

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Evaluación de la eficiencia de los coagulantes orgánicos con respecto a los coagulantes inorgánicos utilizados en el tratamiento primario de un agua residual.

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Jennifer Melissa Galarza Tituana

María Andrea Suárez Moncada

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi hija ,
Danna, quien ha sido mi mayor motivación en
el cumplimiento de esta meta, espero que este
logro la llene de orgullo y a su vez sea un
impulso para que logre sus propósitos.

A mis padres, Freddy Galarza y Amelia
Tituana quienes me brindaron su apoyo
incondicional para poder alcanzar uno de mis
objetivos.

A mis hermanos, Karen y Jesael quienes
contribuyeron en este proceso.

A Ruddy, por su amor, apoyo y compañía, a
pesar de la distancia, ha sido quien me ha
escuchado y motivado en cada una de las
decisiones que he tomado.

A mí, porque este camino ha sido muy difícil,
me tocó postergar mis estudios en varias
ocasiones, debido a pruebas que nos pone la
vida, pero al fin puedo decir lo logré.

Jennifer Melissa Galarza Tituana

Dedicatoria

A Dios, por cada día demostrarme que está presente y bendecirme en cada etapa de este proceso.

A mis queridos padres, Alberto y María, por siempre creer en mí y ser mi mayor ejemplo para seguir.

Gracias por todo su amor y todos sus sacrificios. Este logro es para ustedes.

María Andrea Suárez Moncada

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer a Dios porque sin su infinita sabiduría y voluntad no hubiese sido posible llegar al fin de esta etapa.

Al PhD. David Matamoros, quien, en calidad de tutor, nos brindó las pautas necesarias para el progreso de este proyecto.

A la empresa pública de agua y de forma especial al Ing. Luis Chuquimarca quien nos facilitó la toma de muestras de agua residual.

Por último, al Laboratorio de tratamiento de aguas, a sus profesores encargados, al técnico docente y a la ayudante, quienes ayudaron en la parte experimental desarrollada en este proyecto.

Declaración expresa

Nosotras Jenniffer Melissa Galarza Tituana y María Andrea Suárez Moncada acordamos y reconocemos que la titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, información no divulgada y cualquier otro derecho o tipo de Propiedad Intelectual que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada durante el desarrollo de su trabajo de titulación, incluyendo cualquier derecho de participación de beneficios o de valor sobre titularidad de derechos, pertenecerán de forma total, perpetua, exclusiva e indivisible a LA ESPOL, sin limitación de ningún tipo. Se deja además expresa constancia de que lo aquí establecido constituye un “previo acuerdo”, así como de ser posible bajo la normativa vigente de transferencia o cesión a favor de la ESPOL de todo derecho o porcentaje de titularidad que pueda existir.

Sin perjuicio de lo anterior los alumnos firmantes de la presente declaración reciben en este acto una licencia de uso gratuita e intransferible de plazo indefinido para el uso no comercial de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada durante el desarrollo de su trabajo de titulación, sin perjuicio de lo cual deberán contar con una autorización previa expresa de la ESPOL para difundir públicamente el contenido de la investigación, desarrollo tecnológico o invención.

Así también autorizamos expresamente a que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra o invento, por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.

Guayaquil, 1 de septiembre del 2023.



Jenniffer Melissa Galarza
Tituana


MARIA ANDREA SUAREZ MONCADA

María Andrea Suárez
Moncada

Evaluadores

MSc. Nadia Flores
Profesor de Materia

PhD. David Matamoros
Tutor de proyecto

Resumen

En Ecuador, el agua residual de consumo doméstico que recibe tratamiento corresponde solo al 25%, mientras que el restante 75% es descargado directamente a los cuerpos de agua dulce. En la comunidad Chimborazo, provincia de “El Oro” se lleva a cabo una descarga de agua residual sin tratamiento. Por ende, el enfoque de este proyecto consiste en encontrar el coagulante óptimo para esta muestra de agua, comparando coagulantes naturales como la moringa, polvillo de arroz con el coagulante inorgánico sulfato de aluminio. La experimentación consistió en una caracterización inicial para determinar los límites permisibles de descarga, seguido de prueba de jarras con pruebas de selección de coagulante, ajuste de pH y ajuste de dosificación. El sulfato de aluminio presentó la mayor remoción de turbidez con un 72.20%, seguido de la moringa con un 53.87% y el polvillo de arroz fue descartado debido a presentar la menor eficiencia de remoción de turbidez. Además, se analizaron los parámetros de sólidos totales y sólidos suspendidos totales por su relación con la presencia de turbidez. Finalmente se determinó que la moringa fue el coagulante óptimo para la muestra de agua puesto que presentó reducción de turbidez sin afectar el pH de la muestra, motivo por el cual también resulto más rentable que el sulfato de aluminio.

Palabras Clave: agua residual, moringa, polvillo de arroz, sulfato de aluminio, test de jarras, remoción de turbidez.

Abstract

In Ecuador, the percentage of domestic wastewater that receives treatment corresponds to only 25%, the remaining 75% is discharged directly into fresh water sources. In the Chimborazo community, in the province of "El Oro" there is a wastewater current that gets directly discharge into the river without treatment. Therefore, the focus of this integrative project is to find the optimal coagulant for this water sample, comparing natural coagulants such as moringa and rice husk with the inorganic coagulant aluminum sulfate. The experimentation consisted of an initial characterization to determine the permissible discharge limits, followed by a jar test with coagulant selection tests, pH adjustment, and dosage adjustment. Aluminum sulfate had the highest turbidity removal with 72.20%, followed by moringa with 53.87%, but rice husk was discarded due to presenting the lowest turbidity removal efficiency. In addition, the parameters of total solids and total suspended solids were analyzed for their relationship with the presence of turbidity. Finally, it was determined that moringa was the optimal coagulant for the water sample since it presented a reduction in turbidity without affecting the pH of the sample, which also made it more profitable than aluminum sulfate.

Keywords: Wastewater, moringa, rice husk, aluminum sulfate, jar test, turbidity removal.

Tabla de Contenido

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Tabla de Contenido	III
Abreviaturas	V
Simbología	VI
Índice de Figuras.....	VIII
Índice de Tablas	IX
Capítulo 1	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del Problema	3
1.2 Justificación del Problema	4
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Marco Teórico	7
1.4.1 Contaminación del Agua en el Mundo.....	7
1.4.2 Contaminación del Agua en Ecuador.....	7
1.4.3 Aguas Residuales	8
1.4.4 Tratamiento Primario de Aguas Residuales	8
1.4.5 Coagulación y Floculación Como Tratamiento Químico Primario del Agua..	9
1.4.6 Tipos de Coagulantes Utilizados en el Tratamiento Químico Primario del	9
Agua	
1.4.7 Factores que Afectan a la Coagulación.....	10
1.4.8 Test de Jarras.....	12
Capítulo 2.....	13
2. Metodología	14
2.1 Toma de Muestra.....	16
2.2 Caracterización Inicial de Muestra de Agua Residual	17
2.2.1 Determinación de Sólidos Totales.....	17
2.2.2 Determinación de Turbidez.....	18

2.2.3	Determinación de Conductividad	19
2.2.4	Determinación de pH	20
2.2.5	Determinación de Dureza Total	20
2.2.6	Determinación de Alcalinidad.....	21
2.2.7	Determinación de Cloruros	22
2.3	Preparación de los Coagulantes Orgánicos	22
2.4	Test de Jarras	23
2.4.1	Selección del Mejor Coagulante	24
2.4.2	Ensayo de Ajuste de pH	24
2.4.3	Ensayo de Optimización de la Dosis de Coagulante en las Condiciones de pH Establecidas	25
2.5	Caracterización Final de la Muestra.....	26
2.6	Análisis Económico.....	26
Capítulo 3	.....	27
3.	Resultados y Análisis	28
3.1	Resultados de la Caracterización Inicial de la Muestra de Agua Residual	28
3.2	Resultados de las Pruebas de Test de Jarras	31
3.2.1	Resultados de la Prueba de Selección del Mejor Coagulante	31
3.2.2	Resultados de la Prueba de Optimización del pH.....	36
3.2.3	Resultados de la Prueba de Ajuste de Dosificación de los Coagulantes.....	37
3.2.4	Resultados de la Caracterización Final	38
3.2.5	Resultados de Adaptación de Procedimiento de Moringa Laboratorio vs. Campo	40
3.2.6	Resultados del análisis económico.....	42
Capítulo 4	.....	46
4.	Conclusiones y recomendaciones	47
4.1	Conclusiones	47
4.2	Recomendaciones.....	49
Referencias	.....	50
Apéndice A	.....	57
Apéndice B	.....	58
Apéndice C	.....	61

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FCNM	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
ST	Sólidos Totales
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SFT	Sólidos Fijos Totales
SVT	Sólidos Volátiles Totales
PTAR	Planta de tratamiento de agua residual
Mat.Org.	Materia orgánica
SENAGUA	Secretaría Nacional del Agua
COA	Código Orgánico Ambiental
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas

Simbología

gal	Galones
°C	Grados Celsius
g	Gramo
Km ²	Kilómetro cuadrado
L	Litro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
μs/cm	Microsiemens por centímetro
min	Minutos
mL	Mililitro
mg	Miligramo
rpm	Revoluciones por minuto
EDTA	Ácido Etilendiaminotetraacético
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
Cl ⁻	Cloruros
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
K ₂ CrO ₄	Dicromato de Potasio
P	Fósforo
NaOH	Hidróxido de Sodio
Ca ²⁺	Ion calcio
Mg ²⁺	Ion magnesio
M	Molaridad
N	Normalidad
NeT	Negro de Eriocromo T
AgNO ₃	Nitrato de Plata
N	Nitrógeno
pH	Potencial de Hidrógeno
Al ₂ (SO ₄) ₃	Sulfato de aluminio

NTU

Unidades Nefelométricas de Turbidez

Índice de Figuras

Figura 1 Set up Test de Jarras	12
Figura 2 Diagrama de metodología de proyecto integrador	14
Figura 3 Lugar de toma de muestra en la Comunidad Chimborazo, El Guabo, El Oro .	17
Figura 4 Turbidímetro portátil HACH – Laboratorio de Tratamiento de Agua-ESPOL	19
Figura 5 Conductímetro marca HACH. Laboratorio de Tratamiento de Agua- ESPOL	19
Figura 6 pH-metro Marca HACH. Laboratorio de Tratamiento de Agua-ESPOL	20
Figura 7 Reducción de la turbidez del agua según el coagulante utilizado	34
Figura 8 Afectación del pH del agua según el coagulante utilizado	35
Figura 9 Reducción de la turbidez del agua para diferentes valores iniciales de pH	36
Figura 10 Reducción de la turbidez del agua para diferentes dosis de coagulantes	38
Figura 11 Comparación de los coagulantes de moringa obtenidos por laboratorio y por campo	41
Figura 12 Costo anual de implementación por tipo de coagulante.....	45

Índice de Tablas

Tabla 1 Descripción de las variables del diseño experimental.....	15
Tabla 2 Parámetros a considerar en el cálculo de sólidos totales.....	17
Tabla 3 Set-up para prueba de selección de coagulante	24
Tabla 4 Set-up de ajuste de pH.....	24
Tabla 5 Set-up del ensayo de ajuste de dosis de coagulante	25
Tabla 6 Resultados de caracterización inicial del agua residual	28
Tabla 7 Resultados del ensayo de selección del mejor coagulante	32
Tabla 8 Ensayo de optimización de pH para los coagulantes	36
Tabla 9 Dosis óptima de coagulantes	37
Tabla 10 Caracterización final de parámetros con respecto a límites permisibles.....	38
Tabla 11 Adaptación del procedimiento de obtención del coagulante de moringa	40
Tabla 12 Comparación del porcentaje de remoción de turbidez del coagulante de moringa	40
Tabla 13 Costos totales para el coagulante de moringa	42
Tabla 14 Costos totales para el coagulante de sulfato de aluminio.....	43
Tabla 15 Límites permisibles de descarga de aguas residuales en cuerpos de agua dulce	57
Tabla 16 Datos de la caracterización inicial.....	58
Tabla 17 Datos de sólidos totales de muestra de agua residual.....	58
Tabla 18 Determinación de sólidos totales de la muestra de agua residual	59
Tabla 19 Datos de sólidos totales de muestra de agua residual tratada con sulfato de aluminio	59

Tabla 20 Determinación de sólidos totales en muestra de agua tratada con sulfato de aluminio	59
Tabla 21 Datos de sólidos totales de muestra de agua residual tratada con coagulante de moringa	60
Tabla 22 Determinación de sólidos totales en muestra de agua tratada con el coagulante de moringa.....	60

Capítulo 1

1. Introducción

El cantón El Guabo tiene una población de aproximadamente 50000 habitantes (INEC, 2010). Actualmente la cobertura de agua potable cubre totalmente el área urbana debido a la repotenciación de la planta potabilizadora de agua, a finales del año 2022, se encuentra ubicada en el sitio El Vergel; mientras que en el área rural todavía hay carencias del suministro del líquido vital. Otro aspecto de importancia son las aguas residuales de uso doméstico del cantón, sus parroquias y sitios, ya que no reciben tratamiento, debido a la falta de recursos económicos.

