en el agua aumenta, este parámetro puede influir directamente en el pH de lodo sedimentable, es decir, si el aluminio proviene de compuestos como el sulfato de aluminio que se utiliza como coagulante en los procesos iniciales del tratamiento del agua cruda, su adición tiende a reducir el pH debido a la liberación de iones de hidrógeno durante su hidrólisis. Por lo tanto, cuando se añade más aluminio al agua, especialmente en formas de coagulantes, el pH de lodo residual tiende a disminuir como lo denota la imagen número 17. Esta disminución en el pH del lodo sedimentable puede requerir la adición de alcalinizantes para estabilizar el pH de este residuo a niveles seguros para su disposición final y evitar la acidificación de los suelos o de los cuerpos de agua afectando directamente la vida acuática.

Imagen 17: Grafica de la concentración de Aluminio según muestras.



La imagen número 17 muestra que las concentraciones de aluminio (Al) en mg/l son significativamente más altas en las muestras tomadas en la mañana (1,2,3,4,5,6), demuestran mayores niveles de aluminio residual que están sobre las concentraciones de 500 mg/l, lo que sugiere una mayor espesura de los lodos y, por ende, una mayor concentración de aluminio. En contraste, las muestras de la tarde (7,8,9,10,11,12) presentan una disminución considerable en la concentración de aluminio, con valores que van desde aproximadamente 312.6 mg/l hasta 109.2 mg/l, probablemente estos resultados en las diferencias de concentraciones del lodo en el muestreo se dio por las precipitaciones suscitadas en la noche, ya que, cuando existe precipitación se utiliza una mayor cantidad de sulfato de aluminio para compensar los efectos de la lluvia, lo que podría haber alterado las propiedades de los lodos y variado las concentraciones de aluminio observadas. En resumen, la gráfica sugiere una correlación directa entre la espesura de los lodos y la concentración de aluminio, siendo las muestras de la mañana consistentemente más altas en concentración de aluminio comparadas con las de la tarde.

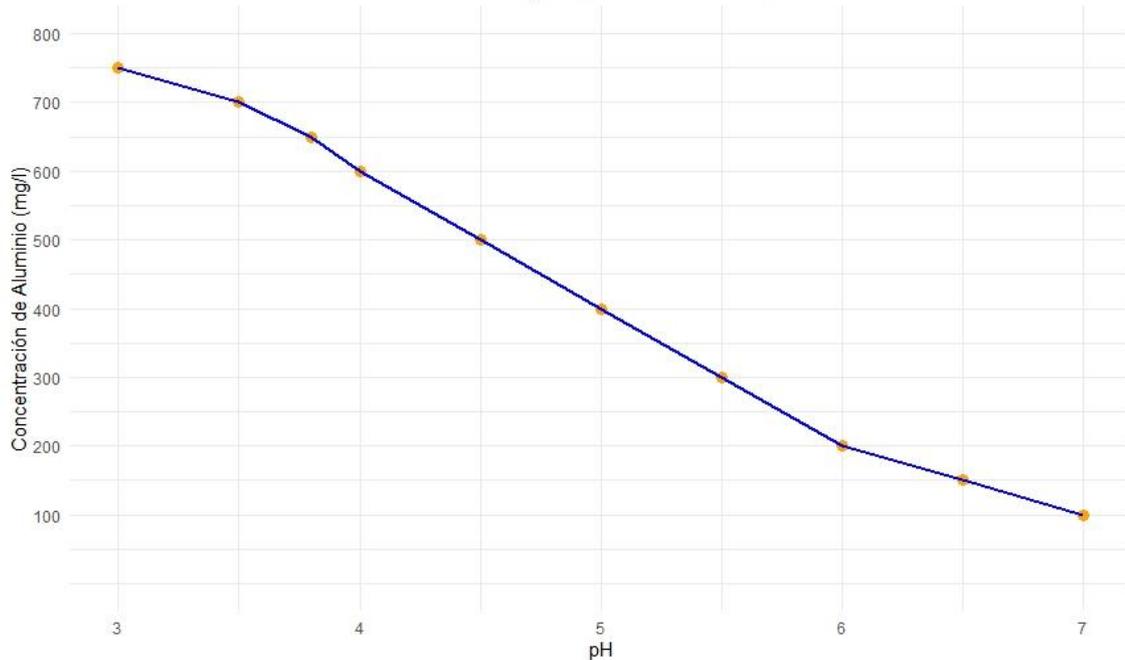
5.1.2. PH EN LOS LODOS

El nivel de pH en los lodos aluminosos puede variar dependiendo de varios factores, incluyendo la forma del aluminio y las diferentes condiciones que pueda presentar el agua. Generalmente, el uso de compuestos de aluminio como coagulantes (por ejemplo, el sulfato de aluminio) en el tratamiento de agua puede causar una disminución en el pH esto debido a los procesos químicos que interactúan en este proceso como la hidrólisis del aluminio.

Cuando se adiciona el sulfato de aluminio al agua, este reacciona con el agua formando un hidróxido que ayuda a coagular y remover impurezas. Este proceso libera iones de hidrógeno, lo que causa la disminución del pH en los lodos sedimentables como se lo puede observar en la imagen número 18.

Imagen 18: Variación del pH vs Al

Relación del pH vs concentración de Al



La imagen número 18 muestra la relación entre el pH en los lodos sedimentables y la concentración de aluminio en (mg/l) de las muestras tomadas. A medida que aumenta la concentración de aluminio, el pH de los lodos se vuelve más ácido (disminuye). La gráfica cubre un rango de pH de 3 a 7, donde existe una concentración alta de aluminio (alrededor de 750 mg/l) corresponde a un pH de aproximadamente 3, indicando una condición más ácida. A medida que la concentración de aluminio disminuye, el pH aumenta, indicando una menor acidez, con una reducción abrupta en la concentración de aluminio desde 750 mg/l hasta 300 mg/l, resultando en un incremento del pH de 3 a 4.5. Entre los pH 4.5 y 6, donde la concentración de aluminio se mantiene alrededor de 300 mg/l, el pH permanece relativamente constante. A partir del pH 6, la concentración de aluminio continúa disminuyendo, alcanzando aproximadamente 100 mg/l, y el pH sigue aumentando hasta llegar a 7. En resumen, el pH de los lodos sedimentables disminuye (se vuelve más ácido) con el incremento de la concentración de aluminio en las muestras tomadas.

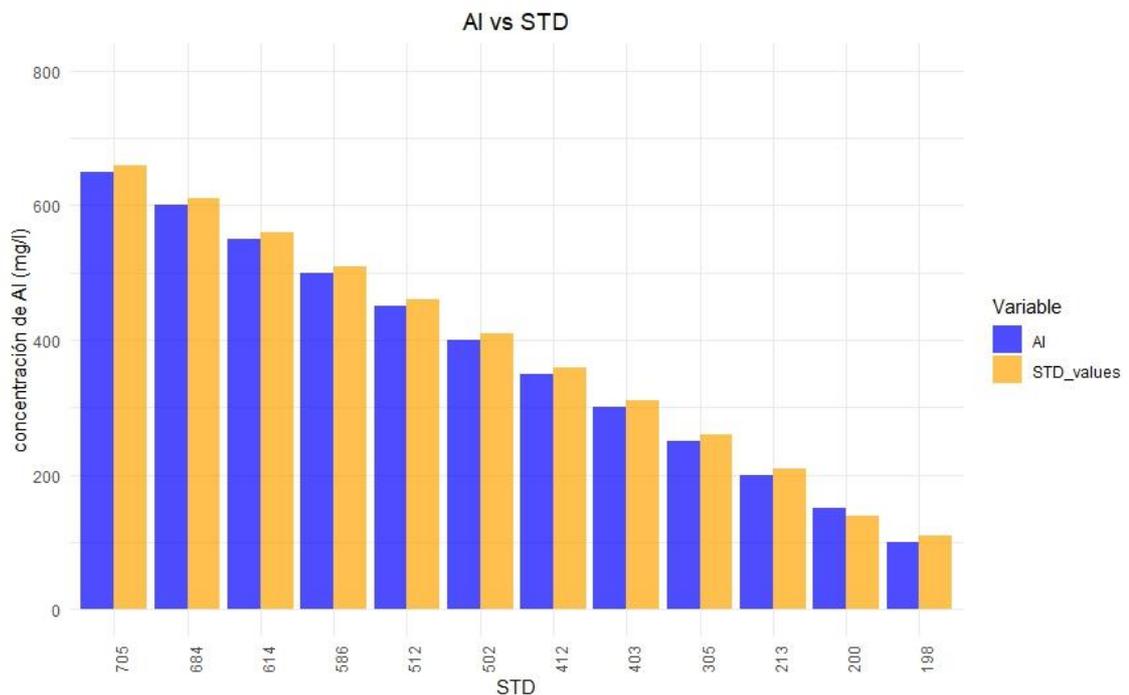
5.1.3. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD)

Los lodos aluminosos o lodos sedimentables que cuenten con una mayor concentración de aluminio pueden influir en la cantidad de sólidos totales disueltos (STD) en el lodo de distintas formas, como por ejemplo:

5.1.3.1. AUMENTO DE STD

Si los lodos aluminosos contienen aluminio que no está completamente precipitado o se redispersa en el agua, podría aumentar la concentración de sólidos totales disueltos como lo demuestra la imagen número 19, este comportamiento de los STD se manifiesta debido a la solubilidad de las diversas formas de aluminio, especialmente en condiciones de pH bajo. Podemos observar que a mayores concentraciones de aluminio residual existen una mayor formación de STD.

Imagen 19: Comportamiento de los STD vs Concentración de Al



5.1.3.2. INFLUENCIA DEL PH:

El pH del agua afecta la solubilidad del aluminio. En un pH más alto, el aluminio se precipita más fácilmente como hidróxido de aluminio, lo cual podría no influir tanto en los STD porque se convierte en parte del lodo sólido.

5.1.3.3. INTERACCIONES QUÍMICAS:

Los lodos aluminosos pueden interactuar con otros iones en el agua, como son los fosfatos o sulfatos. Estas interacciones pueden llevar a la formación de compuestos adicionales disueltos que contribuyen a una mayor formación de los STD.