En el sitio Chimborazo perteneciente al cantón el Guabo, se lleva a cabo una descarga directa de agua residual al río San Miguel de Brasil, lo cual genera problemas como la degradación de la calidad del agua, disminución de la vida acuática, enfermedades en los habitantes de la comunidad, entre otros. Por consiguiente, en este proyecto se propone la reducción de los sólidos totales (ST) y sólidos suspendidos totales (SST) presentes en el efluente de agua residual, mediante el uso de coagulantes-floculantes orgánicos a base de moringa y polvillo de arroz , y un coagulante inorgánico sulfato de aluminio.

La experimentación se llevará a cabo mediante un test de jarras, se espera que en el proceso de coagulación de la muestra de agua residual el rendimiento de al menos uno de coagulantes orgánicos sea igual o superior al coagulante inorgánico, debido a que poseen una alta eficiencia en su estructura polimérica y en la fuerza de las cargas catiónicas .

El propósito del uso de coagulantes orgánicos para el tratamiento del efluente es la reducción del impacto ambiental disminuyendo la carga contaminante, con un producto eco amigable, cabe mencionar que el uso de coagulantes de origen orgánico otorga beneficios como; la reducción de costos, baja producción de lodos y ausencia de sales.

1.1 Descripción del Problema

En Ecuador, la infraestructura y los servicios de tratamiento de aguas residuales han mejorado gradualmente a lo largo de los años y el porcentaje de cobertura de estos servicios por parte de los municipios alcanzó un 74.25% en diciembre del 2021 (INEC, 2022). Sin embargo, aún existen situaciones por abordar; el 52.8% de agua residual no tratada corresponde a ríos, y el 32.9% corresponde a quebradas; de modo que, se evidencia contaminación de los cuerpos de agua del país (INEC, 2022).

En el cantón El Guabo, de la provincia El Oro, en una comunidad ubicada en el sitio Chimborazo, se ha detectado una descarga directa de agua residual al río, producto del consumo doméstico. Actualmente el efluente no recibe tratamiento puesto que, el cantón no cuenta con la implementación de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) por parte de la empresa municipal encargada del suministro de agua potable y tratamiento del agua residual.

Esta situación resulta de importancia puesto que el agua residual sin tratar genera graves problemas ambientales y de salud pública. Al verter el agua no tratada en las masas de agua, el agua residual se diluye y es conducida aguas abajo, o se infiltra en los acuíferos dañando la calidad de los suministros de agua dulce (WWAP, 2017). Los cuerpos receptores como ríos, lagos, el mar y corrientes subterráneas no tienen la capacidad para absorber por si solos la carga contaminante de agua residual.

Por otra parte, genera aspectos negativos como el cambio de la apariencia física, disminuye la calidad de la vida acuática y pone en peligro la conservación de las masas hídricas. Al contener altos niveles de contaminantes, como ST y SST, nitrógeno y patógenos; estos degradan la calidad del agua, provocando la eutrofización del río, el agotamiento del oxígeno y la alteración de los ecosistemas acuáticos. La materia orgánica puede causar efectos dañinos

dado que, al descomponerse, los microorganismos y patógenos se alimentan de materia orgánica muerta, ocasionando la aparición de malos olores y alta turbiedad debido al cambio de color del agua (Quispe Pérez, Piñas Rivera, Del Valle González, & Aguirre Chávez, 2020).

Adicionalmente, su descarga puede contaminar las aguas subterráneas, que sirven como fuente de agua potable para las comunidades (MetCalf, 1977). Es notorio el impacto que causa la contaminación, he aquí la importancia de la aplicación de técnicas y modelos que predigan el comportamiento de los organismos influyentes en la calidad de agua, decisivamente el agua residual antes de ser descargada al cuerpo receptor de agua debe recibir un tratamiento pertinente capaz de modificar condiciones físicas, químicas y microbiológicas.

En el presente proyecto integrador se pretende brindar una solución a la comunidad en cuestión, mediante el ofrecimiento de una alternativa sustentable y sostenible para la empresa municipal encargada del tratamiento y potabilización del agua, basándose en el uso de un coagulante-floculante orgánico que genere la remoción de ST y SST en el tratamiento primario del efluente de agua de consumo doméstico.

1.2 Justificación del Problema

Actualmente en Ecuador el 10 y 25% del agua residual de consumo doméstico recibe tratamiento mientras que porcentaje restante se descarga directamente en los cuerpos de agua (Sato, Qadir, Yamamoto, Endo, & Zahoor, 2013). De acuerdo con las estadísticas tabuladas por la Secretaría Nacional del agua (SENAGUA) la gran mayoría de ríos en el país a 2800 msnm presentan altos niveles de contaminación, generando que el agua no sea apta para el consumo humano. De acuerdo con las normas reglamentarias de materia ambiental en Ecuador todas las aguas residuales deben recibir tratamiento.

En el Código Orgánico Ambiental (COA), cuya vigencia empezó a partir del año 2018, se establecen las normas reglamentarias ecuatorianas en materia ambiental. En la (Ley 0, 2017, Art 196) menciona que “Cuando las aguas residuales no puedan llevarse al sistema de alcantarillado, su tratamiento deberá hacerse de modo que no perjudique las fuentes receptoras, los suelos o la vida silvestre”. Además, en la Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes del recurso agua , constan los valores máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce para Cloro, potencial de hidrógeno, sólidos suspendidos, sólidos totales, nitrógeno total y demás parámetros que modifican las características del agua.

Cabe destacar que la normativa ha sido caso omiso para las Gobiernos municipales, puesto en el país la mayoría de las ciudades no tienen una PTAR. Otra carencia es la falta de alcantarillados seccionados tanto para aguas residuales como para aguas de lluvias. Al descargar el agua servida directamente a la masa de agua, se generan impactos ambientales como sociales a los habitantes que viven cerca de donde se realiza la descarga, provocando que el agua que es usada para distintas actividades esté contaminada (Torske, 2019).

En consecuencia, los habitantes de dichas comunidades usan el agua ya que no tienen otra alternativa, además desconocen los daños que provoca en la salud debido a la reducción de calidad del agua, impactos ambientales por la degradación de los cuerpos de aguas y efectos negativos en las actividades económicas.

Dentro de los impactos ambientales se encuentra la eutrofización, provocada por altos niveles de fósforo y nitrógeno, la cual causa floraciones de algas tóxicas reduciendo la vida marina. El área marina considerada como zona muerta por la falta de oxígeno, afectada por la

descarga de aguas servidas es aproximadamente 245000 km², lo que perjudica directamente a la cadena alimenticia de los animales marinos.

La realización de este proyecto surge debido a la falta de tratamiento del agua residual perteneciente al uso doméstico por parte de los habitantes del sitio Chimborazo, puesto que es liberada directamente al río ya que no hay una PTAR en el cantón El Guabo. Su ejecución se realiza con el fin de que los moradores que viven en la comunidad y aguas abajo mejoren su calidad de vida, dado que ellos utilizan el agua del río para las distintas actividades como agricultura, recreación entre otras.

En el aspecto ambiental al brindar un tratamiento primario al agua residual se contribuye a la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua ya que la carga contaminante será menor, en el aspecto de salud se reducirá la exposición de los habitantes de la comunidad a distintas enfermedades producto de la contaminación especialmente en los niños quienes son los más propensos a contraerlas.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

Comparar dos coagulantes orgánicos con respecto al coagulante inorgánico sulfato de aluminio mediante un test de jarras para la determinación del coagulante óptimo en una muestra de agua residual.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

1. Determinar los parámetros fisicoquímicos de la muestra de agua antes y después de la selección del coagulante óptimo para su evaluación con respecto a los límites permisibles de descarga de efluentes según la normativa ecuatoriana.

2. Determinar el pH y dosis óptima del coagulante escogido para la clarificación de la muestra.
3. Comparar los costos totales del uso de coagulantes orgánicos frente al inorgánico para la evaluación de la viabilidad económica de la alternativa escogida.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Contaminación del Agua en el Mundo

El agua es un recurso mundial y su disponibilidad afecta directamente con el desarrollo de las sociedades, por ende, está relacionada con la mayoría de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). En el 2020, a nivel mundial, 2200 millones de personas no tenían acceso a agua potable y 4200 millones de personas no contaban con sistemas de saneamiento seguros (WWAP, 2020). Debido a esto, en las zonas urbanas y rurales en donde no se tiene abastecimiento del servicio de alcantarillado, las comunidades optan por el uso de pozos de agua privados, provocando la contaminación de aguas subterráneas. En el 2022, se detectó que el 30% de las instalaciones de agua subterránea en zonas rurales está contaminada de patógenos, los cuales aumentan el riesgo de enfermedades en las comunidades (WWAP, 2022).

1.4.2 Contaminación del Agua en Ecuador

En Ecuador, la infraestructura y los servicios de tratamiento de aguas residuales han mejorado a lo largo de los años y el porcentaje de cobertura de estos servicios por parte de los municipios alcanzó un 74.25% en diciembre del 2021 (INEC, 2022). Sin embargo, el 52.8% de los sitios de disposición final de agua residual no tratada corresponde a ríos, demostrando así una contaminación de los cuerpos de agua usados por las comunidades (INEC, 2022).

En la Provincia “El Oro” existen varias plantas de tratamiento de agua residual domésticas. La mayoría de las PTAR aplica técnicas físicas como la decantación de sólidos y el uso de filtros de retención de sólidos, sin embargo, no hay aplicaciones de tratamiento químico para reducir las concentraciones de contaminantes con las que los efluentes se descargan al río (Añazco & Sánchez, 2018).

1.4.3 Aguas Residuales

De forma general, las aguas residuales hacen referencia al agua de desecho proveniente de las actividades humanas ya sean domésticas, industriales, de agricultura o demás. Si el agua residual proviene de zonas rurales o urbanas domésticas, ésta contiene residuos de materia orgánica e inorgánica, jabón, detergente, grasas del lavado de platos, y materia fecal (Rodie & Hardenberg, 1987). Es indispensable brindar tratamiento al agua residual previo a su descarga a los cuerpos de agua como ríos o arroyos, para así lograr que sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas no sean perjudiciales para el medio ambiente.

1.4.4 Tratamiento Primario de Aguas Residuales

El tratamiento primario de aguas residuales tiene por objetivo la remoción del material sólido sedimentable y en suspensión para que el efluente contenga menor carga de contaminante y continúe en el ciclo del agua (Quispe Pérez, Piñas Rivera, Del Valle González, & Aguirre Chávez, 2020). Este procedimiento puede ser realizado de dos formas: métodos físicos y métodos químicos. En los métodos físicos se considera el proceso de sedimentación por gravedad o la remoción de arenas en desarenadores; mientras que en los métodos químicos se busca hacer uso de reactivos que eliminen partículas contaminantes del agua (Riffat & Rumana, 2014, págs. 110-150).

1.4.5 Coagulación y Floculación Como Tratamiento Químico Primario del Agua

Dentro de los procesos involucrados en un tratamiento primario químico se encuentran la coagulación y la floculación. La coagulación es un proceso en el cual ocurre una desestabilización de partículas de pequeño diámetro llamadas coloides, las cuales son responsables de que se aprecie turbidez o coloración opaca en el agua. Los coloides son desestabilizados por la adición de un reactivo denominado coagulante. Mientras que, en el caso de la floculación, este proceso hace referencia a la formación de aglomerados que resultan de la unión de partículas en suspensión que están presentes en el seno del líquido, fenómeno que se consigue una vez se añade al sistema un reactivo conocido como floculante (Nova, 2018, pág. 226).

1.4.6 Tipos de Coagulantes Utilizados en el Tratamiento Químico Primario del Agua

Existen diferentes tipos de coagulantes aplicados en el tratamiento de aguas. Estos pueden ser químicos, de materiales sintéticos o coagulantes naturales u orgánicos. Cada tipo de coagulante tiene sus propiedades y mecanismos específicos en los cuales sus iones positivos encapsularán a los iones negativos de los residuos para disminuir la turbidez del agua (Sand & Zaki, 2020, págs. 56-59).

1.4.6.1 Coagulantes Inorgánicos. Los coagulantes inorgánicos son en su mayoría sales de aluminio o sales de hierro, siendo la más utilizada el sulfato de aluminio (José & Suárez , 2019). Este tipo de coagulantes es el mayormente utilizado puesto que están ampliamente disponibles para las industrias y son efectivos en el proceso de coagulación. Sin embargo, cuentan con desventajas dado que se necesita una alta dosis de estos, su efectividad depende de la presencia de un pH alto y generan alta cantidad de lodos (Sand & Zaki, 2020, págs. 56-59). Adicionalmente, las altas dosis de hierro y aluminio en las descargas de estos efluentes provocan daños ambientales y de la salud humana, como lo son: estreñimientos y los cólicos abdominales. Especialmente los coagulantes férricos pueden oxidar tuberías y causar filtraciones en los sistemas de tratamiento (Sand & Zaki, 2020, págs. 56-59).