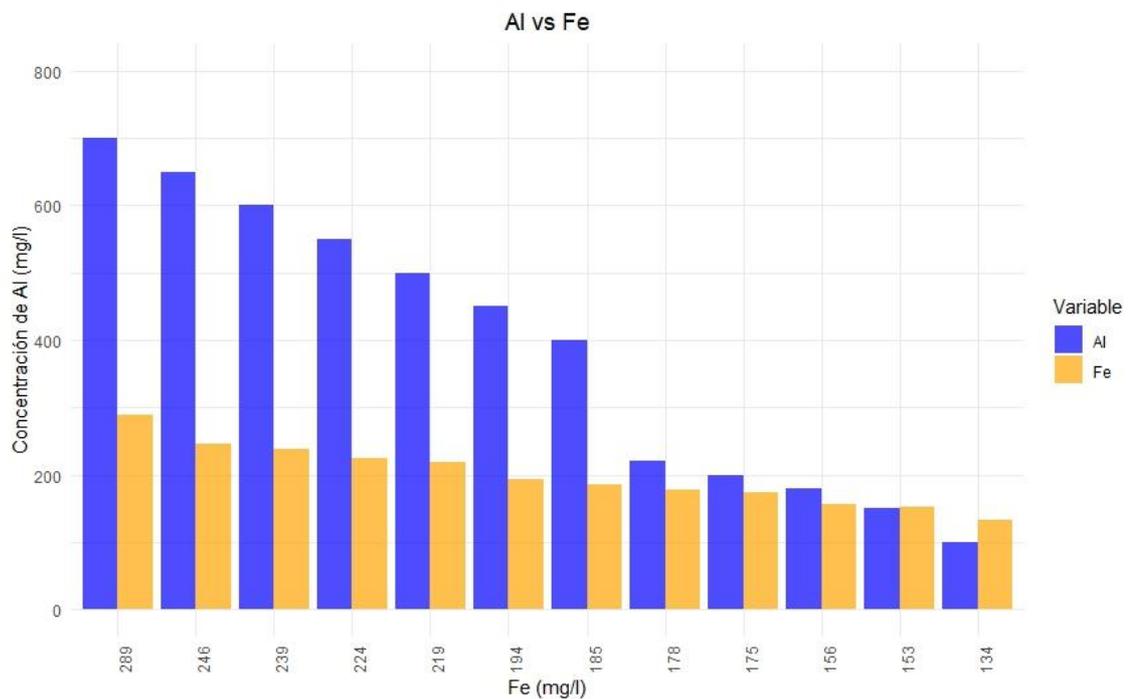
5.1.4. PRESENCIA DE HIERRO EN EL LODO

La presencia de una mayor cantidad de aluminio residual en los lodos aluminosos puede influir directamente en el comportamiento y destino del hierro presente en estos lodos de varias maneras:

5.1.4.1. FORMACIÓN DE COMPUESTOS MIXTOS:

El hierro y el aluminio pueden formar compuestos que pueden tener diferentes propiedades de los precipitados puros de cada metal. Por ejemplo, la presencia de aluminio puede afectar directamente a la estabilidad, solubilidad, y reactividad de los precipitados de hierro en los lodos sedimentables. En términos de manejo de residuos, los lodos ricos en aluminio y hierro pueden requerir tratamientos directos para estabilizar estos metales antes de su disposición final o su re utilización.

Imagen 20: Concentraciones de Al y Fe en los lodos sedimentables

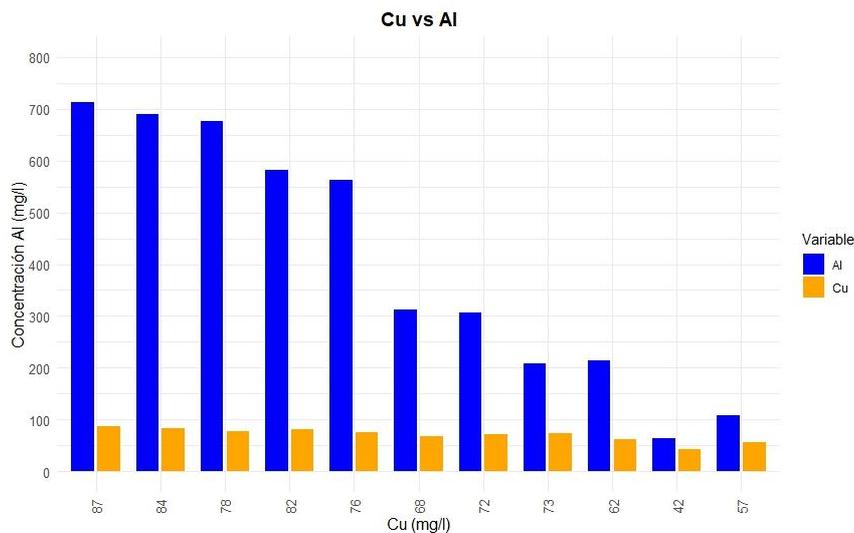


La imagen número 20 muestra las concentraciones de aluminio (Al) y hierro (Fe) en mg/l en los lodos sedimentables de la PTAP Mahuarcay. Se observa que las concentraciones de aluminio son consistentemente más altas que las de hierro esto indica que, en el proceso de sedimentación, cuando hay más hierro, tiende a haber también una mayor concentración de aluminio presente en los lodos sedimentables. Esta relación puede ser útil para entender y optimizar los procesos de tratamiento de agua, ya que la presencia de hierro podría estar influyendo en la concentración de aluminio en los lodos.

5.1.5. PRESENCIA DE COBRE EN EL LODO

La presencia de cobre en el lodo sedimentable puede influir en la calidad y estabilidad del lodo, afectando su tratamiento y disposición. La presencia de cobre puede alterar las propiedades químicas y físicas del lodo, afectando su manejo y disposición final.

Imagen 21: Concentraciones de Al y Cu en los lodos sedimentables.

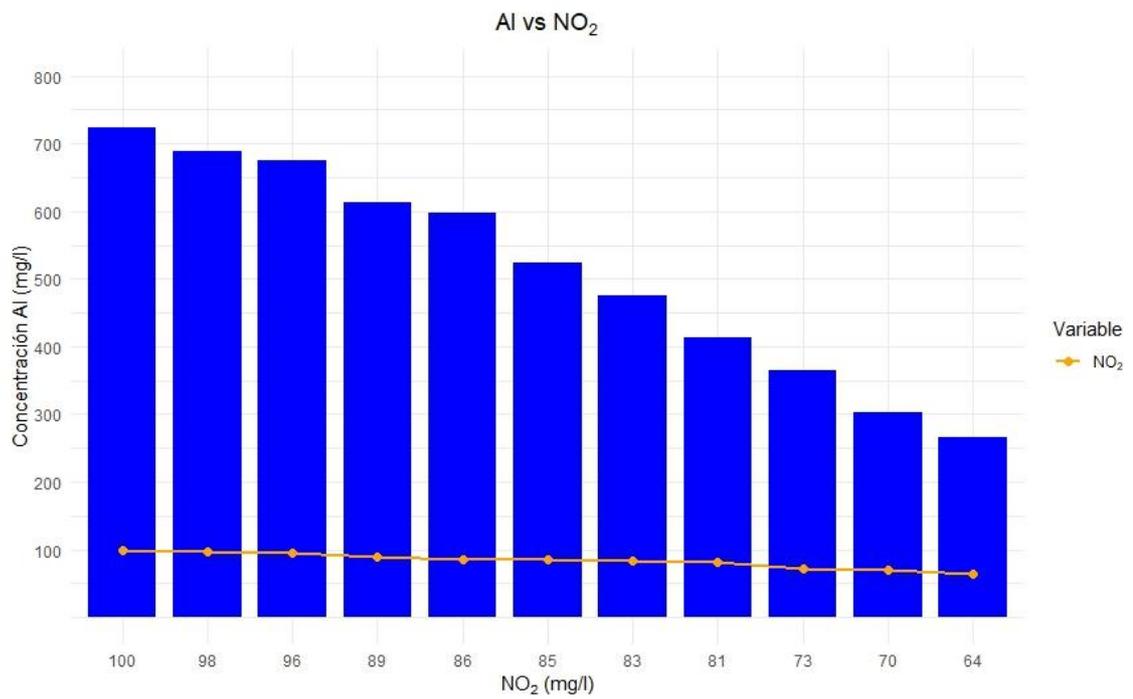


La imagen número 21 muestra las concentraciones de aluminio (Al) y cobre (Cu). Se observa que las concentraciones de aluminio son significativamente más altas que las de cobre. La distribución de las barras indica que, aunque hay una variabilidad en las concentraciones de aluminio, estas siguen una tendencia decreciente a medida que se reduce con poca variabilidad la concentración de cobre. La gráfica sugiere que, en los lodos analizados de la PTAP de Mahuarcay, los niveles de Al son mucho mayores que los niveles de Cu.