1.4.6.2 Coagulantes orgánicos. Considerando los factores medio ambientales y de salud humana de los coagulantes inorgánicos, muchas industrias han mostrado interés en la utilización de coagulantes orgánicos. Estos presentan una alternativa más natural para el tratamiento primario de aguas residuales. Entre ellos se pretende investigar a la moringa y el afrechillo de arroz. Con respecto a la moringa (*M. oleífera*), el compuesto activo de la semilla que provoca la coagulación es una proteína soluble que actúa en el proceso como un polielectrolito catiónico natural (Feria , Bermúdez, & Estrada, 2014). Similarmente, el afrechillo de arroz es un subproducto de la cosecha de arroz en nuestro país y posee abundancia de elementos catiónicos que lo hacen ideal para absorción de iones negativos (Huzir , Maniruzzaman, Ismail, & Mahmood, 2019).

1.4.7 Factores que Afectan a la Coagulación

Como todo proceso químico, el análisis de la coagulación y floculación depende considerablemente de las condiciones del sistema.

Gradiente de velocidad de la corriente del efluente a tratar

Si existe un gradiente de velocidad elevado, se fomenta la velocidad de sedimentación de las partículas en suspensión (Mackenzie, 2012, págs. 65-109).

Tiempo de coagulación

Si se ejecuta el proceso por un mayor periodo de tiempo, se obtendrá una mayor formación de flóculos.

pH del sistema

En el caso de los coagulantes inorgánicos, se conoce que la remoción de color se da en un rango de pH de 4.0-6.0 y que la eliminación de la turbiedad se da en un rango de pH del 6.5 a 8.5 (Lozano & Lozano, 2015).

Alcalinidad del agua

La alcalinidad del agua es su capacidad para neutralizar sustancias ácidas. Si este parámetro es muy bajo, se necesitará mayor dosis de coagulante, puesto que el agua no será capaz de amortiguar los cambios del pH del proceso (Lozano & Lozano, 2015).

Turbidez del agua

Este parámetro físico mide la cantidad de materia insoluble que está en suspensión en el cuerpo de agua. Se expresa en función de la capacidad para la transmitancia de luz al poner en contacto la muestra con un haz luminoso (Lozano & Lozano, 2015).

Coloración del agua

Capacidad que tiene el agua de absorber ciertas emisiones de radiación del espectro visible. Este indicador presenta una idea cualitativa del grado de contaminación que presenta un determinado cuerpo hídrico (Lozano & Lozano, 2015).

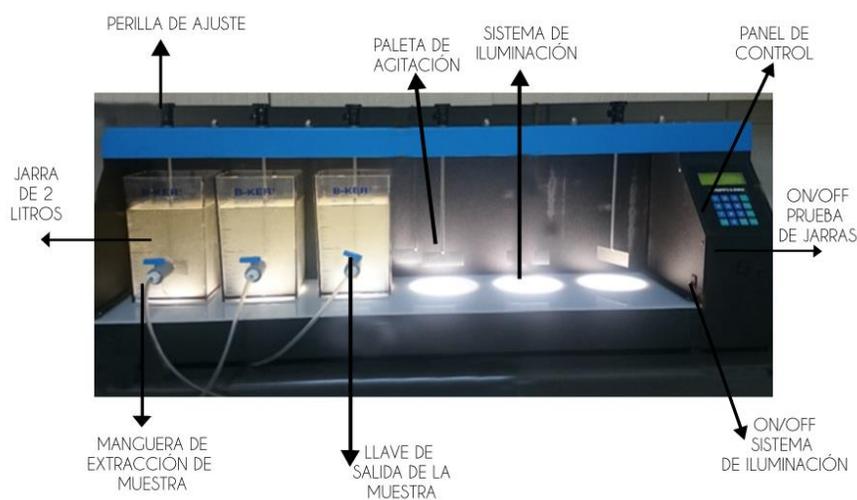
Conductividad eléctrica

Se define como la capacidad del agua para poder conducir la corriente eléctrica (Mackenzie, 2012, págs. 65-109).

1.4.8 Test de Jarras

Para la ejecución de los ensayos de coagulación, como se muestra en la Figura 1, se utiliza un test de jarras que mediante ensayos empíricos permite determinar el tipo de coagulante más adecuado y su dosificación para la muestra de agua. El ensayo está orientado a eliminar sólidos suspendidos y simula tres procesos básicos del tratamiento primario del agua: coagulación, floculación y decantación.

Figura 1 Set up Test de Jarras



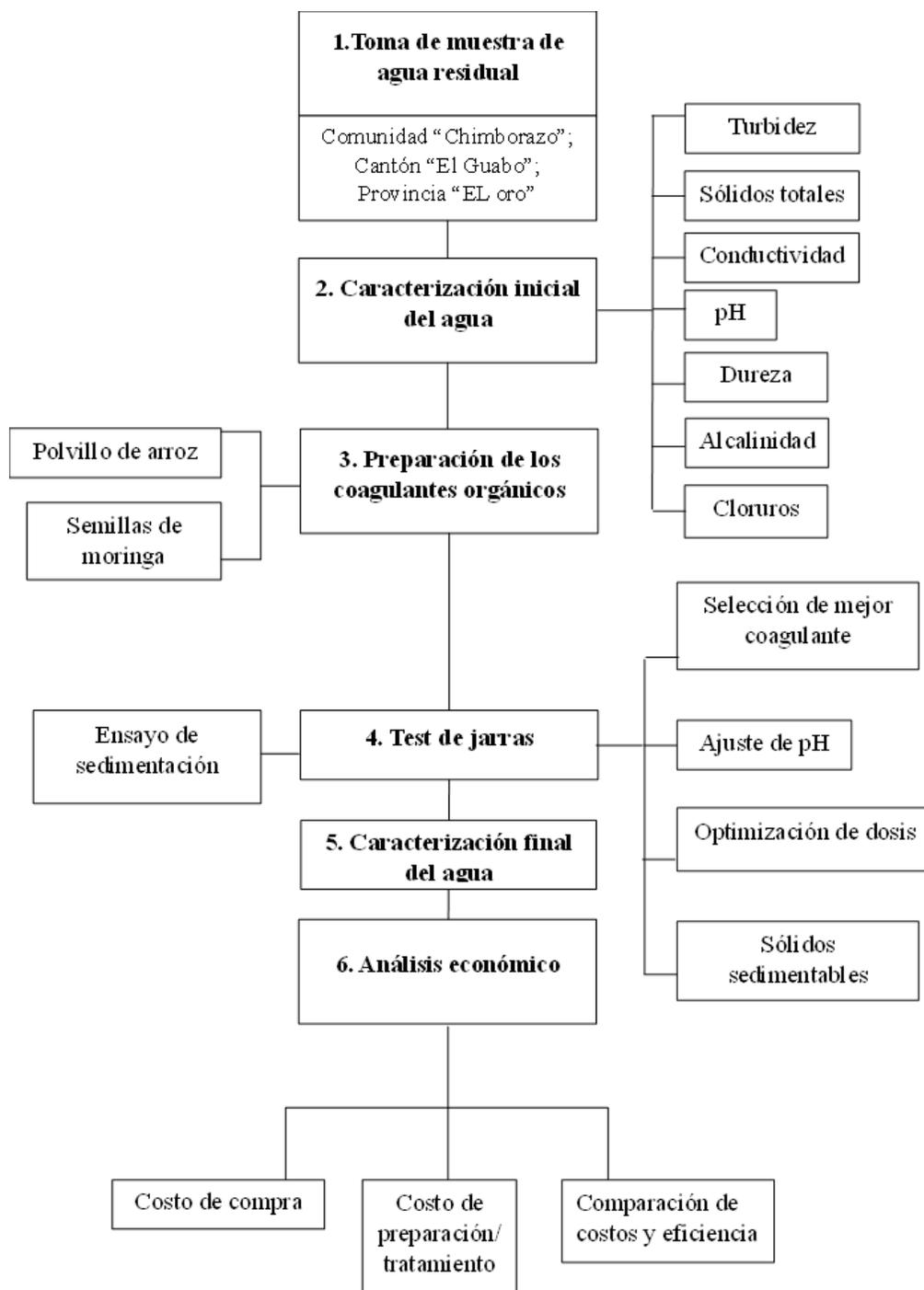
Fuente: (Navarro, 2023)

Capítulo 2

2. Metodología

En la Figura 2, se observa la metodología seguida en el presente proyecto integrador :

Figura 2 Diagrama de metodología de proyecto integrador



Las etapas del proyecto integrador son la toma de la muestra de agua residual, la caracterización inicial del agua, la preparación de los coagulantes orgánicos, el desarrollo del test de jarras, la caracterización final del agua, finalmente la comparación de costos de compra y preparación de los coagulantes orgánicos vs. el coagulante inorgánico de sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

La metodología utilizada corresponde a un diseño experimental puesto que se está analizando el efecto de los coagulantes orgánicos en el proceso de coagulación de un agua residual. Esta experimentación tiene variables independientes, dependientes y de control. Las variables independientes corresponden a factores que son manipulados por el usuario, y como consecuencia de esta manipulación, se produce un efecto medible en las variables dependientes. Por otro lado, las variables de control son aquellos factores que se mantienen constantes en las pruebas para no alterar el proceso de comparación. En la tabla a continuación, se describen los grupos de variables utilizadas:

Tabla 1 *Descripción de las variables del diseño experimental*

Tipo de variables	Descripción
Variable Independiente	Dosis de coagulante
	Concentración de coagulante
	Intensidad y duración de la agitación
	Tiempo de reacción de coagulación
Variable Dependiente	Turbidez
	Concentración de sólidos suspendidos
	pH

	Rapidez de sedimentación
Variables de respuesta	Velocidad de sedimentación
	Concentración de flóculos
Variables Controladas	Muestra de agua
	Dimensiones de los recipientes del test de jarras
	Temperatura
	Intensidad de la luz de los recipientes

2.1 Toma de Muestra

Como se puede observar en la Figura 3, la muestra de agua residual fue tomada en la comunidad “Chimborazo” perteneciente al cantón El Guabo en la provincia de El Oro ($3^{\circ}05'24.3''S$ $79^{\circ}44'43.1''W$). El agua residual mencionada proviene de las actividades domésticas de la comunidad y se descarga hasta un medio de filtración preliminar para su posterior descarga al Río San Miguel de Brasil. El medio de filtración es un recipiente de cemento con piedras en su interior que pretende disminuir la cantidad de sólidos presentes en el agua.

Se recolectó una cantidad aproximada de 8 galones de muestra para su posterior caracterización y test de jarras.

Figura 3 Lugar de toma de muestra en la Comunidad Chimborazo, El Guabo, El Oro



2.2 Caracterización Inicial de Muestra de Agua Residual

La caracterización inicial del agua se realizó mediante los análisis de: turbidez (NTU), sólidos totales (mg/L), conductividad (Us/cm), pH, dureza total (mgCaCO₃/L), alcalinidad (mgCaCO₃/L) y cloruros (Cl⁻). Si estos parámetros se encuentran dentro de sus límites permisibles, el agua es apta para ser descargada a cuerpos mayores de agua sin causar la contaminación de aguas subterráneas (Fluence, 2017).

2.2.1 Determinación de Sólidos Totales

El análisis de sólidos totales fue realizado utilizando una Mufla de marca Thermolyne. El procedimiento se realizó por triplicado para así obtener datos más precisos de los sólidos totales, los sólidos fijos totales y los sólidos volátiles totales. Para cada crisol (Crisol 1, Crisol 2, y Crisol 3) se utilizaron las siguientes denominaciones:

Tabla 2 *Parámetros a considerar en el cálculo de sólidos totales*

Parámetros a considerar

M1=Masa de Crisol seco. (g)

M2=Masa de Crisol seco con sólidos totales. (g)

M3=Masa de Crisol seco + sólidos fijos totales (g)

El cálculo realizado para determinar sólidos totales, sólidos fijos totales y sólidos volátiles totales fue el siguiente:

- $M_1 = \text{masa del crisol seco (mg)}$
- $M_2 = \text{masa del crisol seco + sólidos totales (mg)}$
- $M_3 = \text{masa del crisol + sólidos fijos totales (mg)}$
- *Volumen de la muestra (L)*

$$\text{Sólidos Totales} = \frac{M_2 - M_1}{\text{Volumen de muestra}}$$

$$\text{Sólidos Fijos Totales} = \frac{M_3 - M_1}{\text{Volumen de la muestra}}$$

$$\text{Sólidos Volátiles Totales} = \text{Sólidos Totales} - \text{Sólidos Fijos totales}$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales} = 0.30 * \text{Sólidos Totales}$$

2.2.2 Determinación de Turbidez

Como se puede observar en la Figura 4, el ensayo de turbidez fue realizado utilizando un turbidímetro portátil marca *HACH*. Para garantizar una lectura correcta, el equipo fue previamente calibrado y la muestra de agua fue agitada para lograr su homogenización.

Figura 4 *Turbidímetro portátil HACH – Laboratorio de Tratamiento de Agua-ESPOL*



2.2.3 Determinación de Conductividad

Como se puede observar en la Figura 5, el ensayo de conductividad fue realizado utilizando un conductímetro marca *HACH*. Para asegurarse de tomar una lectura correcta, el equipo fue previamente calibrado y la muestra de agua fue agitada para lograr su homogenización.

Figura 5 *Conductímetro marca HACH. Laboratorio de Tratamiento de Agua- ESPOL*



2.2.4 Determinación de pH

Como se puede observar en la Figura 6, el ensayo de pH fue realizado utilizando un pH-metro marca *HACH*. Para garantizar una lectura correcta, se lavó el electrodo del sensor y la muestra de agua fue previamente homogenizada.