5.1.6. NITRITOS NO_2

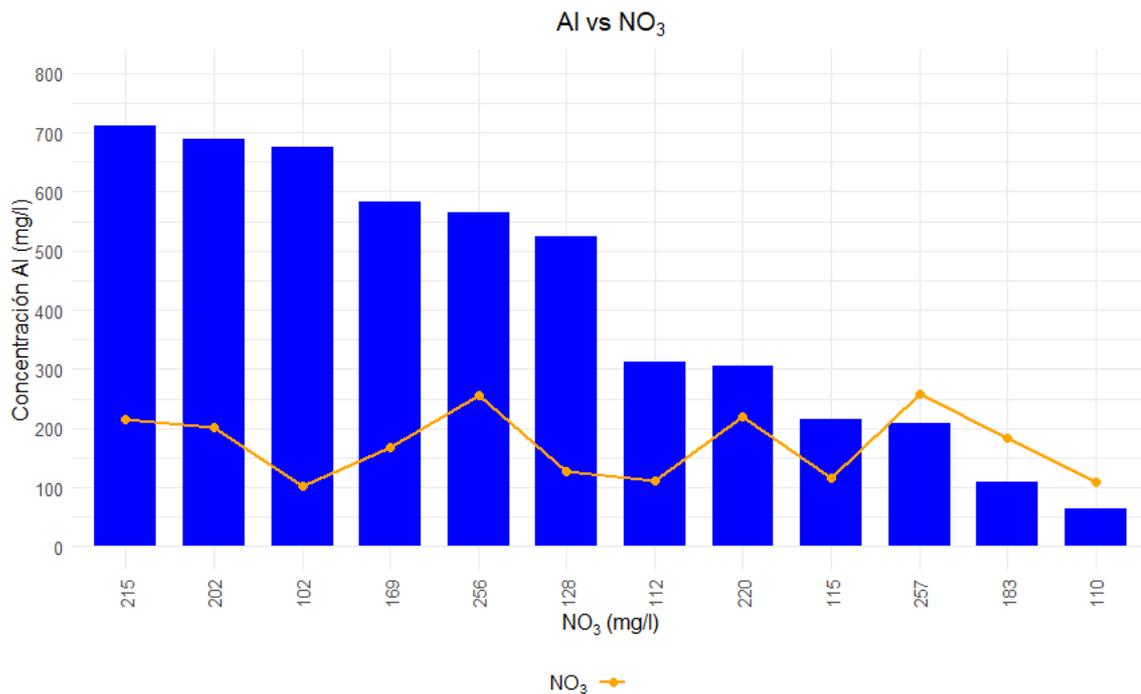
En la caracterización inicial de los lodos sedimentables se pudo observar que las concentraciones de aluminio residual no influían de una manera directa sobre las concentraciones en los nitritos del lodo residual, así lo demuestra la imagen numero 22 al observarse que los nitritos mantienen una tendencia casi lineal sin importar las concentraciones de aluminio.

Imagen 22: Concentraciones de Al vs comportamiento de NO₂



5.1.7. NITRATOS NO₃

Según los datos de la caracterización realizada en los lodos de potabilización de la PTAP Mahuarcay, la presencia de Nitratos conjuntamente con el aluminio residual, pueden influir de una manera directa en la eficacia del proceso de tratamiento y en la gestión final de los lodos.

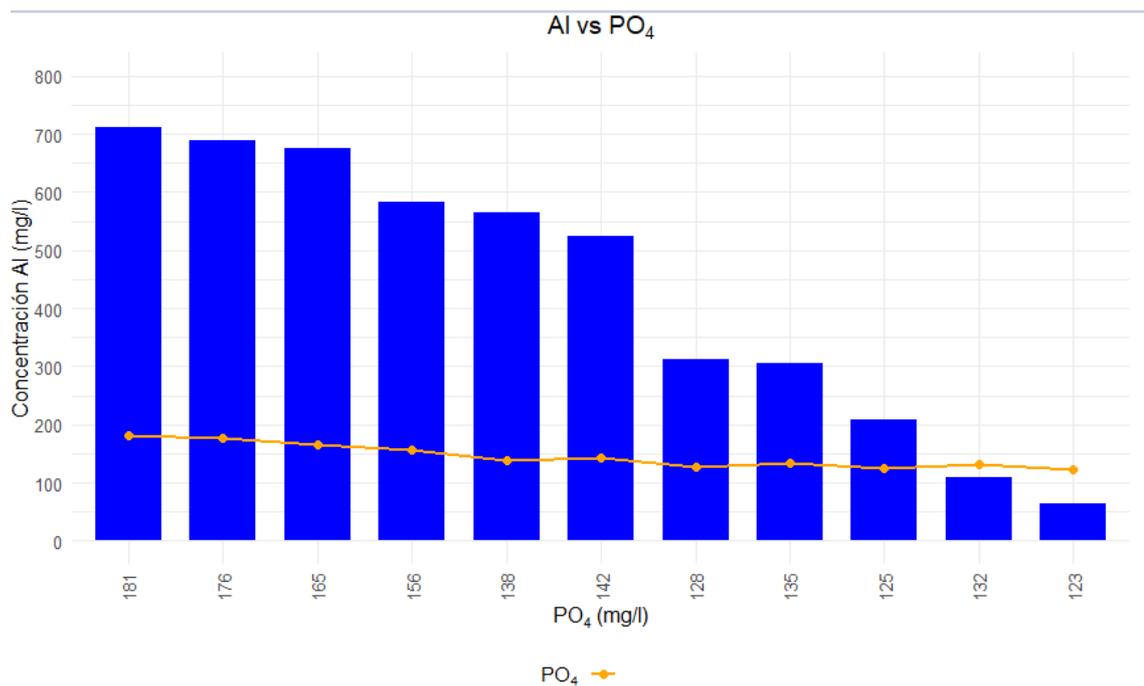
Imagen 23: Concentraciones de Al vs comportamiento de NO₃

La gráfica número 23 muestra la relación entre las concentraciones de Aluminio (Al) y Nitrato (NO₃). Las barras azules representan las concentraciones de Al, ordenadas de mayor a menor, con una máxima concentración alrededor de 712.3 mg/l y una mínima de 109.2 mg/l. La línea naranja con puntos muestra las concentraciones de NO₃, que varían entre 215 mg/l y 110 mg/l. Se observa que las concentraciones de NO₃ no siguen un patrón decreciente uniforme, sino que al contrario presentan variaciones significativas a lo largo de la serie. Esto indica que, aunque las concentraciones de Al disminuyen consistentemente, las concentraciones de NO₃ no muestran una correlación directa con la presencia del aluminio residual en los lodos.

5.1.8. FOSFORO PO₄

Las concentraciones de fósforo encontradas en el análisis inicial de los lodos se encuentran en parámetros aceptables de acuerdo con la normativa vigente. Las concentraciones altas de este compuesto en los lodos afectan directamente a su manejo y disposición final, ya que, el fósforo puede ser un nutriente limitante en muchos ecosistemas y su liberación debe ser controlada para la mitigación del impacto ambiental.

Imagen 24: Concentraciones de Al vs comportamiento de PO₄



La gráfica número 24 representa la relación entre las concentraciones de Aluminio (Al) y Fosfato (PO₄) en lodos aluminosos.

Las barras azules muestran las concentraciones de Al, ordenadas de mayor a menor. Se observa una variabilidad significativa en las concentraciones de Al, con valores que van desde 712.3 mg/l hasta 109.2 mg/l. La disminución continua de Al sugiere una variabilidad en la composición de los lodos aluminosos en las diferentes muestras analizadas. La línea naranja con puntos representa las concentraciones de PO₄ en los lodos, las concentraciones de PO₄ oscilan entre 181 mg/l y 123 mg/l, mostrando una tendencia decreciente, pero con menos variabilidad comparada con Al. La gráfica sugiere que a medida que se reducen las concentraciones de Al también existe una reducción en PO₄, lo cual puede reflejar una interacción entre estos compuestos en los procesos de tratamiento o formación de lodos aluminosos.

5.2. ENSAYOS DE TRATABILIDAD

Para identificar los porcentajes más efectivos de recuperación del coagulante, se llevaron a cabo experimentos para establecer los niveles ideales tanto de la variable de pH como los tiempos de mezcla adecuados en la recuperación del alumbre.

5.2.1. DETERMINACIÓN DEL PH OPTIMO

El pH óptimo para la recuperación del alumbre mediante la realización de tres pruebas distintas, que comprendieron nueve corridas en total. Estas pruebas evaluaron el comportamiento del proceso de recuperación a tres niveles de pH diferentes: 1.5, 2.5 y 3.5, bajo distintos tiempos de agitación que abarcaron 5, 30 y 90 minutos. Antes de iniciar este ensayo específico, se realizó una homogeneización completa de las muestras tomadas de los sedimentadores. Esta preparación preliminar involucró la mezcla de muestras de 1000 ml procedentes de cada uno de los seis sedimentadores presentes en la PTAP de Mahuarcay, garantizando así que las muestras fueran representativas y consistentes para la experimentación.

Después de llevar a cabo la experimentación en el equipo de jarras con los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Potables de Mahuarcay, se encontró que el pH más efectivo para la recuperación de coagulantes es de 1.5 unidades, alcanzando una recuperación del 95% en un periodo de mezcla de 30 minutos. No obstante, con un pH de 2.5, se lograron porcentajes de recuperación, específicamente de un 75% en el mismo intervalo de tiempo; la recuperación del coagulante que represento las menores concentraciones fueron con los tiempo de agitación de 90 minutos y un pH de 3.5 con porcentajes de recuperación de 59%.

5.3. DISCUSIÓN

Al contrastar nuestros hallazgos con investigaciones previas, tales como Villegas et al. (2018), Jácome (2020), y Castro y Reyes (2022), nuestros resultados corroboran la efectividad del pH 1.5 en la recuperación del alumbre. En términos de las concentraciones del alumbre, nuestra investigación muestra una mejora significativa en los porcentajes de recuperación comparados con los datos reportados por Jácome (2020), quien documentó una recuperación máxima del 86% del coagulante. Nuestros resultados indican un incremento en la eficiencia de recuperación, demostrando la optimización del proceso bajo las condiciones experimentales aplicadas. Esta comparativa subraya la relevancia de nuestro estudio en la mejora continua de los procedimientos de tratamiento y recuperación de coagulantes.

En comparación con (Gamarra & Romero, 2019) logramos una menor concentración en la recuperación del coagulante ya que en la investigación citada se recupera hasta un 99% del coagulante con un pH de 2 con iguales tiempo de mezclas.

Las concentraciones del alumbre recuperado varían en cada investigación, esto se debe principalmente a las etapas de muestreo y al temporal que se manifieste en cada PTAP, ya que en una época de precipitaciones existirá una mayor concentración del coagulante en los lodos sedimentables, mas no así en época de bajas precipitaciones. En otras palabras, cuando existe mayor precipitación a menudo en las PTAP se utiliza una mayor cantidad de sulfato de aluminio. Esto se debe a que la lluvia puede aumentar la turbidez y la cantidad de materia orgánica en el agua, lo que requiere una mayor cantidad de coagulantes, como el sulfato de aluminio, para clarificar el agua de manera efectiva.