Figura 6 pH-metro Marca *HACH*. Laboratorio de Tratamiento de Agua-ESPOL



2.2.5 Determinación de Dureza Total

El ensayo de dureza fue realizado puesto que el mismo representa la concentración total de los iones de calcio y magnesio en las unidades de carbonato de calcio. Este parámetro es importante puesto que una alta dureza provoca incrustaciones en los sistemas de tuberías de agua, mientras que una baja dureza contribuye al carácter corrosivo del agua (Spellman, 2020, pág. 132).

La determinación se realizó mediante titulación con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) puesto que la misma forma complejos solubles al entrar en contacto con iones de calcio y magnesio. Se preparó una solución diluida del agua residual y se añadió una solución amortiguadora para llegar a un pH de 10. Posteriormente, se agregó como indicador el Negro de

Eriocromo T y se tituló con EDTA 0.01M hasta observar el cambio de coloración de rojo vino a azul (American Public Health Association, 2017).

El cálculo relacionado a la dureza total considera los siguientes valores:

A: Volumen en mL consumidos de EDTA

N: Normalidad de EDTA

$$\frac{mgCaCO_3}{L} = \frac{A * N * 100000}{mL \text{ de muestra}}$$

2.2.6 Determinación de Alcalinidad

La alcalinidad también fue otro parámetro considerado dentro de la caracterización inicial de la muestra de agua puesto que, define la capacidad de ésta para neutralizar ácidos y se determina en unidades de mgCaCO₃/L. Para este procedimiento se realizó una titulación con ácido sulfúrico H₂SO₄ 0.02N hasta un pH 8.3 para la determinación de la alcalinidad parcial y posteriormente se continuó titulando hasta un pH de 4.5 para la determinación de la alcalinidad total (American Public Health Association, 2017).

El cálculo relacionado a la alcalinidad parcial considera los siguientes valores:

A: Volumen en mL consumidos de H₂SO₄ hasta alcanzar un pH de 8.3

N: Normalidad de H₂SO₄

$$\frac{mgCaCO_3}{L} = \frac{A * N * 100000}{mL \text{ de muestra}}$$

El cálculo relacionado a la alcalinidad total considera los siguientes valores:

A: Volumen en mL consumidos de H₂SO₄ hasta alcanzar un pH de 4.5

N: Normalidad de H₂SO₄

$$\frac{mgCaCO_3}{L} = \frac{A * N * 100000}{mL \text{ de muestra}}$$

2.2.7 Determinación de Cloruros

La determinación de cloruros fue realizada puesto que este parámetro evidencia la presencia de residuos industriales y/o domésticos en las descargas de agua y aumenta la corrosividad de esta. En este procedimiento se utilizó el indicador de dicromato de potasio iK₂CrO₄ y en la titulación con nitrato de plata AgNO₃ 0.014N, puesto que el cloruro del agua reacciona con los iones plata y forman un precipitado color rojo ladrillo (American Public Health Association, 2017).

Para el cálculo de los cloruros se consideraron los siguientes parámetros

A: Volumen en mL consumidos del AgNO₃ para la valoración de la muestra

B; Volumen mL consumidos del AgNO₃ para la valoración del blanco

$$\frac{mgCl^-}{L} = \frac{(A - B) * N * 35450}{mL \text{ de muestra}}$$

$$\frac{mgNaCl}{L} = \frac{mgCl^-}{L} \times 1.65$$

2.3 Preparación de los Coagulantes Orgánicos

Como se mencionó en la introducción de este capítulo, la metodología corresponde al diseño experimental puesto que se quiere conocer el efecto de los coagulantes orgánicos como alternativa de los coagulantes inorgánicos en el proceso de coagulación de la muestra de agua residual. Los coagulantes orgánicos seleccionados fueron la semilla de Moringa y el polvillo de arroz.

Para la obtención del coagulante de moringa, se adaptó el procedimiento de (Feria & Roa, 2014) utilizado en el estudio de turbidez del río Sinú. Las semillas de moringa fueron secadas a una temperatura de 105°C en una estufa de laboratorio durante una hora. Posteriormente fueron molidas hasta un polvo fino y se formó una solución utilizando 10g de esta muestra disueltos en 1000mL de agua destilada. Esta solución acuosa fue centrifugada a 5000rpm durante 5min, y posteriormente filtrada. El filtrado es el coagulante de moringa de concentración 10g/L.

Similarmente, para la obtención del coagulante de polvillo de arroz, se adaptó el procedimiento de (Tan , Lim, Chow , Liew, & Desa, 2022) utilizado en el estudio del tratamiento de descargas urbanas. El polvillo de arroz es obtenido de la molienda y tamizado de la cáscara de arroz. Sin embargo, se obtuvo el producto ya listo como polvillo de arroz. El mismo fue tratado con una solución de NaOH 0.1M bajo agitación magnética a 300rpm durante 30min para la obtención de la hemicelulosa del arroz. Posteriormente se formó una solución con 10g del polvillo tratado y 1000mL de agua destilada, se filtró la misma y se obtuvo el coagulante de arroz de concentración 10g/L.

2.4 Test de Jarras

La prueba de jarras es el principal procedimiento en donde se evidencia el diseño experimental. Para su desarrollo se utilizó el equipo de Test de Jarras marca HACH puesto que su diseño permite controlar las variables de dimensión de los recipientes, velocidad y tiempo de agitación. Otra de las variables controladas fue la concentración de los coagulantes puesto que tanto el coagulante de moringa, como el de polvillo de arroz, como el de sulfato de aluminio, se prepararon a una concentración de 10g/L.

2.4.1 Selección del Mejor Coagulante

En este primer ensayo se colocó la muestra de agua residual en cuatro de los recipientes de la prueba de jarras según el coagulante a ser utilizado, de la siguiente forma:

Tabla 3 *Set-up para prueba de selección de coagulante*

Compartimientos	Coagulante
1	Sin coagulante
2	Sulfato de aluminio
3	Polvillo de arroz
4	Moringa

Además de mantener la misma concentración de coagulantes (10g/L) también se fijó una dosis de 5mL para cada uno durante este ensayo. Para la homogenización de la muestra se agitó durante 1min a 150rpm y para el proceso de coagulación, se agitó a 35rpm durante 3 minutos más. El mejor coagulante fue seleccionado según la eficiencia de remoción de turbidez y dificultad de preparación del coagulante.

2.4.2 Ensayo de Ajuste de pH

Una vez seleccionado el coagulante óptimo para la muestra de agua residual, se separaron 500mL de agua residual en 4 diferentes vasos de precipitación para la realización de un ajuste de pH y la obtención de muestras más ácidas y básicas, según la siguiente configuración:

Tabla 4 *Set-up de ajuste de pH*

Muestra	pH
1	4

2	6
3	Original del agua residual
4	8

Una vez preparadas las muestras, se colocaron en los recipientes de la prueba de jarras y se volvió a adicionar 5mL del coagulante seleccionado con una agitación de 35rpm durante 15 minutos. El pH óptimo de la muestra fue aquel que provocó la mayor velocidad de sedimentación con la formación más uniforme de flóculos.

2.4.3 Ensayo de Optimización de la Dosis de Coagulante en las Condiciones de pH

Establecidas

Una vez seleccionado el coagulante y el pH óptimos para su acción, también se realizó el ajuste de la dosis del coagulante. Para esto se separaron 500mL de agua residual y se ajustó el pH seleccionado en la sección anterior. La muestra fue colocada en los 4 recipientes de la prueba de jarras y la dosis utilizada para cada recipiente se suministró según la siguiente configuración:

Tabla 5 *Set-up del ensayo de ajuste de dosis de coagulante*

Muestra	Dosis del coagulante al 1% (mL)
1	2
2	4
3	5
4	6

Este ensayo fue realizado para el coagulante orgánico óptimo y para el coagulante de sulfato de aluminio para así obtener una comparación de la cantidad de dosis necesaria para lograr la coagulación y posterior coagulación.

2.5 Caracterización Final de la Muestra

Los ensayos de caracterización se repitieron tomando como muestra el agua clarificada obtenida del ensayo con el coagulante ya ajustado a su pH y dosis óptima.

2.6 Análisis Económico

El análisis económico se dividió en costos fijos y variables para cada uno de los coagulantes. En los costos fijos se tomaron en consideración el costo de obtención de los coagulantes, los costos asociados a su preparación y el salario de la persona encargada de preparar y administrar el coagulante seleccionado. Con respecto a los costos variables, se consideró un análisis químico de control que dependerá de la disponibilidad de los laboratorios de la empresa de tratamiento de aguas, y los costos de los equipos de protección personal requeridos para la labor (traje de protección reutilizable, guantes de nitrilo, mascarillas y botas de agua).

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

3.1 Resultados de la Caracterización Inicial de la Muestra de Agua Residual

La caracterización inicial del agua residual se realizó para conocer el perfil del agua que estaba siendo descargada al río en la comunidad Chimborazo. Los análisis realizados fueron conductividad, turbidez, pH, dureza del agua, alcalinidad, cloruros, sólidos totales, sólidos fijos totales, sólidos volátiles totales y sólidos suspendidos totales.

Tabla 6 Resultados de caracterización inicial del agua residual

Parámetro	Resultado
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	631,50
Turbidez (NTU)	32,30
pH	7,33
Dureza total (mgCaCO_3/L)	180,00
Alcalinidad total (mgCaCO_3/L)	14,60
Cloruros (ppm Cl^-)	23,96
Sólidos totales (mg/L)	373,33
Sólidos Fijos Totales (mg/L)	288,00
Sólidos volátiles totales (mg/L)	85,33
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	115,73

Con respecto a la conductividad eléctrica, este parámetro define la capacidad que tiene el agua para conducir electricidad a través de los iones disueltos y está relacionado a los sólidos

totales disueltos (STD) en el agua (Rusydi, 2018). Los rangos permisibles de conductividad eléctrica están establecidos según los STD. Para el agua potable, la Organización Mundial de la Salud (OMS) sugiere que la conductividad no sea superior a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, en la normativa ecuatoriana no existe un rango definido para este parámetro en la descarga de aguas residuales a cuerpos de agua dulce.

El parámetro de turbidez correspondió a 32.30 NTU y hace referencia a la cantidad de materia insoluble que está en suspensión en la muestra. Este valor está relacionado con la cantidad de sólidos suspendidos totales en la muestra de agua residual, y es el principal indicador para la determinación de la eficiencia de los coagulantes. Un coagulante efectivo logra reducir la turbidez del agua a ser tratada. En los límites permisibles de descarga de agua residual a cuerpos de agua dulce no se menciona la turbidez, pero si existen límites para los sólidos suspendidos totales como se muestra en la Tabla 15 en la sección Apéndice A, Max 80 mg/L

El parámetro de pH correspondió a un valor de 7.33, lo cual hace referencia a una muestra de agua neutra, puesto que se acerca al valor de referencia de pH 7 del agua potable. Según la normativa ecuatoriana, el pH del agua residual descargada a cuerpos de agua dulce debe estar entre los valores de 6 y 9 (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015). En descargas realizadas a ríos, lagos y riachuelos se debe tener especial precaución con el pH de las aguas descargadas, puesto un aumento en la acidez del agua puede ser perjudicial para la salud de la vida acuática. Rangos de pH ácido, 2-5, afectan a los peces en etapa de maduración, y acelera la lixiviación de metales pesados perjudiciales para los peces (University of Massachusetts Amherst, 2016).

Con respecto a la dureza del agua (180 mgCaCO₃/L), la misma hace referencia a la concentración de carbonato de calcio en el agua y niveles altos de la misma están ligados a

incrustaciones en tuberías, mientras que niveles bajos o “blandeza” están ligados a un aumento el carácter corrosivo de agua (Reshi & Muhammad, 2019). Sin embargo, no se detallan límites permisibles para este parámetro en la descarga de agua residual, puesto que no tiene afectaciones para la vida acuática.

Similarmente el parámetro de alcalinidad ($14.60 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$) también se expresa en unidades de mg de carbonato de calcio por litro de agua, pero mide la capacidad amortiguadora del agua. Es decir, cuál es su capacidad de resistirse a cambios de pH. La alcalinidad se divide en alcalinidad parcial y alcalinidad total. La alcalinidad parcial viene dada por la concentración de carbonatos e iones hidroxilos, y la alcalinidad total se presenta por la concentración de bicarbonatos (Jantsch & Mattiasson, 2018). Dado que el pH de la muestra fue de 7.33, no se determinó alcalinidad parcial puesto que para la misma se necesita que el pH inicial de la muestra de agua sea superior a 8.3. Por ende, el agua residual muestreada solo presenta alcalinidad total (presencia de bicarbonatos).

El parámetro de cloruros en el agua fue medido puesto que se conoce que el agua residual proviene de actividades domésticas y el cloro está presentes en productos de uso diario como detergentes, jabones, lavaplatos, entre otros. Se obtuvo un valor de 23,96 ppm Cl^- que está sobre el límite de 0,5 ppm Cl^- para descargas de agua residual en cuerpos de agua dulce. Por ende, el río de la comunidad Chimborazo está expuesto a contaminación química que provoca la degradación de la calidad del agua.

Los últimos parámetros considerados para la caracterización inicial del agua residual fueron los sólidos totales (ST), sólidos fijos totales (SFT), sólidos volátiles totales (SVT), y los sólidos suspendidos totales (SST). Los sólidos totales fueron calculados utilizando la estufa y la mufla. El primer peso (M_1) hace referencia al crisol seco, el segundo peso (M_2) hace referencia al

crisol + ST y tercer peso (M_3) hace referencia al crisol + SFT . Al observar la Tabla 22 de resultados de sólidos fijos en la sección de Apéndice B, se puede apreciar un aumento de peso de M_1 a M_2 , esto se debe a que, al someter el crisol a las altas temperaturas de la estufa, el agua limpia se evaporó, pero los sólidos disueltos permanecieron en el crisol, explicando así que M_2 sea mayor a M_1 . Posteriormente, los crisoles fueron expuestos a temperaturas aún más altas (550°C) en la mufla y la masa obtenida de este proceso, M_3 , fue menor a M_2 pero mayor a M_1 . Esto se debe a que después del calentamiento por estufa, permanecieron los sólidos totales presentes en la muestra, pero al elevar más la temperatura, una fracción de estos se evaporó y el resto se mantuvo en el crisol. Esta fracción de sólidos obtenida fueron los sólidos fijos totales, y la diferencia entre los sólidos totales y sólidos fijos totales, corresponde a la fracción de sólido evaporados o sólidos volátiles totales.

Similarmente, cuando el análisis es realizado por filtración, los sólidos totales son divididos en dos clases: sólidos suspendidos totales y los sólidos filtrables totales. Se conoce que para muestra de agua residual, el 0.31% de los sólidos totales corresponden a los sólidos suspendidos totales (Delgadillo, Camacho, & Pérez, 2019). Se obtuvieron así 373 mg/L de sólidos totales y 115 mg/L de sólidos suspendidos totales, estando estos últimos fuera de los límites permisibles de la normativa. Los sólidos suspendidos son aquellos que se miden durante el análisis de turbidez y son los que permiten medir la eficiencia de un coagulante.

3.2 Resultados de las Pruebas de Test de Jarras

3.2.1 Resultados de la Prueba de Selección del Mejor Coagulante

El primer análisis del test de jarras fue la selección del mejor coagulante para la muestra de agua residual. Se mantuvieron constantes el volumen de muestra colocado en cada recipiente del test, así como la velocidad de agitación e intensidad de luz. Así mismo, también se mantuvo

constante la concentración y dosis de cada coagulante administrado. Dado que no se poseen los pesos moleculares de los coagulantes naturales de moringa y arrocillo, se preparó las soluciones de coagulantes manteniendo una concentración de 10g/L, y una dosis de 5mL. A continuación, se muestra la tabla de resultados de este ensayo.

Tabla 7 Resultados del ensayo de selección del mejor coagulante

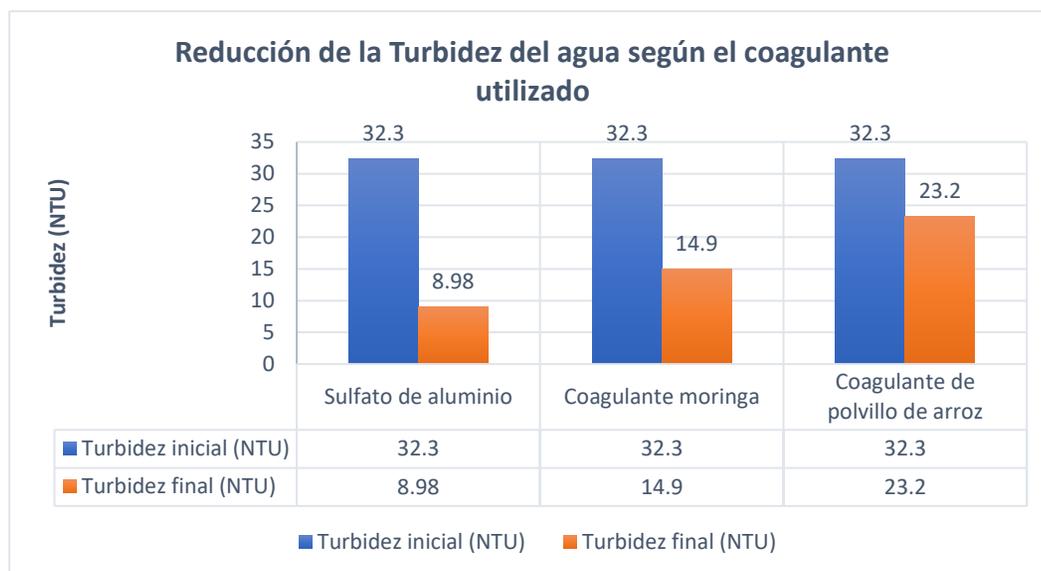
Coagulante	Concentración (g/L)	Dosis (mL)	pH inicial	Turbidez inicial (NTU)	pH final	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de Reducción de Turbidez (%)
Sulfato de aluminio	10	5	7,33	32,3	3,17	8,98	72,20%
Coagulante moringa	10	5	7,33	32,3	7,15	14,9	53,87%
Coagulante de polvillo de arroz	10	5	7,33	32,3	2,15	23,2	28,17%

Como se puede observar, el mayor porcentaje de remoción de turbidez fue obtenido por el sulfato de aluminio con un 72.20%, seguido del coagulante de moringa con un 53.87% y finalmente el coagulante de polvillo de arroz con un 28.17%. Por ende, los coagulantes óptimos seleccionados fueron la moringa y el sulfato de aluminio, mismos que fueron comparados en los análisis posteriores. El eficiente efecto de coagulación del sulfato de aluminio era un resultado esperado puesto que es un coagulante ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. El sulfato de aluminio produce hidróxido de aluminio $Al(OH)_3$, que absorbe las partículas coloidales o sólidos suspendidos en su hidrólisis metálica (Postolachi, Rusu, & Lupascu, 2016). Por otro lado, la acción coagulante de las semillas de moringa se ve explicada

por sus proteínas solubles las cuales desestabilizan las partículas del agua residual, clarificando así la misma (Adesina, Abdulkareem, Yusuff, Lala, & Okewale, 2019).

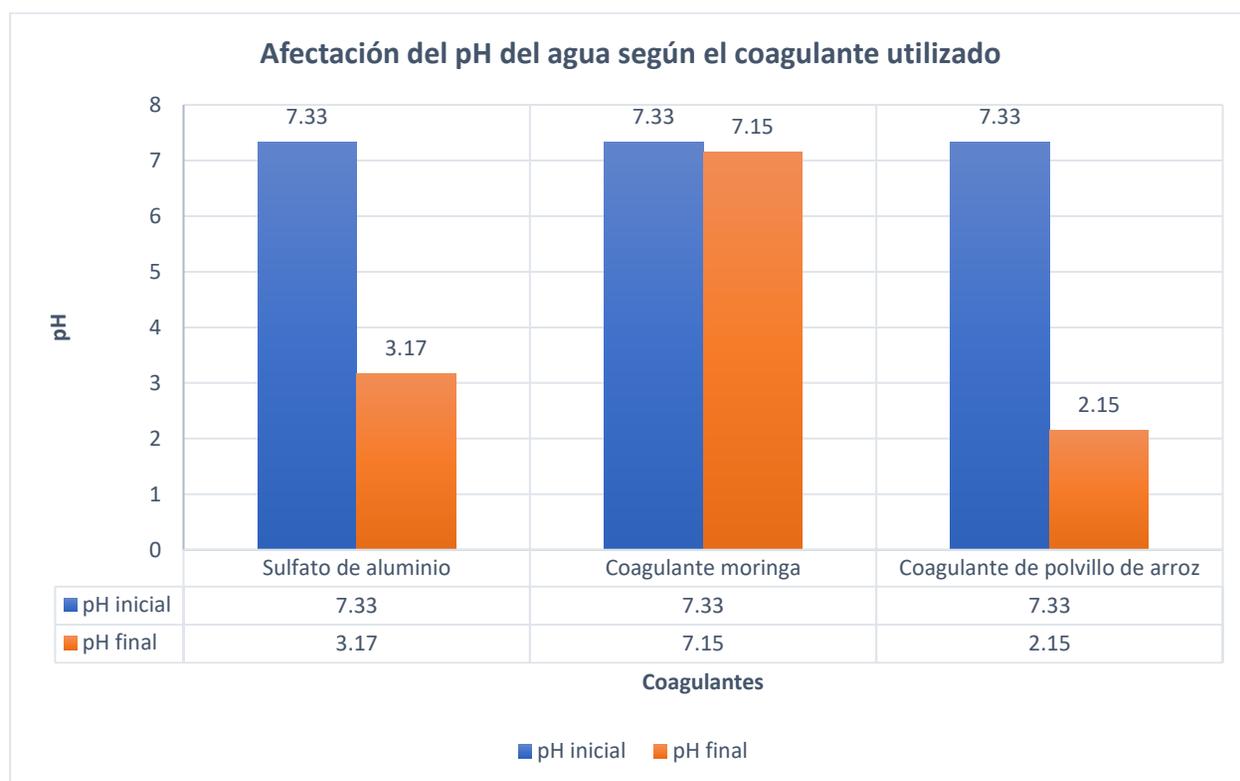
Sin embargo, no se obtuvo los resultados esperados para el coagulante de polvillo de arroz. Según (Dadebo, Ibrahim, Fujii, & Nasr, 2023) el polvillo de arroz contiene hasta un 80% de silica, la cual por su porosidad y área superficial actúa como un agente coagulante. El procedimiento adaptado de (Tan, Lim, Chow, Liew, & Desa, 2022) indicaba un primer secado por estufa de la materia prima, seguido de una molienda, y un tratamiento con NaOH. Otros procedimientos experimentales han complementado esta técnica aumentando la temperatura en una mufla obteniendo cenizas de arroz de alta concentración de silica y añadiendo carbón activado para potenciar la acción coagulante (Menya, Olupot, Storz, & Kiros, 2018). Estos pasos adicionales pueden explicar el por qué el coagulante realizado no fue efectivo en comparación al de moringa o al de sulfato de aluminio. Cabe mencionar, que debido a las altas temperaturas que necesitaría dicho procedimiento, la opción del arroz no sería viable pues no sería reproducible en la zona rural de interés.

Figura 7 Reducción de la turbidez del agua según el coagulante utilizado



La Figura 7, muestra claramente la tendencia de reducción en la turbidez del agua residual por coagulante, se tomó como referencia la turbidez inicial que tenía la muestra de agua residual que fue de 32.3 NTU. Se tiene una reducción de 23.32 NTU para el coagulante de sulfato de aluminio, una reducción de 17.4 NTU para el coagulante de moringa y finalmente una reducción de 9.1 NTU para el polvillo de arroz. Dado que los límites permisibles de descargas en ríos también incluyen al pH como parámetro a considerar, también se analizó la tendencia de la afectación del pH por coagulante utilizado.

Figura 8 *Afectación del pH del agua según el coagulante utilizado*



Como se puede observar en la Figura 8, el coagulante de moringa tiene una afectación mínima sobre el pH de la muestra de agua residual, manteniéndola en un valor neutro. Debido a sus características naturales, no interfiere con este parámetro del agua. Por otro lado, después de la acción del coagulante de sulfato de aluminio, el pH de la muestra presentó una reducción de 4.16 puntos, es decir que la adición del sulfato de aluminio aumenta la acidez del agua y hace necesario un tratamiento posterior para regresar a un pH neutro que está dentro de los rangos permisibles de descarga. Por otro lado, el coagulante de polvillo de arroz también provocó un aumento de acidez en el agua residual, el cual se puede explicar comentando la presencia de ácido linoleico en su composición, o por la presencia de tratamiento ácidos en las industrias arroceras para la obtención del polvillo de arroz (Kwan & Wong, 2020).

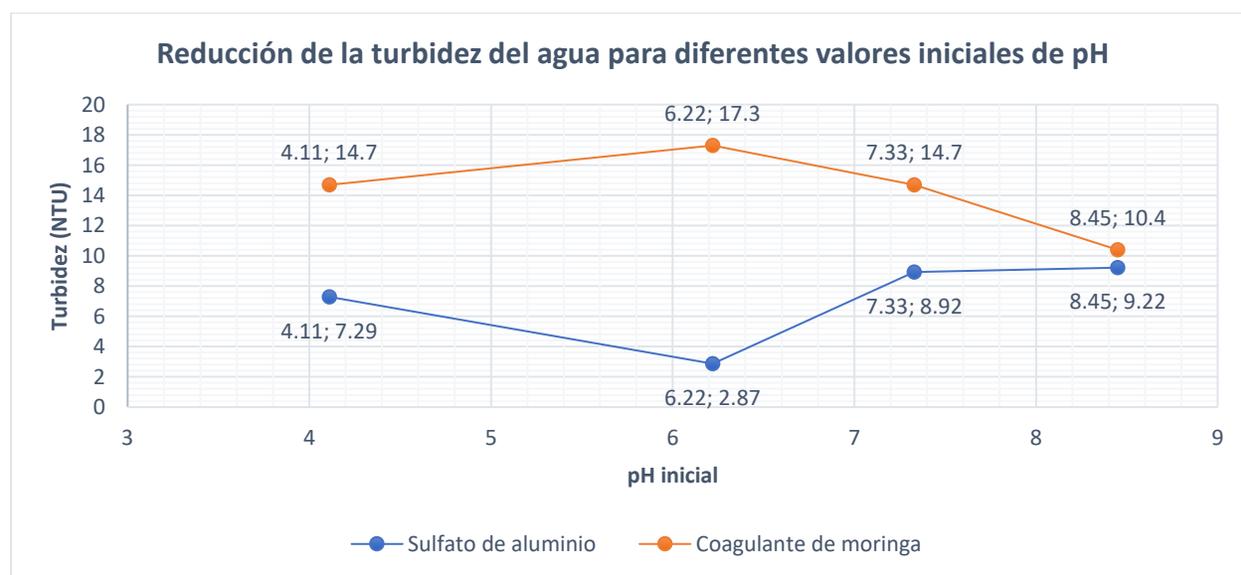
3.2.2 Resultados de la Prueba de Optimización del pH

Una vez obtenidos los coagulantes de mayor eficiencia en la reducción de la turbidez, en este caso, el coagulante de moringa y el sulfato de aluminio, se realizó una prueba de ajuste de pH para conocer en que rango de pH presentan su mayor formación de flóculos.