Otro punto de suma importancia es encontrar el punto exacto en la dosificación del coagulante en los procesos iniciales del tratamiento del agua potable.

El porcentaje de recuperación del coagulante se obtuvo evaluando la concentración de aluminio en el sobrenadante. Tabla 11 muestra que las concentraciones de recuperación están directamente relacionadas con la cantidad de ácido sulfúrico utilizado, lo cual afecta el pH alcanzado. Cuanto más bajo es el pH, mayor es la concentración de aluminio en el sobrenadante, lo que requiere el uso de una mayor cantidad de ácido sulfúrico. Es decir, a mayor acidificación de los lodos existe un mayor porcentaje de recuperación del coagulante.

La recuperación del sulfato de aluminio puede mejorar al reducir el pH a menos de 1.5. Esto se debe a que un pH más bajo aumenta la solubilidad del aluminio, lo que facilita su disolución y, por lo tanto, su recuperación de los lodos aluminosos. Pero al contar con un pH extremadamente representaría un alto costo operacional ya que se necesitaría grandes volúmenes de H_2SO_4 en altas concentraciones.

Además del costo operacional; la seguridad y el manejo de estas sustancias representarían riesgos para el personal que este encargado del almacenamiento y manipulación del ácido que puede provocar quemaduras químicas y la liberación de vapores de una alta peligrosidad.

Tabla 11: Concentraciones de aluminio en función del pH y el tiempo de mezclado

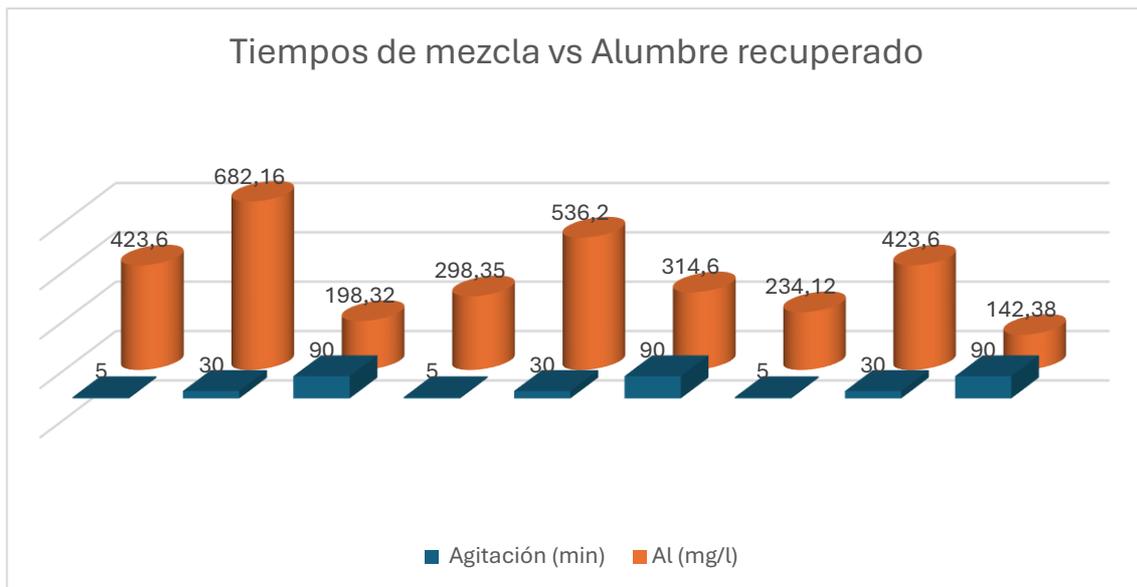
pH	Agitación (min)	Al (mg/l)	Media de la recuperación del coagulante
1.5	5	423.6	434.69
	30	682.16	
	90	198.32	
2.5	5	298.35	383.05
	30	536.2	
	90	314.6	
3.5	5	234.12	266.7
	30	423.6	
	90	142.38	

5.3.1. TIEMPO DE MEZCLA

En la Tabla 11 se aprecia que los mayores porcentajes de recuperación de aluminio se lograron con un tiempo de mezcla de 30 minutos, independientemente del pH al

que estaba sometida la solución. El porcentaje más alto de recuperación a un pH de 1.5 fue de 682.16 mg/l de alumbre a 30 minutos de mezcla. Para un pH de 2.5, la recuperación fue de 536.2 mg/l de alumbre a 30 minutos, y a un pH de 3.5, el mayor porcentaje de recuperación fue de 426.6 mg/l de alumbre a los 30 minutos, siendo este tiempo el que mejor resultados nos brindó en la recuperación del coagulante.

Imagen 25: Concentraciones de Coagulante recuperado según tiempo de agitación



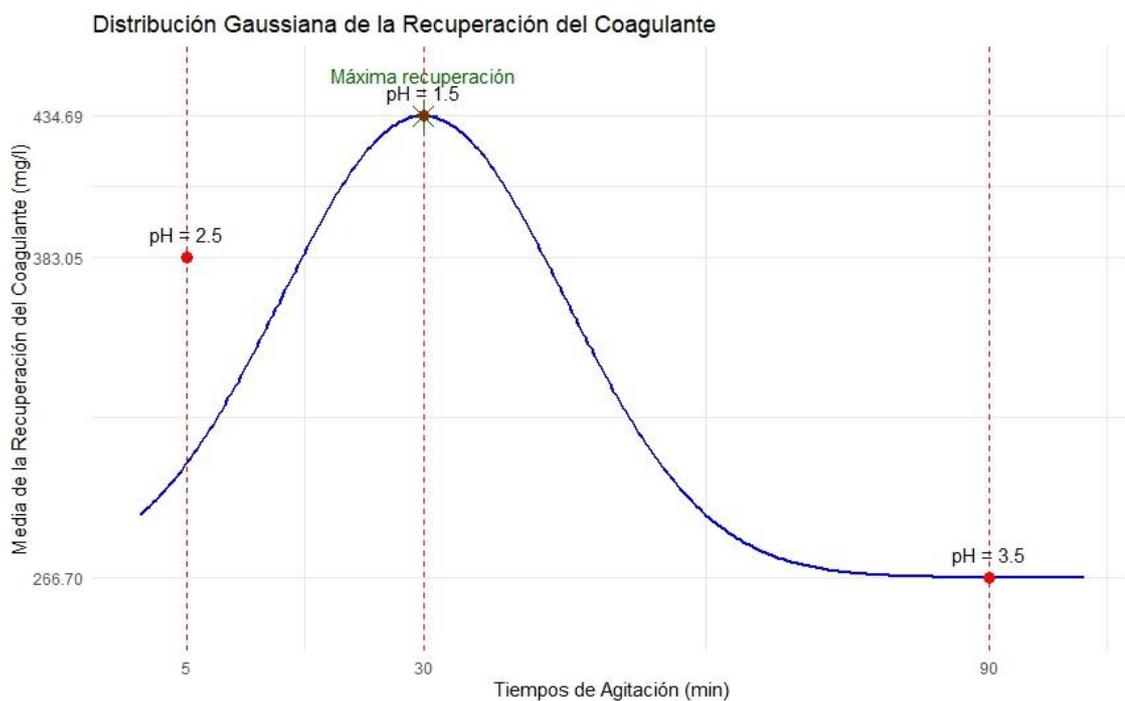
Como podemos observar en la imagen 26 obtenemos mayores concentraciones del alumbre recuperado con un tiempo de agitación de 30 minutos, con una concentración máxima de Alumbre de 682.16 mg/l, en cuanto a los tiempos de mezcla de 5 minutos optemos una concentración máxima de 423.6 mg/l.

Finalmente, con un tiempo de agitación de 90 minutos, la concentración del coagulante recuperado disminuye a un mínimo de 142.38 mg/l.

Una de las razones de esta reducción en la concentración del coagulante recuperado es la desintegración de los flóculos, ya que el aumento de la velocidad de los agitadores mecánicos en la prueba de jarras puede causar la ruptura de estos.

Finalmente, con un tiempo de agitación de 90 minutos, la concentración del coagulante recuperado disminuye a un mínimo de 142.38 mg/l. Una de las razones de esta reducción en la concentración del coagulante recuperado es la desintegración de los flóculos, ya que el aumento de la velocidad de los agitadores mecánicos en la prueba de jarras puede causar la ruptura de los flóculos. Se puede observar de mejor manera este comportamiento mediante una grafica gaussiana como se lo demuestra en la imagen número 27.

Imagen 26: Grafica de la recuperación del coagulante con relación al pH y tiempo de mezcla



La grafica numero 27 muestra la distribución gaussiana de la recuperación del coagulante en función del tiempo de agitación y el pH. Los puntos destacados en la gráfica representan diferentes pH y tiempos de agitación:

- **pH = 1.5, Agitación = 30 min:** Este punto se encuentra en el pico de la curva, indicando la mayor recuperación del coagulante con una media de 434.69 mg/l, marcada como "Máxima recuperación".

- **pH = 2.5, Agitación = 5 min:** Este punto está en la parte ascendente de la curva con una media de recuperación de 383.05 mg/l.
- **pH = 3.5, Agitación = 90 min:** Este punto se encuentra en la parte descendente de la curva, con una media de recuperación de 266.70 mg/l.

La curva muestra que el mejor resultado en términos de recuperación del coagulante se logra con un pH de 1.5 y un tiempo de agitación de 30 minutos. La recuperación del coagulante disminuye a medida que se alejan de estas condiciones.

5.3.2. CARACTERIZACIÓN DEL COAGULANTE RECUPERADO

Después de un periodo de espera de 60 minutos de sedimentación, se tomaron muestras del sobrenadante, que corresponde al coagulante recuperado. Además de medir la concentración de aluminio en el sobrenadante, se evaluaron algunas características para compararlas con las de los coagulantes comerciales. Los resultados de la caracterización del coagulante recuperado se presenta en la tabla número 12, que muestra los datos a un pH de 1.5 y un tiempo de mezcla de 30 minutos de mezcla, se utilizó este pH y tiempo de mezcla por ser la corrida que nos brindó las mayores concentraciones del coagulante recuperado.