Tabla 8 Ensayo de optimización de pH para los coagulantes

Coagulante	pH sugerido	pH inicial	Turbidez inicial (NTU)	pH final	Turbidez final (NTU)
Sulfato de aluminio	4	4.11	20.8	3.02	7.29
	6	6.22	24.3	3.22	2.87
	Original de la muestra	7.33	32.3	3.17	8.92
	8	8.45	38.7	3.11	9.22
Coagulante	pH sugerido	pH inicial	Turbidez inicial (NTU)	pH final	Turbidez final (NTU)
Coagulante de moringa	4	4.11	20.8	4.03	14.7
	6	6.22	24.3	6.09	17.3
	Original de la muestra	7.33	32.3	7.11	14.7
	8	8.45	38.7	8.23	10.4

Figura 9 Reducción de la turbidez del agua para diferentes valores iniciales de pH



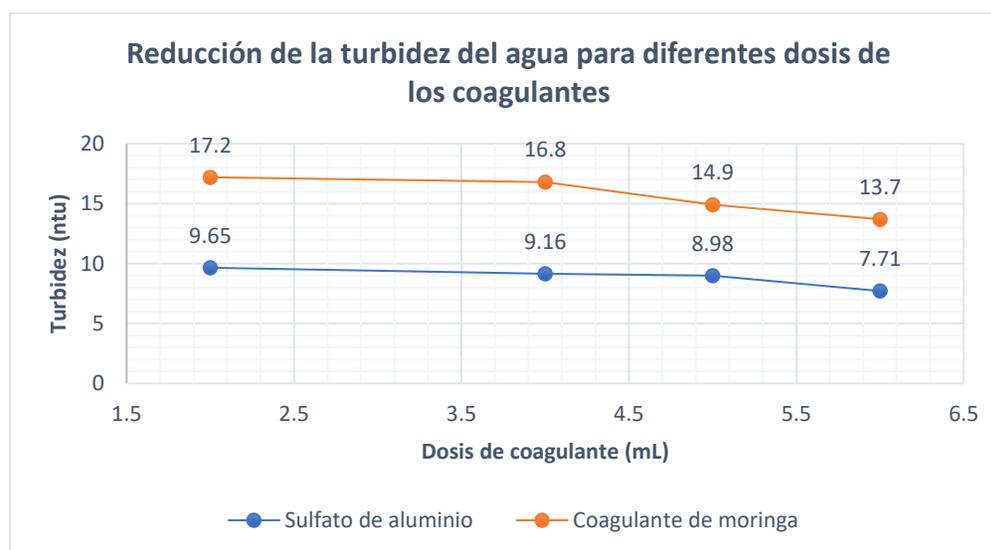
Como se puede observar la Figura 9, se modificó el pH inicial de la muestra de agua a diferentes valores para así obtener una tendencia del comportamiento del coagulante. Para el coagulante de moringa, la tendencia demuestra que, a pH más básicos, mejor es su remoción de turbidez. Por otro lado, el comportamiento del sulfato de aluminio es más esporádico, y tiene una remoción máxima en un pH inicial ligeramente ácido de 6.22, y su eficiencia de remoción va disminuyendo conforme aumento el carácter básico del pH del agua. Es decir, para obtener una mayor remoción de turbidez en la muestra de agua residual, se debe acidificar ligeramente la muestra en el caso de que se utilice sulfato de aluminio, o se debe de aumentar ligeramente el carácter básico de la muestra en el caso de que se utilice la moringa.

3.2.3 Resultados de la Prueba de Ajuste de Dosificación de los Coagulantes

Regresando al pH original de la muestra, se determinó la dosis óptima de los coagulantes de Moringa y sulfato de aluminio:

Tabla 9 Dosis óptima de coagulantes

Coagulante	Concentración (g/L)	Dosis(mL)	pH inicial	Turbidez inicial (NTU)	pH final	Turbidez final (NTU)
Sulfato de aluminio	10	2	7.33	32.3	3.25	9.65
		4			3.43	9.16
		5			3.17	8.98
		6			3.06	7.71
Coagulante de moringa	10	2	7.33	32.3	7.29	17.2
		4			7.27	16.8
		5			7.15	14.9
		6			7.03	13.7

Figura 10 Reducción de la turbidez del agua para diferentes dosis de coagulantes

Como se observa en la Figura 10, la tendencia es la misma para ambos coagulantes. Al incrementar la dosis de coagulante, también hubo mayor reducción en la turbidez de la muestra. En este caso, también se mantienen las proporciones, por una misma dosis, el sulfato de aluminio presenta mayor eficiencia que el coagulante de moringa.

3.2.4 Resultados de la Caracterización Final

La caracterización final fue realizada tomando en cuenta los sólidos totales, sólidos sedimentables, pH final y visibilidad de impurezas presentes. A continuación, se muestran las tablas de resultados considerando los límites permisibles de descarga de agua residuales a cuerpos de agua dulce en el Ecuador.

Tabla 10 Caracterización final de parámetros con respecto a límites permisibles

Muestra	Materia flotante Lím: Ausente	Potencial de hidrogeno Lím 6-9	Sólidos suspendidos totales Max 80 mg/L	Sólidos totales Max 1600 mg/L	Observación
Agua sin tratar	Presencia	7.33	115.73	373.33	No cumple en materia flotante y

					solidos suspendidos totales
Agua clarificada con coagulante de moringa	Ausencia	7.03	78.53	253.33	Cumple
Agua clarificada con sulfato de aluminio	Ausencia	3.06	64.48	208.00	No cumple en potencial de hidrogeno

Con respecto al análisis de materia flotante, es netamente un análisis cualitativo que está dentro de la normativa para la visibilidad de partículas de mayor tamaño presentes en el agua. En este caso, el agua residual inicial si presentó partículas visibles al momento del muestreo. Sin embargo, posterior al análisis, no se presenciaron partículas visibles después del tratamiento con sulfato de aluminio, ni con el tratamiento con coagulante de semillas de moringa.

Para el parámetro de pH, hubo una reducción mínima de pH posterior a la adición del coagulante de moringa. El agua pasó de estar ligeramente básica a tener un pH más neutral. Sin embargo, para el sulfato de aluminio, ocurrió una acidificación de la muestra, lo cual no permite que sea descargada al río por presencia de acidez. Así mismo, esto indicaría la necesidad del uso de una base como el hidróxido de sodio, NaOH, para poder aumentar el pH de la muestra y que el agua clarificada sea descarga al río.

Finalmente, con el agua clarificada se realizó sólidos totales y sólidos sedimentables, obteniendo así, que incluso el agua sin tratar cumple con el parámetro de sólidos totales. Sin embargo, para los sólidos sedimentables, inclusive el agua sin tratar se encuentra dentro de parámetros. Por otro lado, los sólidos suspendidos si tiene mayor rigurosidad en su parámetro y posterior al tratamiento con los coagulantes, se obtiene agua residual apta para la descarga al río.

3.2.5 Resultados de Adaptación de Procedimiento de Moringa Laboratorio vs. Campo

Como se muestra en la Tabla 11, el procedimiento de elaboración del coagulante de moringa fue realizado a escala de laboratorio con los implementos utilizados en este ambiente, sin embargo, se necesita que la comunidad pueda realizar el coagulante natural o que una persona de la comunidad contratada por la empresa pueda realizar el procedimiento. En base a esto, se modificaron ciertos procesos para que sean aplicables a los instrumentos disponibles por la comunidad. Una vez obtenido el coagulante también se compararon los resultados entre el coagulante de moringa de laboratorio y el coagulante de moringa rústico.

Tabla 11 Adaptación del procedimiento de obtención del coagulante de moringa

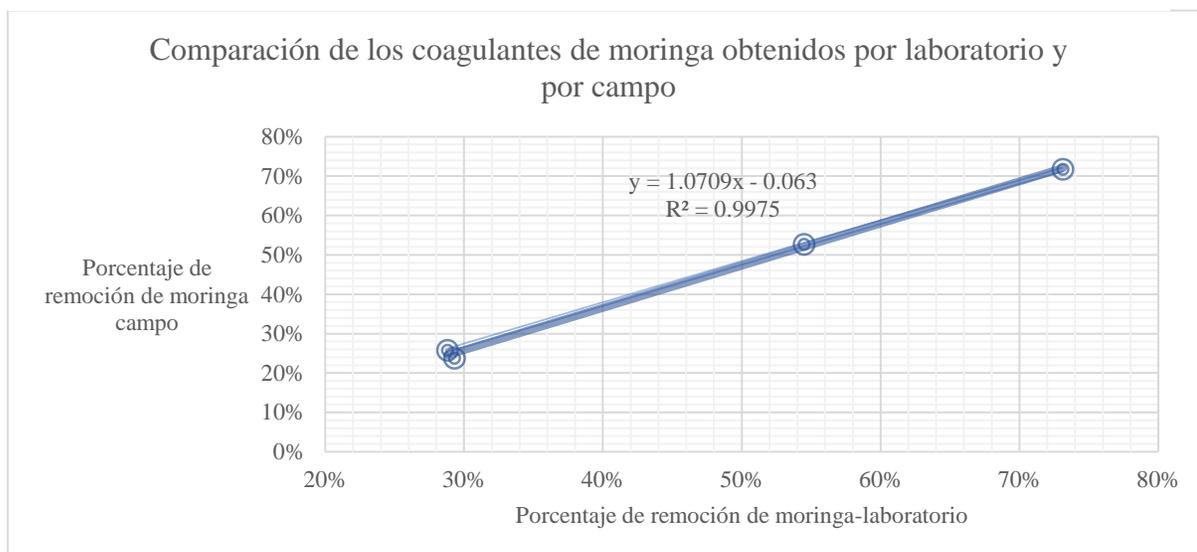
Procedimiento	Laboratorio	Campo
Selección de semillas	Manual	Manual
Secado de las semillas	Estufa a 105°C durante 1 hora	Expandir sobre una lona y exponer al sol durante al menos 3 horas
Molienda de semillas	Licuada de alta potencia	Molino artesanal de la comunidad
Preparación con agua destilada	Agua destilada	Agua normal
Centrifugado	Centrífuga	Rápida agitación y posterior sedimentación

Tabla 12 Comparación del porcentaje de remoción de turbidez del coagulante de moringa

pH inicial del agua residual	Porcentaje de remoción de turbidez para coagulante de moringa elaborado en el laboratorio	Porcentaje de remoción de la turbidez del coagulante de moringa elaborado en campo	Desviación estándar	Varianza
4.12	29%	24%	0.039989897	7.995959E-04
6.22	29%	26%	0.021782023	2.372283E-04

7.33	54%	53%	0.013019172	8.474942E-05
8.46	73%	72%	0.01017034	5.171791E-05

Figura 11 Comparación de los coagulantes de moringa obtenidos por laboratorio y por campo



Como se puede observar en la Figura 11, los pasos de alto consumo de energía realizados en el laboratorio como lo son el uso de la estufa, la molienda por licuadora y la centrífuga fueron reemplazados por procesos más simple como el secado al sol utilizado ampliamente en la agricultura, la molienda por molino artesanal y una simple decantación por reposo de la muestra. Además, como se muestra en la Tabla 12, se realizó nuevamente la prueba de variación de pH a los mismos valores utilizados originalmente con el coagulante de moringa de laboratorio, obteniendo así una desviación estándar promedio de 0.02, y un coeficiente de correlación de 0.9975. Estos valores indican que el cambio en el procedimiento no presentó cambios en el agente de coagulación de la moringa.

3.2.6 Resultados del análisis económico

Además de la comparación de eficiencias entre los coagulantes, también se debe considerar el aspecto económico de las propuestas mencionadas. Los costos mencionados fueron calculados para un período de un año como parte de los gastos de la empresa de tratamiento de agua residual del cantón. A continuación, se muestra, el desglose de información.