Tabla 12: Caracterización del sobrenadante.

Al (mg/l)	pH	Color	Turbidez (NTU)
682.16	1.46	538	12.809

La Tabla 12 presenta el resultado más eficiente en la recuperación del coagulante, con una concentración de aluminio de 682.16 mg/l. Esto indica que el coagulante es rico en aluminio, logrando una recuperación del 95%. Este porcentaje obtenido en los ensayos de tratabilidad sugiere que la alúmina recuperada podría ser efectiva para la coagulación en las etapas iniciales del tratamiento de agua cruda.

El pH del coagulante recuperado se sitúa en 1.46, tal como se ilustra en la imagen número 28, indicando un pH notablemente ácido. Este valor es coherente con el

proceso de recuperación del coagulante que se realizó a un pH de 1.5. Un pH tan bajo puede ser beneficioso en ciertos procedimientos, sin embargo, normalmente requeriría ajustes adicionales si se destina a aplicaciones en las cuales el control del pH es crucial. La acidez significativa del coagulante sugiere que podría ser necesario implementar etapas de neutralización o ajuste del pH para asegurar su compatibilidad y eficacia en procesos donde el pH debe ser controlado estrictamente.

Además, este nivel de acidez debe ser considerado en el diseño de los procesos de tratamiento posteriores, para evitar posibles efectos adversos en el rendimiento del sistema de tratamiento de agua. La gestión adecuada del pH del coagulante recuperado es esencial para optimizar su utilización y maximizar la eficiencia global del tratamiento de agua cruda.

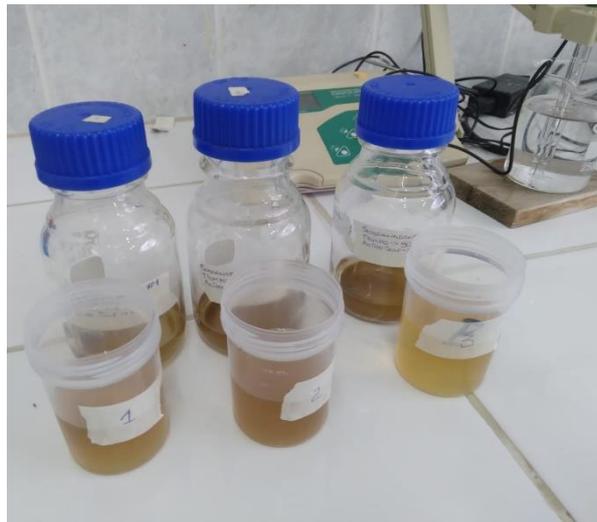
Imagen 27: pH del coagulante recuperado



El color del coagulante es de 538 Pt-Co. Esto se debe a que el coagulante recuperado manifiesta un tono oscuro. Esto podría ser debido a impurezas o a compuestos orgánicos presentes en el coagulante recuperado o fallas en su filtración o separación del lodo sedimentable (Imagen 15). Además de esto la presencia de ácido sulfúrico H_2SO_4 está presente en el coagulante recuperado debido a su uso

como agente acidificante para disolver los compuestos de aluminio, facilitando así la recuperación del coagulante. Su presencia también contribuye al color oscuro del coagulante por un posible exceso de ácido agregado durante el proceso de acidificación. El exceso de H_2SO_4 permanece en el sobrenadante recuperado, resaltando su presencia con un tono oscuro como se puede observar en la imagen número 29.

Imagen 28: Color de los sobrenadantes recuperados.



La determinación del parámetro de turbidez se llevó a cabo conforme a las especificaciones del Método Estándar 2130, tal como se especifica en el Anexo 1. Se registró una turbidez de 12.809 NTU, indicando que el coagulante presenta una turbidez significativa. Esta característica puede comprometer su eficacia o requerir intervenciones adicionales para optimizar su claridad, según sea necesario. En conclusión, aunque el coagulante recuperado posee una concentración elevada de aluminio, también presenta un pH ácido y una tonalidad oscura.

5.3.3. ENSAYOS CON EL COAGULANTE RECUPERADO.

Se llevaron a cabo ensayos en el equipo de Jar Test utilizando el coagulante recuperado para poder medir su eficiencia en los procesos iniciales del tratamiento del agua, para esto se recolectaron 6 muestras de (1lt) de agua cruda de la entrada a la PTAP de Mahuarca para posteriormente medir su pH, color, turbidez y STD.

Los valores iniciales del agua cruda en cuanto a estos parámetros se detallan en la tabla número 13.

Tabla 13: Características iniciales del agua cruda

Agua cruda	
pH	7.74
Color	53
Turbidez(NTU)	8.16
STD	94

- **pH:** El valor es 7.74, lo que indica que el agua es neutral o ligeramente alcalina.
- **Color:** El valor es 53, lo que sugiere que el agua tiene algo de color, pero no es muy alto.
- **Turbidez:** El valor es 8.16 NTU, lo que indica una ligera turbidez.
- **STD:** Un valor de 94 en los sólidos totales disueltos (STD) en agua cruda indica que hay 94 miligramos de sólidos disueltos por litro de agua. Los sólidos totales disueltos representan la cantidad de sustancias inorgánicas y orgánicas presentes en una muestra de agua en forma molecular, ionizada o microgranular.

5.4. DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE COAGULANTE RECUPERADO.

Para la determinación de la dosis del coagulante se utilizó el equipo convencional de jarras, que comúnmente se emplea en la PTAP de Mahuarcay (Anexo 3), este procedimiento es esencial para poder determinar con precisión la cantidad necesaria de coagulante recuperado para el tratamiento del agua cruda en sus procesos iniciales. Para este ensayo se siguió la metodología indicada por el manual de uso del equipo JarTester Phipps & Bird, modelo PB-700™ indicados en el Anexo 2.

Luego de realizar el ensayo con el coagulante recuperado, se obtuvieron los siguientes resultados expuestos en la tabla número 14

Tabla 14: Resultados del test de jarras.

# Jarra	Dosis(mg/l)	Turbidez(NTU)	Color	pH	STD
1	10	7.19	69	5.16	99.4
2	20	7.28	56	5.01	100.02
3	30	8.45	68	5.72	103.7
4	40	3.15	49	6.65	106.1
5	50	4.56	76	5.36	109.1
6	60	4.95	73	6.04	112

Como se puede observar en la tabla número 14, los resultados óptimos en términos de reducción de turbidez y color se lograron en la jarra número 4. Estos resultados específicos están detalladamente representados en las imágenes número 30 y 31, respectivamente.

Imagen 29: Resultado optimo turbidez



Imagen 30: Resultado optimo color



La jarra número 4 ha demostrado una notable eficiencia en la disminución de estos parámetros, sugiriendo su superioridad comparativa frente a las otras jarras utilizadas en los ensayos.

La notable disminución en los niveles de color y turbidez evidencia la efectividad del coagulante recuperado a través de procesos de acidificación, y se confirma que la alúmina recuperada cumple con los estándares establecidos por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108:2014, específicamente con relación a la turbidez, pero no se logró cumplir con los parámetros de color. Esta discrepancia en el cumplimiento normativo respecto al color puede atribuirse a diversos factores técnicos. Es posible

que la dosificación de 40 mg/l de coagulante por litro de agua cruda, aunque adecuada para la reducción de turbidez, no haya sido suficiente para alcanzar los niveles deseados de decoloración. Además, factores como la naturaleza y concentración de los compuestos colorantes presentes en el agua cruda, así como las características intrínsecas del coagulante recuperado (color oscuro debido a la formación de H_2SO_4), podrían haber influido en la eficiencia del proceso de reducción de color. La optimización adicional de la dosificación y posiblemente la combinación con otros tratamientos auxiliares (uso de polímero) podrían ser necesarios para cumplir con los estrictos límites de color establecidos por la normativa.

En cuanto pH se obtuvo un valor de 6.65 como lo indica la imagen número 32, como se puede observar es un valor que está muy cercano está bastante cercano al neutro (pH 7), lo cual es generalmente favorable para la mayoría de los procesos de tratamiento de agua potable.

Imagen 31: Resultado optimo en el parámetro pH



Este pH es adecuado para procesos de desinfección, ya que muchos desinfectantes, como el cloro, funcionan eficientemente en este rango de pH. Además, un pH cercano a neutro reduce la corrosividad del agua, lo que es beneficioso para la infraestructura de distribución y almacenamiento del agua.

Según la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108:2014, el rango de pH aceptable para agua potable está generalmente entre 6.5 y 9.0, y un pH de 6.65 está dentro de este rango, cumpliendo con los estándares de potabilidad. Aunque un pH de 6.65 es adecuado, el tratamiento de agua puede requerir ajustes adicionales si se necesita un pH más específico para ciertos procesos o aplicaciones específicas. En conclusión, un pH de 6.65 logrado con el uso del coagulante recuperado es generalmente bueno, ya que se encuentra dentro del rango aceptable para agua potable y favorece muchos aspectos del tratamiento y distribución del agua.

5.4.1. ANÁLISIS DEL SEDIMENTABLE

Antes de desechar el material sedimentable (lodos resultantes de la recuperación del coagulante), se llevó a cabo una prueba de pH y se analizó el aluminio residual. Tras obtener los resultados, se compararon con la normativa vigente.

Tabla 15: Análisis del sedimentable

Resultados del sedimentable	
pH	6.04
Al (mg/l)	32.46

En la tabla número 15 puede observar que el pH de los lodos se aproxima a la neutralidad, y que el aluminio remanente es de 32.46 mg/l, este valor representaría aproximadamente al 5% de alumbre que no pudo ser recuperado durante el proceso de acidificación de lodos. De acuerdo al “Acuerdo Ministerial 097-A, Anexos de Normativa, REFORMA LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE”.

Los límites máximos permisibles para poder realizar la descarga de este tipo de residuo a un cuerpo de agua o a su vez a los sistemas de alcantarillado público, es de mínimo 5mg/l de Al. de acuerdo con esta normativa vigente en nuestro país podemos manifestar que el coagulante recuperado no cumpliría con la normativa.