Tabla 13 Costos totales para el coagulante de moringa

Tipo de Costo	Descripción del costo	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Fijo	Semillas de moringa	semillas/año	4700	\$ -	\$ -
	Salario de personal (preparación y administración de coagulante)	\$/año	2	\$ 450.00	\$ 10,800.00
Variable	Análisis químico (Turbidez, pH)	análisis /año	12	\$ 18.00	\$ 216.00
	Trae de protección reutilizable para químicos	Unidad/año	2	\$ 13.00	\$ 26.00
	Mascarillas quirúrgicas (50 pcs x caja)	Cajas/año	7	\$ 2.50	\$ 17.50
	Botas de agua	Par/año	2	\$ 11.50	\$ 23.00
	Guantes de nitrilo (100 pcs x caja)	Cajas/año	4	\$ 4.25	\$ 17.00
	Total-Costo anual de implementación del coagulante de moringa			\$ 11,099.50	

Tabla 14 Costos totales para el coagulante de sulfato de aluminio

Tipo de Costo	Descripción del costo	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Fijo	Sacos de 10 Kg de Sulfato de aluminio	sacos/año	24	\$ 50.00	\$ 1,200.00
	Salario de personal (preparación y administración de coagulante)	\$/año	2	\$ 450.00	\$ 10,800.00
	Ajuste de pH posterior a adición de coagulante (Solución 1N de hidróxido de sodio de 1L)	Litros/año	300	\$ 30.00	\$ 9,000.00
Variable	Análisis químico (Turbidez, pH)	análisis /año	12	\$ 18.00	\$ 216.00
	Trae de protección reutilizable para químicos	Unidad/año	2	\$ 13.00	\$ 26.00
	Mascarillas quirúrgicas (50 pcs x caja)	Cajas/año	7	\$ 2.50	\$ 17.50
	Botas de agua	Par/año	2	\$ 11.50	\$ 23.00
	Guantes de nitrilo (100 pcs x caja)	Cajas/año	4	4.25	\$ 17.00
Total-Costo anual de implementación del sulfato de aluminio				\$ 21,299.50	

Como parte de los costos fijos de los coagulantes, se consideró el costo de la materia prima por año. Para el caso de la moringa como se muestra en la Tabla 13, para clarificar el volumen de agua de descarga anual de la comunidad se necesitarían 4700 semillas anuales. Dado

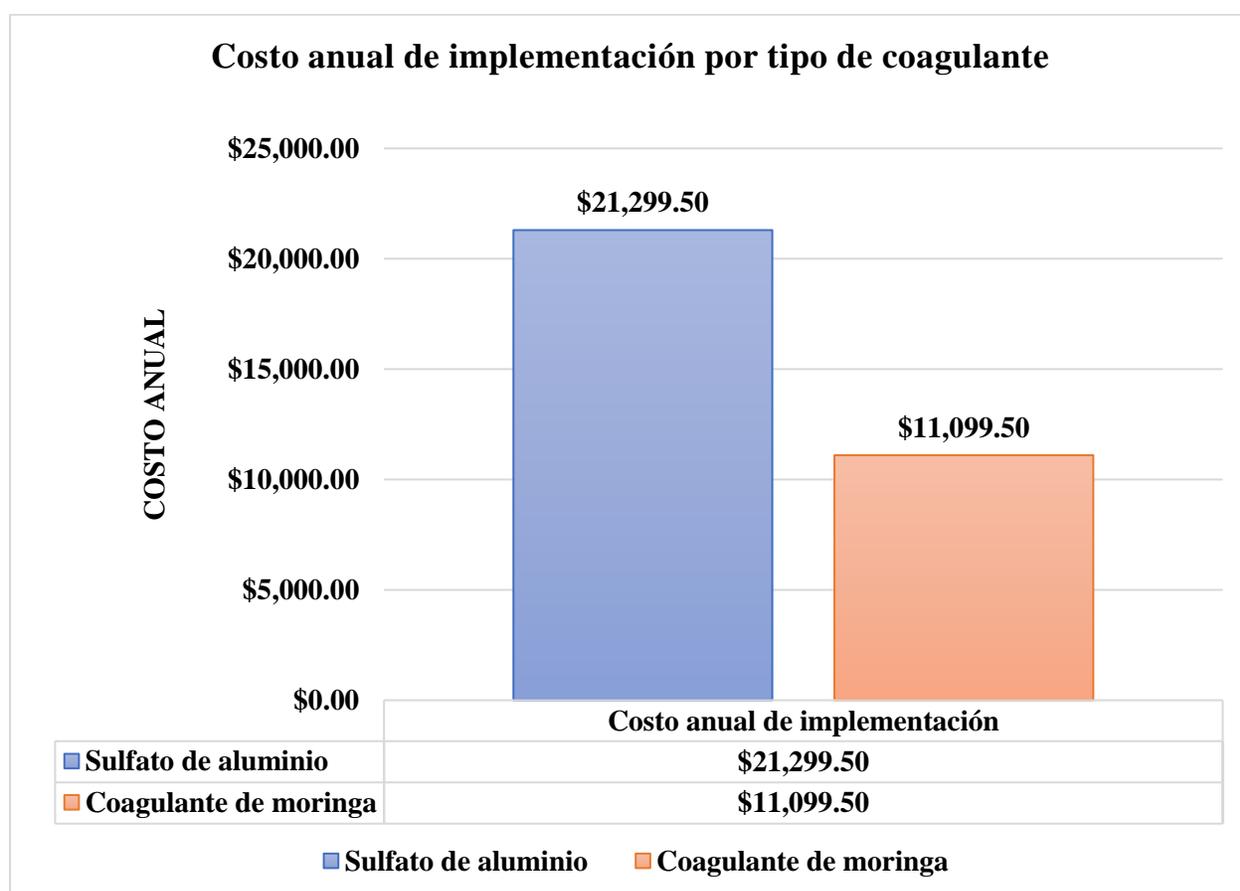
que la comunidad tiene varios de los mismos y el tiempo de cultivo de las semillas es anual, no existe problema con respecto a la cantidad. El siguiente costo fijo mencionado hace referencia al caso en que la PTAR del cantón decida contratar a alguien para llevar a cabo la dosificación y preparación del coagulante por día. Este salario está siendo considerado como el sueldo básico del Ecuador, y es un costo que también se aplicó para el coagulante de moringa. Dentro de los costos variables se ha considerado el traje de protección que se debe llevar al manipular aguas residuales, las mascarillas quirúrgicas por la presencia de cualquier contaminante en el sitio de descarga, las botas de agua por la naturaleza del trabajo y finalmente guantes de nitrilo como medida adicional de seguridad.

Para el sulfato de aluminio como se muestra en la Tabla 14, también se tiene como costo fijo la materia prima, es decir el sulfato de aluminio de preparación de coagulante, y el salario de la persona encargada de preparar y administrar dicha sustancia. Sin embargo, un costo fijo adicional se presenta por la acidificación del agua posterior a la adición del coagulante, la cual requiere tratamiento posterior para cumplir con los límites de descarga del río. La neutralización de la acidez se realiza añadiendo solución de hidróxido de sodio al agua clarificada. Los costos variables son iguales a las de la moringa y corresponden a los equipos de protección personal que se requieren en el manejo de muestras y químicos.

Un costo variable adicional que también se consideró en ambos casos fue el de un análisis químico mensual para el mantenimiento de un control del estado de turbidez y pH de las descargas. Este análisis es opcional, pero proporciona evidencia y control del tratamiento primario realizado.

Como se observa en la Figura 12, los costos mencionados suman un total de \$11099.50 para el coagulante de moringa y un \$21299.50 para el sulfato de aluminio, siendo el coagulante natural un \$10200 más rentable que el inorgánico.

Figura 12 Costo anual de implementación por tipo de coagulante



Dado que el coagulante de moringa es más rentable, menos contaminante y cumple con los límites permisibles de descarga de agua residual a cuerpos de agua dulce, es el coagulante óptimo escogido para el tratamiento primario del agua residual de la comunidad.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Con la finalidad de reducir la carga contaminante de la descarga de agua residual doméstica de la comunidad de Chimborazo a un cuerpo de agua dulce, se seleccionó el coagulante óptimo para un adecuado tratamiento primario, considerando parámetros tales como; la eficiencia de remoción de turbidez , ST , SST, dificultad de preparación del coagulante, variación de pH y costos anuales de implementación. Con este preámbulo se pudo concluir lo siguiente:

- Se realizó un test de jarras en cuatro recipientes distintos para la selección del coagulante óptimo, en el primero se colocó la muestra sin coagulante, y en los restantes se clarificó la muestra con tres coagulantes, uno inorgánico correspondiente a sulfato de aluminio y dos fueron de origen orgánico, a base de moringa y polvillo de arroz. El coagulante inorgánico obtuvo un mayor porcentaje de reducción de turbidez con un valor de 72.20%, seguido por el de moringa con un valor de 53.87% y por último el de polvillo de arroz con un valor de 28.17%, además se evidenció que para el coagulante sulfato de aluminio y polvillo de arroz el pH sufrió alteraciones significativas, mientras que para el coagulante de moringa no hubo variación significativa, por lo tanto se optó por coagulante de moringa, ya que, se obtuvo la segunda mayor tasa de remoción de turbidez y el potencial de hidrógeno se encuentra dentro del valor establecido en la tabla de límites de descarga a un cuerpo de agua dulce correspondiente a la Normativa de Calidad Ambiental.
- Se efectuó la caracterización inicial del agua residual para conocer que parámetros fisicoquímicos modifican sus características , se determinó temperatura, conductividad, turbidez, pH, dureza total, alcalinidad, cloruros, ST, SST, SFT, SVT y materia flotante. Al comparar los

valores obtenidos con los límites permisibles establecidos en la Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua, se identificó que la mayoría cumplen la normativa a excepción del test de visibilidad que confirma la presencia de materia flotante y SST, puesto que en las pruebas realizadas se obtuvo una concentración de 115.73 mg/L de éste último, mientras que el máximo valor permisible es de 80 mg/L, lo cual puede provocar cambios en la turbidez, incremento de temperatura y bajar los niveles de OD.

- Se clarificó el agua residual con el coagulante óptimo a base de moringa y con el sulfato de aluminio, asimismo, se procedió a su posterior caracterización, se determinaron parámetros tales como; pH, ST, SST y el test de visibilidad para identificar la presencia de materia flotante. Como se mencionó anteriormente, el pH fue afectado en la muestra que contenía el coagulante inorgánico, los valores de ST y SST para ambos coagulantes permanecieron dentro del límite permisible, sobre todo no hubo presencia de materia flotante en ninguno de los dos casos, por consiguiente, el coagulante que cumple con los valores permisibles de descarga es el de moringa.
- Se realizó el test de jarras para la optimización del pH para el coagulante de moringa y sulfato de aluminio, para el coagulante orgánico no hubo cambios relevantes del pH final con respecto al pH inicial, mientras que para el inorgánico a medida que la solución se alcaliniza presenta una mayor diferencia en el pH final con respecto al inicial, además se hizo un ensayo para la selección de la dosis óptima la cual fue a 6 mL para ambos coagulantes, por lo que se concluye que a mayor dosis la turbidez disminuye.
- Se realizó un análisis de costos con una proyección anual, basado en la implementación del coagulante de moringa y sulfato de aluminio, cuyo costo es \$21299.50 y \$11099.50 respectivamente, con una diferencia de \$10200.00 al año, por tanto, se concluye que el tratamiento primario del agua residual debe realizarse con el coagulante natural extraído de las

semillas de moringa ya que es más rentable, además al tratarse de una comunidad ubicada en una zona rural resulta beneficioso sembrar moringa, cabe recalcar que esta planta crece en climas tropicales, y no requiere de cuidados especiales.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda implementar un procedimiento de extracción soxhlet para retirar el aceite que poseen las semillas de moringa, y a su vez sea aprovechado para la obtención de un floculante.
- Se recomienda realizar un ensayo para clarificar el agua mezclando los dos coagulantes sulfato de aluminio y moringa a diferentes porcentajes, con el propósito de estudiar la variabilidad en la eficiencia de remoción de turbidez.
- Se recomienda no prolongar el tiempo entre la toma de muestra y la experimentación puesto que parámetros que afectan a la calidad del agua como la turbidez sufren alteraciones generando errores en los análisis realizados.
- Se recomienda congelar los coagulantes de moringa y polvillo de arroz, si es que no se usarán el mismo día de su obtención, con la finalidad de prolongar su tiempo de uso y conservar sus propiedades.
- Se recomienda el uso de coagulantes de origen natural en especial el de moringa, debido a su eficiencia en la remoción de turbidez, no provoca daños ambientales, es económico y produce menor cantidad de lodos.