Cabe destacar que, sin realizar este proceso de recuperación del Alumbre residual en los lodos sedimentables, se estaría desechando este residuo con una concentración en los lodos de 712.3 mg/l de Aluminio residual directamente a los cauces del río Burgay, o a su vez a la quebrada del mismo nombre de la PTAP. Con el proceso de acidificación y recuperación de este metal se logró disminuir su grado de toxicidad aproximadamente en un 90%.

6. CONCLUSIONES

Se logró una recuperación del 95% de sulfato de aluminio a partir de lodos aluminosos generados en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Mahuarcay, utilizando una metodología de acidificación con ácido sulfúrico a escala de laboratorio. Los ensayos de tratabilidad aplicados a estos lodos determinaron que las condiciones óptimas para la recuperación del coagulante incluyen un pH de 1.5 y un tiempo de agitación de 30 minutos a una velocidad constante de 100 revoluciones por minuto.

En condiciones óptimas, se alcanzó un 95% de recuperación de alumbre, evidenciando que el pH es el principal factor que influye en la recuperación de sulfato de aluminio. Además, el tiempo y la velocidad de mezcla son críticos para la eficiencia del proceso. Los tiempos de mezcla de 30 y 90 minutos resultaron ser los más efectivos para la recuperación del coagulante, , mientras que períodos de 5 minutos son insuficientes para obtener una mezcla homogénea debido a la viscosidad y densidad de la solución.

En conclusión, aunque el aluminio tiene una toxicidad relativamente baja, el cobre es significativamente más preocupante debido a su mayor toxicidad para los organismos acuáticos y su capacidad de causar problemas de salud en concentraciones elevadas. Por lo tanto, la presencia de cobre en los lodos exige un manejo más riguroso y potencialmente más costoso para evitar la contaminación del suelo o del agua, especialmente si los lodos no se gestionan o utilizan de manera adecuada.

Después de la acidificación y recuperación del coagulante de los lodos, el pH de estos tiende a la neutralidad. Sin embargo, el contenido residual de aluminio se mantiene en 30.18 mg/l. De acuerdo con el "Acuerdo Ministerial 097-A, Anexos de Normativa, REFORMA LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE", los límites de descarga de aluminio residual en cuerpos de agua deben ser como mínimo de 5,0 mg/l de Al. Por tanto,

los lodos sedimentables post-acidificación no cumplen con los criterios establecidos en esta normativa.

7. REFERENCIAS

- Agudelo, A., Gutiérrez, F., & Builes, P. (2017). Pathogens and microbiological indicators of the quality of water for human consumption. *SciELO*, 1.
- Agudelo, K., & Aguilar, J. (2022). *CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA DE LLUVIA, CASO DE ESTUDIO VEREDA AGUA FRÍA DEL MUNICIPIO DE AGUA DE DIOS CUNDINAMARCA, PARA EL DISEÑO Y MONTAJE DE UN PROTOTIPO POTABILIZADOR DEL AGUA*. FACULTAD DE INGENIERÍA .
- Alvarado, M., & Mayancela, E. (2022). *Optimización del proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca*. Universidad De Cuenca.
- ARCA. (2014). *Agencia de Regulación y Control del Agua* (Patent 1).
- Basantes, L., & García, K. (2020). *TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS PROVENIENTES DE POSTCOSECHA DE FLORÍCOLAS MEDIANTE OXIDACIÓN AVANZADA*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Blanco, P. (2014). *APROVECHAMIENTO DE LODOS RESIDUALES PARA CERRAR EL CICLO URBANO DEL AGUA, MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y REDUCIR LOS GEI: CASO DE LA PITAR NUEVO LAREDO*. El Colegio DE la Frontera Norte .
- Calle, R. (2017). *“COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA EN LAS PLANTAS UCHUPUCÚN Y MAHUARCAY DE LA CIUDAD DE AZOGUES*. UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- Carbajal, A., & González, M. (2012). *Propiedades y funciones biológicas del agua*. Facultad de Farmacia, Universidad Complutense de Madrid.
- Castro, V., & Reyes, J. (2022). *RECUPERACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO A PARTIR DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN LA PLANTA POTABILIZADORA HERMINIA CABELLO SÁNCHEZ*. UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL.
- Coral, B. (2021). *SOSTENIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS Y TRANSFORMACIONES EN MODELOS AGRARIOS COMUNALES EN ECUADOR. EL CASO DE POZA HONDA 1970-2010 MANABÍ ECUADOR: UN CASO DESDE EL ANÁLISIS DE LA ECONOMÍA INSTITUCIONAL*. Universidad de Valladolid.

- Díaz, D. (2017). *Aprovechamiento del sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A, para la clarificación de agua*. Universidad Técnica de Ambato.
- Fernández, G., & Tusó, W. (2020). *DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE PARA LA POBLACIÓN DE MULALÓ, PROVINCIA DE COTOPAXI*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Gago, A., & Chambergo, R. (2020). *ESTUDIO TERMODINÁMICO DE LA TEMPERATURA DE CONGELACIÓN DE MEZCLAS REFRIGERANTES ETANOL - AGUA Y PROPILENGLICOL – AGUA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ.
- Galarza, A., & Barros, M. (2022). *Filtración sostenible para la provisión de agua potable en comunidades rurales en desarrollo utilizando biochar generado localmente*. Universidad De Cuenca.
- Gamarra, L., & Romero, J. (2019a). Evaluación de la recuperación de aluminio En medio ácido de los lodos generados en Una planta de tratamiento de agua potable. *Universidad Nacional Del Centro Del Perú*, 1, 4–7.
- Gamarra, L., & Romero, J. (2019b). *Evaluación de la recuperación de aluminio En medio ácido de los lodos generados en Una planta de tratamiento de agua potable*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ.
- Gavilanes, M. (2015). *DISEÑO DE UNA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA PARA LA ZONA URBANA DEL CANTÓN GUANO PROVINCIA DE CHIMBORAZO [FACULTAD DE CIENCIAS]*. ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO.
- Gomezcoello, M., & Quintuña, J. (2018). *EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AGUA POTABLE DE LA PLANTA POTABILIZADORA DEL CANTÓN CHORDELEG*. UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- Gutiérrez, J., Ramírez, Á., Rivas, R., & Paredes, D. (2020). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Revista de Ingenierías*, 16.
- INEN 1108. (2006). NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. *Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN)*.
- Jácome, J. (2020). *RECUPERACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE BAÑOS SECTOR COCHAPAMBA, CUENCA*. UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- López, J., & Rivas, J. (2018). *ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA EMAARS-EP EN LA ESTANCILLA*,

**MEDIANTE COMPOSTAJE. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ.**

- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108: Agua Potable - Requisitos Microbiológicos, Físicos y Químicos., Pub. L. No. 6, Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2019).
- Pacheco, M., & Santander, E. (2022). *Optimización del proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca.* Universidad De Cuenca .
- Urgilés, D., & Viñansaca, A. (2019). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA EN LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN EMAPAL-EP EN LA COMUNIDAD DE ZHINDILIG.* UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- Urgilés, S., & Vintimilla, C. (2023). *Evaluación hidráulica y propuesta de rediseño del sedimentador de al.* Universidad de Cuenca.
- Vallejo, B., & Ullauri, M. (2022). *Evaluación de la dosificación de policloruro de aluminio sobre el rendimiento de la coagulación – floculación en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas.* Universidad De Cuenca.
- Villegas, J., Castaño, J., & Paredes, D. (2018). *RECUPERACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO A PARTIR DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA.* Dialnet, 1.
- Zambrano, S. (2021). *Estudio de la influencia de las fuentes antropogénicas sobre la calidad del agua de la cuenca media y baja del río Ambato.* UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO.
- Zhinson, C. (2011). *TRATAMIENTO DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE MAHUARCAY MEDIANTE EL USO DE UN LECHO DE SECADO.* UNIVERSIDAD DE CUENCA.

8. ANEXOS

ANEXO 1: Caracterización inicial de los lodos sedimentables de la PTAP de Mahuarcay. Para la determinación de todos los parámetros descritos en nuestra investigación se realizó el ensayo mediante la metodología indicada por el manual del espectrofotómetro HACH DR 2500

Determinación de las concentraciones iniciales de aluminio (Al):

Descripción: las fuentes más comunes de aluminio en el agua de uso y consumo humano son el aluminio de origen natural y las sales de aluminio utilizadas como coagulantes en el tratamiento del agua. La presencia de aluminio en determinadas concentraciones suele ocasionar la precipitación del floculo de hidróxido de aluminio en los sistemas de distribución y el aumento de la coloración del agua por el hierro, confiriendo al agua un color y turbiedad no deseables. Por lo tanto, es importante optimizar los procesos de tratamiento con el fin de minimizar la presencia de residuos de aluminio en el sistema de distribución (OMS, 2018).

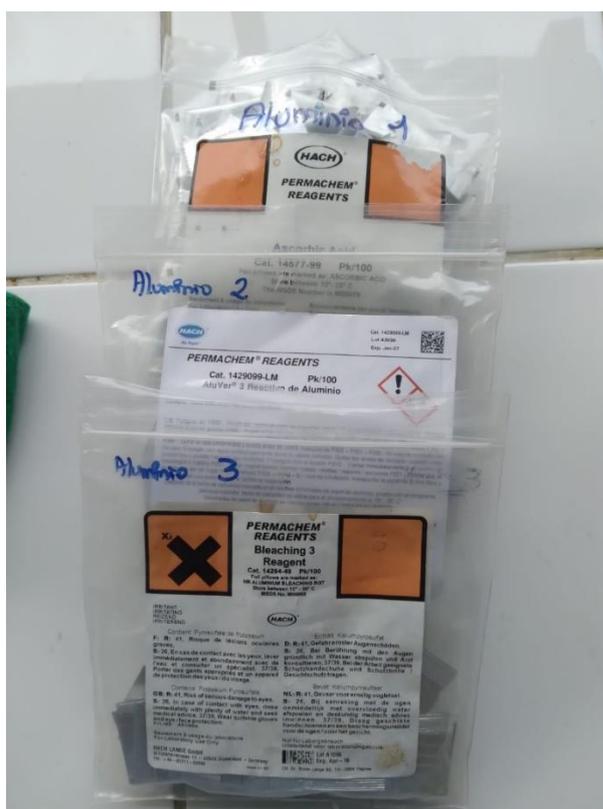
Objetivo: determinar aluminio en una muestra de agua mediante un método espectrofotométrico.