Referencias

- Adesina, O., Abdulkareem, F., Yusuff, A., Lala, M., & Okewale, A. (2019, Abril). Response surface methodology approach to optimization of process parameter for coagulation process of surface water using Moringa oleifera seed. *South African Journal of Chemical Engineering*, 28, 46-51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.02.002>
- American Public Health Association. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: Cl- B. Argentometric Method* (23rd edition ed.). Washington D.C., Washington, Estados Unidos: American Public Health Association. Retrieved julio 12, 2023
- American Public Health Association. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: Alkalinity 2320-B Titrimetric Method* (23rd edition ed.). Washington D.C., Washington, Estados Unidos : American Public Health Association. Retrieved julio 12, 2023
- American Public Health Association. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: EDTA Titrimetric Method* (23rd Edition ed.). Washington D.C., Washington, Estados Unidos: American Public Health Association. Retrieved julio 12, 2023
- Añazco, H., & Sánchez, A. (2018, mayo). Eficiencia en el tratamiento de aguas residuales rurales de la cuenca media del río arenillas. *Conference Proceedings*, 2(1), 166-178. Retrieved mayo 28, 2023, from <https://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/index>

- Dadebo, D., Ibrahim, M., Fujii, M., & Nasr, M. (2023). Sequential treatment of surfactant-laden wastewater using low-cost rice husk ash coagulant and activated carbon: Modeling, optimization, characterization, and techno-economic analysis. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101-164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101464>
- Delgadillo, O., Camacho, A., & Pérez, L. (2019). Sólidos Totales. In O. Delgadillo , A. Camacho , & L. Pérez, *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (pp. 56,57). Cochabamba, Bolivia: Serie Técnica. Retrieved agosto 27, 2023, from <https://books.google.com.ec/books?id=1kO2J5aDljQC&pg=PA56&dq=solidos+totales+agua&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjgs5qm8JfmAhWrrVkKHbAnA5AQ6AEIKDAA#v=onepage&q=solidos%20totales%20agua&f=false>
- Feria , J. J., & Roa, S. B. (2014, enero). Eficiencia de la semilla Moringa Oleífera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú*. *Producción + Limpia* , 9(1), 12. Retrieved julio 12, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552014000100001
- Feria , J., Bermúdez, S., & Estrada, A. M. (2014). Eficiencia de la semilla Moringa Oleífera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú*. *Producción+Limpia*, 9(1), 50-55. Retrieved mayo 25, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552014000100001
- Fluence. (2017, noviembre 9). Retrieved julio 11, 2023, from <https://www.fluencecorp.com/dissolved-solids-water-purification/>
- Huzir , N., Maniruzzaman, A., Ismail, S., & Mahmood, N. (2019). Optimization of coagulation-flocculation process for the palm oil mill effluent treatment by using rice husk ash.

- Industrial Crops and Products*, 139(1), 112-122.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111482>
- INEC. (2010). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. Retrieved from
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/>
- INEC. (2022). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales-Gestión de Agua Potable y Saneamiento 2021*. Agencia de Regulación y Control del Agua. Diciembre 2022. Retrieved mayo 20, 2023, from
[https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Agua_potable_alcantarrillado_2021/PRESENTACION%20APA%202021_V7%20\(Rev.%20Dicos\).pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Agua_potable_alcantarrillado_2021/PRESENTACION%20APA%202021_V7%20(Rev.%20Dicos).pdf)
- Jantsch , T. G., & Mattiasson, B. (2018, enero). A simple spectrophotometric method based on pH-indicators for monitoring partial and total alkalinity in anaerobic processes.
Environmental Technology, 24(9), 1061-1067.
doi:<https://doi.org/10.1080/09593330309385646>
- José , R., & Suárez , M. (2019). Efecto de la concentración de quitosano en la disminución de los sólidos suspendidos en el agua de ingreso a la planta de tratamiento de Bellavista.
FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 7(1), 19-24.
doi:<https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1330>
- Kwan, W. H., & Wong , S. Y. (2020). Acid leached rice husk ash (ARHA) in concrete: A review.
Materials Science for Energy Technologies, 3, 501-507.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.05.001>

- Lozano , W., & Lozano, G. (2015). *Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio* (1 ed., Vol. 1). Bogotá, Colombia: Universidad Pileto de Colombia. Retrieved junio 15, 2023, from https://www.google.com.ec/books/edition/Potabilizaci%C3%B3n_del_agua/3uk0DwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1
- Mackenzie, L. (2012). *Water and Wastewater Engineering-Design: Principles and Practices*. Estados Unidos: McGraw Hill .
- Menya, E., Olupot, P. W., Storz, H., & Kiros, Y. (2018). Production and performance of activated carbon from rice husks for removal of natural organic matter from water: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 271-296.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.11.008>
- MetCalf, E. (1977). *Tratamiento y depuración de aguas residuales*. Barcelona: Labor S.A.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE: NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DESCARGA DE EFLUENTES AL RECURSO AGUA*. Ecuador: Decreto Ejecutivo 3516. Retrieved agosto 23, 2023, from <https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROPUESTA%20ANEXO%201.pdf>
- Navarro, N. (2023). *ISA: Ingeniería y servicios ambientales*. Retrieved junio 20, 2023, from <https://isa.ec/prueba-de-jarras/>
- Nova, L. (2018). *Manual para la Formación del Medio Ambiente*. Bureau Veritas. Retrieved abril 24, 2023, from <https://books.google.com.ec/books?id=J7rMDpW49ZQC&pg=PA226&dq=Coagul>

aci%C3%B3n+y+floculacion&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwio4Yyk7ej7AhWRTTA
 BHURkDuQQ6AF6BAgLEAI#v=onepage&q=Coagulaci%C3%B3n%20y%20flocu
 lacion&f=false

Organization, W. H. (2013). *Hardness in Drinking-water*.

Postolachi, L., Rusu, V., & Lupascu, T. (2016, junio). Effect of Aluminium Sulphate Aging on
 Coagulation Process for the Prut River Water Treatment. *Chemistry Journal of Moldova*,
 11(1), 27-32. doi:10.19261/cjm.2016.11(1).03

Quispe Pérez, M. L., Piñas Rivera, L. C., Del Valle González, J. R., & Aguirre Chávez, F. (2020).
Aplicaciones tecnológicas de tratamiento de aguas residuales. México: Nosótrica
 Ediciones.

Reshi, M., & Muhammad, M. (2019). Study of the failure of condenser tube in water cooled
 centrifugal chiller. *Journal of Physisc: Conference Series*, 23. Retrieved agosto 24, 2023

Riffat, & Rumana. (2014). *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering* (1 ed.).
 Estados Unidos: Taylor Press. Retrieved abril 25, 2023

Rodie, E. B., & Hardenberg. (1987). *Ingeniería Sanitaria*. México D.F: Continental S.A. de C.V.

Rusydi, A. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of
 water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Retrieved
 agosto 21, 2023

Sand, A., & Zaki, E. (2020). *Organic Polymers*. London, United Kingdom: Intech Open.

Retrieved mayo 29, 2023, from

<https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=mJ8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA51>

&dq=inorganic+coagulants+vs+organic+coagulants+wastewater+treatment&ots=97x7V
LmzG3&sig=PrHfK_gb8igpK16VIWIG6gY5qNc&redir_esc=y#v=onepage&q=inorgani
c%20coagulants%20vs%20organic%20co

Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., & Zahoor, A. (2013). Global, regional and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, 1-13.

Sengupta, P. K. (2017). *Industrial Water Resource: Challenges and Opportunities for Corporate Water Stewardship*. John Wiley & Sons. Retrieved octubre 30, 2022

Spellman, F. R. (2020). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (4th ed.). Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC Press: Taylor & Francis Group.
Retrieved julio 12, 2023, from
https://www.google.com.ec/books/edition/Handbook_of_Water_and_Wastewater_Treatment/x3HnDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=spellman+2020+water&pg=PA632&printsec=frontcover

Tan, K. L., Lim, K. Y., Chow, Y. N., Liew, Y. S., & Desa, S. M. (2022, Abril). Facile preparation of rice husk-derived green coagulant via water-based heatless and salt-free technique for the effective treatment of urban and agricultural runoffs. *Industrial Crops and Products*, 178, 23. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114547>

Torske, M. (2019). *Yakunina*. Retrieved from <https://www.yakunina.com>

University of Massachusetts Amherst. (2016, abril 11). *Massachusetts Water Watch Partnership*. Retrieved agosto 25, 2023, from pH and Alkalinity for Rivers:
https://www.umass.edu/mwwp/protocols/rivers/ph_alkalinity_river.html

Waller, J., & Webber, J. (2008). *Control de calidad del agua: Procesos fisicoquímicos*. España: Reverté. Retrieved abril 25, 2023, from

<https://books.google.com.ec/books?id=S9MfEAAAQBAJ&pg=PA85&dq=alcalinidad+y+coagulacion&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjEm7rNgen7AhWuVzABHfASAdkQ6AF6BAgJEAI#v=onepage&q=alcalinidad%20y%20coagulacion&f=false>

WWAP. (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos*. París: UNESCO .

WWAP. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020*. ONU-Agua, UNESCO. Perugia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Retrieved mayo 27, 2023, from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882_spa/PDF/372882spa.pdf.multi

WWAP. (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022*. Perugia: UNESCO. Retrieved mayo 27, 2023, from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa/PDF/380726spa.pdf.multi

Apéndice A

Tabla 15 *Límites permisibles de descarga de aguas residuales en cuerpos de agua dulce*

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Cloro	Cl-	mg/L	0,5
Materia flotante	Visible	-	Ausencia
Potencial de hidrogeno	pH	-	6 a 9
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	80
Sólidos totales	ST	mg/L	1600

Fuente Anexo 1 del Libro VI del texto unificado de Legislación secundaria del Ministerio del Ambiente:

Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua

<https://www.cip.org.ec/attachments/article/1579/PROPUESTA%20ANEXO%201.pdf>

Apéndice B

Tabla 16 Datos de la caracterización inicial

	Conductividad (Us/cm)	631,5
	Turbidez (NTU)	32,3
	pH	7,33
Dureza	Volumen de muestra (mL)	50
	Volumen inicial (mL)	0,2
	Volumen final (mL)	1,1
	Volumen consumido (mL)	0,9
	Indicador	Negro de Eriocromo T
	Concentración del titulante (M)	0,01
Alcalinidad	Dureza total (mgCaCO ₃ /L)	180
	Volumen de muestra (mL)	100
	pH inicial	7,33
	Volumen inicial (mL)	0
	Volumen final (mL)	14,6
	Volumen consumido (mL)	14,6
	Concentración del titulante (N)	0,02
	pH final	4,5
	Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /L)	14,6
Cloruros	Volumen de muestra (mL)	100
	pH inicial	7,33
	Volumen inicial (para la muestra) (mL)	0,6
	Volumen final (para la muestra) (mL)	8,8
	Volumen consumido (para la muestra) (mL)	8,2
	Volumen inicial (para el blanco) (mL)	0
	Volumen final (para el blanco) (mL)	3
	Volumen consumido (para el blanco) (mL)	3
	Indicador	Cromato de potasio
	Concentración del titulante AgNO ₃ (N)	0,013
	Cloruros (Cl ⁻)	23,9642

Tabla 17 Datos de sólidos totales de muestra de agua residual

Parámetros que considerar	Crisol 1	Crisol 2	Crisol 3	Volumen muestra
---------------------------	----------	----------	----------	-----------------

Identificación	1A	2A	3A	0,0125
M1=Masa de Crisol seco. (g)	45,2659	43,1917	44,1287	
M2=Masa de Crisol seco con sólidos totales. (g)	45,2708	43,1961	44,1334	
M3=Masa de Crisol + sólidos fijos totales (g)	45,2696	43,1952	44,1323	

Tabla 18 *Determinación de sólidos totales de la muestra de agua residual*

Solidos-Agua residual sin coagulante	Crisol 1	Crisol 2	Crisol 3	Promedio
Solidos totales (mg/L)	392,00	352,00	376,00	373,33
Solidos Fijos Totales (mg/L)	296,00	280,00	288,00	288,00
Solidos volátiles totales (mg/L)	96,00	72,00	88,00	85,33

Tabla 19 *Datos de sólidos totales de muestra de agua residual tratada con sulfato de aluminio*

Parámetros	Crisol 1	Crisol 2	Crisol 3	Volumen muestra
Identificación	1A	2A	3A	0.0125
M1=Masa de Crisol seco. (g)	45.2757	43.1928	44.1397	
M2=Masa de Crisol seco con sólidos totales. (g)	45.2785	43.1952	44.1423	
M3=Masa de Crisol + sólidos fijos totales (g)	45.2777	43.1945	44.1416	

Tabla 20 *Determinación de sólidos totales en muestra de agua tratada con sulfato de aluminio*

Solidos-Sulfato de aluminio	Crisol 1	Crisol 2	Crisol 3	Promedio
Solidos totales (mg/L)	224.00	192.00	208.00	208.00
Solidos Fijos Totales (mg/L)	158.40	136.80	151.20	148.80
Solidos volátiles totales (mg/L)	65.60	55.20	56.80	59.20

Tabla 21 *Datos de sólidos totales de muestra de agua residual tratada con coagulante de moringa*

Parámetros	Crisol 1	Crisol 2	Crisol 3	Volumen muestra
Identificación	1A	2A	3A	0.0125
M1=Masa de Crisol seco. (g)	45.2657	43.1919	44.1289	
M2=Masa de Crisol seco con sólidos totales. (g)	45.2687	43.1951	44.1322	
M3=Masa de Crisol + sólidos fijos totales (g)	45.2679	43.1943	44.1314	

Tabla 22 *Determinación de sólidos totales en muestra de agua tratada con el coagulante de moringa*

Solidos-Moringa	Crisol 1	Crisol 2	Crisol 3	Promedio
Solidos totales (mg/L)	240.00	256.00	264.00	253.33
Solidos Fijos Totales (mg/L)	176.00	195.20	196.80	189.33
Solidos volátiles totales (mg/L)	64.00	60.80	67.20	64.00

Apéndice C

Figura 13 *Descarga de agua residual en la comunidad Chimborazo*



Figura 14 *Muestras de agua residual envasadas*



Figura 15 Polvillo de arroz molido



Figura 16 Determinación de sólidos



Figura 17 Test de jarras