Procedimiento:

1. Encender el equipo, presionar **Programas Hach**. Presionar **Sel. por Número**, presionar **10** y **OK**. Ver **10 Aluminio** y presionar **Comenzar**.
2. Llenar una probeta de 50 ml con la muestra.
3. Adicionar el contenido de un sobre del reactivo *Ascorbic Acid Powder Pillow*. Tapar la probeta. Agitar fuertemente invirtiendo la probeta hasta disolver el polvo.
4. Adicionar el contenido de un sobre del reactivo *AluVer 3 Reagent Powder Pillow*. Tapar la probeta.
5. Presionar el icono del **Cronómetro** y presionar **Comenzar**. Invertir repetidamente la probeta para disolver el polvo. Polvo sin disolver puede causar resultados inconsistentes.

- 6.
7. Colocar 25 ml de la mezcla en una celda de 25 ml (**muestra preparada**).
8. Adicionar el contenido de un sobre del reactivo *Bleaching 3 Reagent Powder Pillow* en la probeta que contienen los 25 ml restantes de la mezcla. Tapar la probeta.
9. Presionar el icono del **Cronómetro**, y presionar **Comenzar**. Agitar vigorosamente por 30 segundos (esta solución tomara un color ligeramente naranja).
10. Colocar los 25 ml de la solución en una segunda celda de 25 ml (**blanco**).
11. Presionar el icono del **Cronómetro** y presionar **Comenzar**. Comenzará un periodo de 15 minutos de reacción.
12. Durante los 5 minutos después que suena el **beep** limpiar la celda del blanco y colocar en el equipo.
13. Presionar **Cero**. El display mostrará: **0.000 mg/L Al³⁺**.
14. Inmediatamente limpiar la muestra preparada y colocarla en el equipo. Los resultados aparecerán en **mg/L Al³⁺**.

Reactivos utilizados para el ensayo



Determinación las concentraciones iniciales de Hierro (Fe) :

Descripción: en el suministro de agua potable, las sales de hierro (II) son inestables y se precipitan como hidróxido de hierro (III) insoluble, que se deposita como limo de naranja rojizo (OMS, 2018). Para su determinación, tres moléculas de fenantrolina producen la quelación de cada átomo de hierro ferroso para formar un complejo anaranjado-rojo (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2000).

Objetivo: determinar el hierro total presente en una muestra de agua mediante un método espectrofotométrico.

Procedimiento:

1. Encender el equipo, presionar **Programas Hach**. Presionar **Sel. Por Número**, presionar **255** y **OK**, ver **80 Cloro L&T**, y presionar Comenzar.
2. Llenar una celda con 10 ml de la muestra (**blanco**).
3. Limpiar el blanco, colocar en el equipo y cerrar el cobertor.
4. Presionar **CERO**. El display mostrará **0.00 mg/L Cl₂**.
5. Llenar otra celda con 10 ml de la muestra.
6. Adicionar, a la nueva celda, el contenido de un sobre del reactivo *DPD Free Chlorine Powder Pillow*, tapar la celda (**muestra preparada**). Agitar para disolver el polvo durante 20 segundos.
7. Limpiar la celda de la muestra preparada y colocar en el equipo. El resultado aparecerá en **mg/L Cl₂**.

Reactivos utilizados para el ensayo



Determinación las concentraciones iniciales de Nitratos (NO₃) :

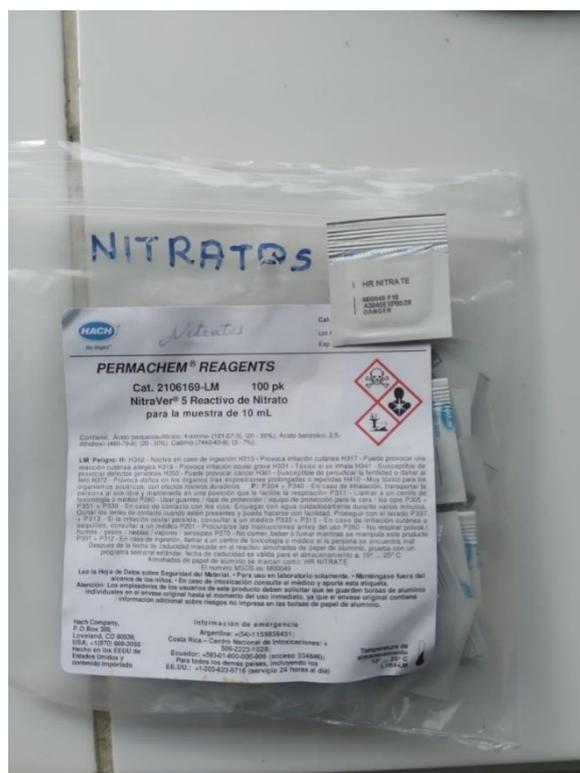
Descripción: los nitratos pueden llegar a las aguas superficiales y subterráneas como consecuencia de la actividad agrícola (incluida la aplicación excesiva de abonos, del tratamiento de las aguas residuales y de la oxidación de los residuos nitrogenados en las excretas humanas y animales, incluidas las fosas sépticas (OMS, 2018).

Objetivo: determinar los nitratos presentes en una muestra de agua mediante un método espectrofotométrico.

Procedimiento:

1. Encender el equipo. Presionar **Programas Hach**. Presionar **Sel. por Número**, presionar **355** y **OK**. Ver **355 N, Nitrato EA**, y presionar **Comenzar**.
2. Llenar una celda con 10 ml. de la muestra.
3. Adicionar el contenido de un sobre del reactivo *NitraVer 5 Nitrate Reagent Powder Pillow* (**muestra preparada**). Tapar la celda.
4. Presionar el icono de **Cronómetro** y revisar que este seleccionado **Agitar 01:00** y presionar **Comenzar**. Comienza el período de un minuto de reacción. **Agitar** la celda vigorosamente hasta que suene un **beep**.
5. Cuando suena el beep, presionar el icono de **Cronómetro**, revisar que esté seleccionado **Temporiz. 05:00** y presionar **Comenzar**. Comienza el período de cinco minutos de reacción. Un color ámbar indicará la presencia de nitrato.
6. Cuando suena el beep llene una segunda muestra de 10 ml (**blanco**).
7. Limpiar el blanco, colocarlo en el equipo y cerrar con el cobertor.
8. Presionar **CERO**. El display le mostrará **0.0 mg/L NO₃⁻-N**.
9. Dentro de un minuto después que suena un beep, limpiar la muestra preparada y colocarla en el interior del equipo. Los resultados aparecerán en **mg/L NO₃⁻-N**.

Reactivos utilizados para el ensayo



Determinación de las concentraciones iniciales de Nitritos (NO_2) :

Descripción: el nitrito es un estado intermedio de oxidación del nitrógeno y no suele estar presente en concentraciones significativas. El nitrito también puede formarse químicamente en las tuberías de distribución por la bacteria Nitrosomonas durante el estancamiento en tuberías de acero galvanizado de agua potable que contiene nitratos y es pobre en oxígeno (OMS, 2018).

Objetivo: determinar los nitritos en una muestra de agua mediante un método espectrofotométrico.

Procedimiento:

1. Encender el equipo, presionar **Programas Hach**. Presionar **Sel. por Número**, presionar **371** y **OK**. Ver **371 N, Nitrito EB** y presionar **Comenzar**.
2. Llenar una celda con 10 ml de la muestra.
3. Agregar un sobre del reactivo *NitriVer 3Reagent Powder Pillow (muestra preparada)*. Tapar y agitar para disolver. Un color rosa indica la presencia de nitritos.

4. Presionar icono del **Cronómetro**, y presionar **Comenzar**. Empezará un periodo de 20 minutos de reacción.
5. Cuando suena el **beep**, llenar una segunda celda con 10mL de muestra (**blanco**).
6. Limpiar la celda del blanco y colocar en el equipo.
7. Presionar **Cero**. El display mostrará **0.000 mg/L NO₂-N**.
8. Limpiar la muestra preparada y colocarla en el equipo. Los resultados aparecerán en mg/L NO₂-N.

Reactivos utilizados para el ensayo



Determinación de las concentraciones iniciales de calcio (Ca) y Manganeso (Mg)

Descripción: es la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, y en particular se define como la concentración de iones de calcio y magnesio. Su determinación se realiza mediante una titulación con la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), el cual forma un quelato complejo soluble cuando se adiciona a una solución que contiene determinados cationes metálicos (INEN, 2016).

Objetivo: determinar la dureza total de una muestra de agua mediante titulación con EDTA.

Procedimiento:

1. Tomar 100ml de la muestra (medir en una probeta).
2. Colocar la muestra en un erlenmeyer.
3. Añadir 6 gotas de *solución buffer* y agitar.
4. Colocar un sobre del reactivo *Manver 2* y agitar, una solución roja indicará la presencia de dureza.
5. Titular con *EDTA* hasta cambio a color azul.
6. Multiplicar el número de ml gastados de *EDTA* por 10 para obtener los mg/L de dureza total como CaCO_3 (**DT**).

Reactivos utilizados para el ensayo



Determinación de las concentraciones iniciales de Cobre (Cu)

Descripción: las concentraciones de cobre en el agua de consumo humano varían mucho y la fuente principal más frecuente es la corrosión interior de las tuberías de cobre, por lo que tiñe el agua y confiere un sabor amargo no deseado. La concentración de cobre en el agua tratada suele aumentar durante la distribución, sobre todo en sistemas con pH ácido o en aguas con concentración alta de carbonato y pH alcalino (OMS, 2018).

Objetivo: determinar cobre en una muestra de agua mediante un método espectrofotométrico.

Procedimiento:

1. Encender el equipo, presionar **Programas Hach**. Presionar **Sel. por Número**, presionar **145** y **OK**. Ver **145 Copper, Porphyrin** y presionar **Comenzar**.
2. Llenar dos celdas con 10 ml de agua de muestra.
3. Adicionar el contenido de un sobre del reactivo *Copper Masking Reagent Powder Pillow* en una de las dos celdas (**blanco**). Agitar para disolver. La segunda celda es la **muestra preparada**.
4. Adicionar un sobre del reactivo *Porphyrin 1 Reagent Powder Pillow* a cada celda. Agitar para disolver.
5. Adicionar un sobre del reactivo *Porphyrin. 2 Reagent Powder Pillow* a cada celda. Agitar para disolver. **NOTA:** Si hay presencia de cobre, la muestra se tornará momentáneamente de color azul, luego regresa al color amarillo.
6. Presionar el icono del **Cronómetro** y presionar **OK**. Un período de 3 minutos de reacción comenzará.
7. Cuando suena el **beep**, limpiar la celda del blanco y colocar en el equipo.
8. Presionar **Cero**. El display mostrará: **0 ug/L Cu**.
9. Inmediatamente limpiar la muestra preparada y colocarla en el equipo. Los resultados aparecerán en **ug/L Cu**.

Reactivos utilizados para el ensayo



Determinación de las concentraciones iniciales de Fosforo (PO_4)

Descripción: el fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, los cuales se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados y fosfatos orgánicos. El análisis de fósforo implica la reacción del molibdato de amonio y el tartrato de antimonio y potasio en medio ácido con el ortofosfato para formar un heteropoliácido (ácido fosfomolibdico) que es reducido por ácido ascórbico a un complejo azul de molibdeno intensamente coloreado; sólo las formas de ortofosfato forman dicho color azul en esta prueba (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2007).

Objetivo: determinar fosfato en una muestra de agua mediante un método espectrofotométrico.

Procedimiento:

1. Encender el equipo, presionar **Programas Hach**. Presionar **Sel. por Número**, presionar **490** y **OK**. Ver **490 P React. PV** y presionar **Comenzar**.
2. Llenar una celda con 10 ml de la muestra.
3. Adicionar el contenido de un sobre del reactivo *PhosVer 3Phosphate Powder Pillow* a la muestra. Inmediatamente tapar la celda e invertir para mezclar (**muestra preparada**).
4. Presionar el icono del **Cronómetro** y presionar **Comenzar**, comenzará un período de dos minutos de reacción.
5. Llenar otra celda con 10 ml de la muestra (**blanco**).
6. Cuando suena un beep, limpiar la celda del blanco y colocar en el equipo.
7. Presionar **Cero**. El display mostrará: **0.00 mg/L PO₄³⁻**.
8. Limpiar la muestra preparada y colocar en el equipo. Los resultados aparecerán en **mg/L PO₄³⁻**.



DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS

Descripción: los sólidos totales hacen referencia a la materia suspendida o disuelta en aguas. La cantidad de sustancias disueltas en el agua es definida analíticamente como residuo filtrable total, constituido por sales inorgánicas y cantidades de materia orgánica presentes en solución en agua. Los principales componentes suelen ser: cationes de calcio, magnesio, sodio, potasio y aniones carbonato, bicarbonato, aniones cloruro, sulfato y nitrato (Standard Methods 2540).

Objetivo: determinar la cantidad de sólidos totales disueltos en una muestra de agua

Procedimiento:

1. Colocar aproximadamente 150 ml de la muestra en un recipiente.
2. Encender el medidor de STD.
3. Introducir el medidor en el recipiente con la muestra.
4. Esperar que la lectura se estabilice y medir.
5. Apagar el medidor de STD.



DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD

Descripción: la turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que hace que la luz se disperse y absorba en lugar de transmitirse sin cambio de dirección o nivel de flujo a través de la muestra. Se debe a materiales suspendidos coloidales o particulados originados por microorganismos, sustancias inorgánicas finamente divididas, como arena, fango, arcilla y materiales orgánicos. El método nefelométrico se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión de referencia estándar en las mismas condiciones (Standard Methods 2130).

Objetivo: determinar la turbiedad de una muestra de agua mediante un método nefelométrico.

Procedimiento:

1. Colocar la muestra en la celda y llenar hasta la marca de color blanco.
2. Limpiar y secar la celda utilizando papel toalla. Asegúrese de que el frasco esté libre de humedad y huellas dactilares.
3. Prender el equipo (turbidímetro **2100P** marca **HACH**) presionando la tecla “**POWER**”
4. Calibrar el equipo, presionando la tecla “**RANGE**” hasta que se lea en la pantalla **AUTO RN**. Luego presionar la tela “**SIGNAL AVERAGE**” se verá en la pantalla **SIG AUG**.
5. Introducir la celda en el compartimiento del equipo y cerrar la tapa.
6. Presionar la tecla marcada como “**READ**”.
7. El equipo empieza a trabajar. Esperar hasta obtener una lectura estable.
8. Leer el valor en pantalla y anotar el resultado en el registro de control de operación.
9. Retirar la celda del equipo.
10. Desechar la muestra y lavar la celda.



Turbidímetro DR/2100P.

DETERMINACIÓN DEL pH Y LA TEMPERATURA

Descripción: el pH es una medida de la actividad de los iones hidrógeno en solución e indica la acidez o la alcalinidad del agua. La determinación del valor de pH se basa en la medida de la diferencia de potencial de una célula electroquímica utilizando un pH-metro adecuado. El pH de una muestra depende de la temperatura debido al equilibrio de disociación, por lo tanto siempre se indica la temperatura de la muestra junto con la medida del pH (INEN, 2014).

Objetivo: determinar el pH y la temperatura de una muestra de agua mediante un pH-metro.

Procedimiento:

1. Encender el pH metro presionando la tecla **ON/OFF**.
2. Levantar el electrodo del agua potable que está en el vaso de precipitación.
3. En el recipiente que contiene aproximadamente 200 ml de la muestra introducir el electrodo.
4. Esperar el tiempo necesario hasta que se estabilice y aparezca la palabra **READY** en el display.
5. Leer el pH y la temperatura.
6. Levantar el electrodo de la muestra y colocarlo nuevamente en el vaso de precipitación que contiene agua potable.
7. Apagar el equipo presionando la tecla **ON/OFF**.

pH-metro OAKTON pH 510.



ANEXO 2: Prueba de jarras según la metodología indicada por el manual de uso del equipo JarTester Phipps & Bird, modelo PB-700™

Descripción: la prueba de jarras se describe como una simulación a escala de laboratorio de los procesos de tratamiento de agua de coagulación/floculación/sedimentación. Los resultados obtenidos mediante esta prueba son especialmente valiosos para el operador de la instalación a la hora de realizar ajustes en los procesos de tratamiento en respuesta a los cambios en la calidad del agua (Lytle, 1995).

Objetivo: determinar la dosis óptima de coagulante y de floculante para el tratamiento del agua mediante una simulación de las condiciones de operación en la planta.

Procedimiento:

SULFATO DE ALUMINIO (Coagulante recuperado)

- 1.** Tomar la muestra de agua cruda a la entrada del vertedero (aproximadamente 30 litros).
- 2.** Realizar las mediciones de: TURBIEDAD, COLOR, pH, TEMPERATURA, STD.
- 3.** Colocar el agua cruda en las 6 jarras hasta la marca (2 litros).
- 4.** Medir en las jeringas la dosis de SULFATO DE ALUMINIO a aplicar a cada jarra (10,20,30,40,50,60) mg/l del coagulante.
- 5.** Encender el equipo, agitar a 295 rpm durante 1 minuto y añadir la dosis respectiva a cada jarra.
- 6.** Agitar durante 7 minutos a 65 rpm.
- 7.** Agitar durante 10 minutos a 40 rpm.
- 8.** Agitar durante 8 minutos a 25 rpm.
- 9.** Agitar durante 20 minutos a 2 rpm.
- 10.** Tomar muestras de las 6 jarras y realizar las mediciones de: TURBIEDAD, COLOR, pH, TEMPERATURA, STD.
- 11.** Definir la dosis óptima de SULFATO DE ALUMINIO con los resultados de las mediciones.

Muestras de agua cruda

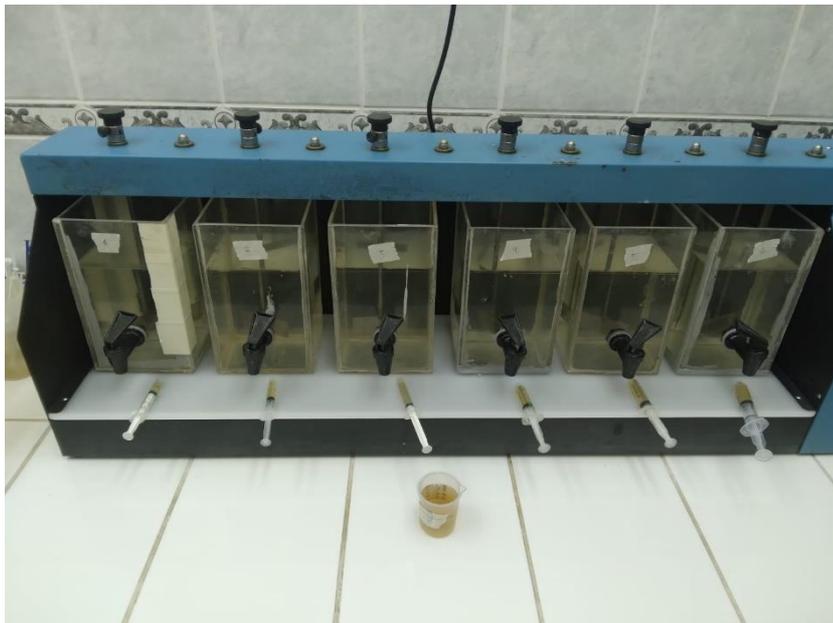


Prueba de jarras con agua cruda



ANEXO 3: Prueba de jarras con el coagulante recuperado.

Jeringas con cada dosis de coagulante recuperado según metodología



Aplicación del coagulante recuperado según dosis establecida.

