

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD Y COLIFORMES FECALES DEL
EFLUENTE DE LA PTAR – CELENDIN UTILIZANDO SEMILLAS DE *Moringa*
*oleífera***

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

ZONALI PAZ, ANGULO PLASENCIA

ASESOR:

ING. M. Cs. GIOVANA ERNESTINA, CHÁVEZ HORNA

CAJAMARCA – PERÚ

2025



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
ZONALI PAZ ANGULO PLASENCIA
DNI N° 73302241
Escuela Profesional/Unidad UNC:
DE INGENIERÍA AMBIENTAL
2. Asesor:
ING. M. Cs. GIOVANA ERNESTINA, CHÁVEZ HORNA
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado Académico o título profesional:
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título del trabajo de investigación:
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD Y COLIFORMES FECALES DEL EFLUENTE DE LA PTAR – CELENDÍN UTILIZANDO SEMILLAS DE *Moringa Oleifera*.
6. Fecha de evaluación: 04/02/2025
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (ORIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 20%
9. Código documento:
10. Resultado de la evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha de Emisión: 10/09/2025

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 ING. M. Cs. GIOVANA ERNESTINA, CHÁVEZ HORNA DNI: 40432609

*En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Celendín, a los veinticuatro días del mes de julio del año dos mil veinticinco, se reunieron en el aula 101 de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental - Sede Celendín, los miembros del Jurado, designados según Resolución de Consejo de Facultad N° 219-2025-FCA-UNC, de fecha 12 de mayo del 2025, con la finalidad de evaluar la sustentación de la TESIS titulada: "PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD Y COLIFORMES FECALES DEL EFLUENTE DE LA PTAR- CELENDÍN UTILIZANDO SEMILLAS DE *Moringa oleifera*", realizada por la Bachiller ZONALI PAZ ANGULO PLASENCIA para optar por el Título Profesional de INGENIERO AMBIENTAL.

A las CATORCE horas con CERO minutos, de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca, el presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el presidente del Jurado anunció la APROBACIÓN por UNANIMIDAD con calificativo de QUINCE (15) por tanto, la Bachiller queda expedido para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de INGENIERO AMBIENTAL.

A las QUINCE horas y CINCO minutos del mismo día, el presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Ing° M. Cs. Edgar Darwin Díaz Mori
PRESIDENTE

Ph.D. Manuel Roberto Roncal Rabanal
SECRETARIO

Ing. M. Cs. Adolfo Máximo López Aylas
VOCAL

Ing° M. Cs. Giovana Ernestina Chávez Horna
ASESOR

COPYRIGHT © 2025 by
ZONALI PAZ ANGULO PLASENCIA
Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi Padre Eterno Todo Poderoso, quien más que él, que siempre está para mí.

A mi Flavio Alessandro, motor y motivo.

A mi madre Rosa Plasencia, ternura y empuje.

A mi padre Sixto Angulo, fuerza y coraje.

A mis hermanas Berenice y Joaquina, compañeras de toda la vida

AGRADECIMIENTO:

Quiero expresar mi profundo agradecimiento. Primero, a Dios, por darme salud y fortaleza. A mis padres, por su apoyo incondicional, que ha sido clave para alcanzar mis metas personales y profesionales.

También quiero agradecer de todo corazón a mi asesora, la Ing. M. Cs. Giovana E. Chávez Horna, por su dedicación y paciencia. Sus palabras y correcciones precisas fueron fundamentales para llegar hasta aquí. Gracias por su guía y consejos, los llevaré siempre en mi memoria y los aplicaré en mi camino profesional.

ÍNDICE GENERAL

Ítem	Página
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO:	VI
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II.....	4
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Antecedentes de la Investigación	4
2.2. Bases Teóricas.....	7
2.2.1 <i>Coagulación</i>	7
2.2.2 <i>Floculación</i>	9
2.2.3 <i>Mecanismos de coagulación – floculación</i>	10
2.2.4 <i>Aguas residuales domésticas</i>	15
2.2.5 <i>Coagulante natural</i>	19
2.2.6 <i>Semillas de M. oleifera</i>	20
2.3. Definición de Términos Básicos	23

2.3.1.	<i>Coagulante natural</i>	23
2.3.2.	<i>Coagulante</i>	23
2.3.3.	<i>Turbiedad</i>	23
2.3.4.	<i>Microorganismo</i>	23
CAPÍTULO III		25
MATERIALES Y MÉTODOS		25
3.1.	Localización de la investigación	25
3.2.	Materiales.....	25
3.3.	Metodología	27
3.3.1.	<i>Factor y variable independiente, niveles y tratamientos en estudio</i>	28
3.3.2.	<i>Procedimiento del experimento</i>	29
3.3.3.	<i>Evaluaciones realizadas (variables dependientes)</i>	29
3.3.4.	<i>Obtención del coagulante natural</i>	30
3.3.5.	<i>Proceso de remoción de turbiedad</i>	31
3.3.6.	<i>Diseño experimental</i>	31
3.3.7.	<i>Análisis de los indicadores de calidad</i>	32
3.3.8.	<i>Tratamiento y análisis de datos</i>	33
CAPÍTULO IV		35
4.1.	Porcentaje y concentraciones de turbidez y coliformes termotolerantes.....	35

4.2.	Porcentaje de remoción de la turbidez.....	36
4.3.	Turbidez.....	37
4.4.	Porcentaje de remoción de la concentración de coliformes termotolerantes (CCT).....	41
4.5.	Concentración de coliformes termotolerantes (CCT).....	41
4.6.	Sólidos disueltos totales (TDS).....	46
4.7.	Porcentaje de remoción de sólidos disueltos totales (TDS).....	49
4.8.	Unidades de pH.....	50
CAPÍTULO V		53
Conclusiones y Recomendaciones.....		53
5.1.	Conclusiones	53
5.2.	Recomendaciones.....	54
CAPÍTULO VI.....		55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		55
CAPÍTULO VII.....		61
ANEXOS		61
ANEXO 1. Presentación de la información y matriz de consistencia.....		62
ANEXO 2. Cálculos de los resultados.		64
ANEXO 3. Panel fotográfico la toma de muestras y obtención de las dosis del coagulante (<i>M. oleifera</i>).....		65
ANEXO 4. Resultados de los análisis del Laboratorio Regional del Agua		71

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	página
Tabla 1 Clasificación y origen de <i>M. oleifera</i>	21
Tabla 2 Niveles y tratamiento en estudio.....	28
Tabla 3 Variables dependientes.....	30
Tabla 4 Croquis del experimento.....	33
Tabla 5 Método del ensayo.....	33
Tabla 6 Porcentaje y concentraciones de turbidez y coliformes termotolerantes.....	35
Tabla 7 Porcentaje de remoción de la turbidez.....	36
Tabla 8 Análisis de varianza (ANOVA) para la turbidez.....	39
Tabla 9 Prueba de significación de Tukey al 5% entre los grupos para la Turbidez.....	40
Tabla 10 Prueba de Q Test entre los grupos para la concentración de Turbidez	39
Tabla 11 Porcentaje de remoción de la concentración de coliformes termotolerantes (CCT)..	40
Tabla 12 Análisis de varianza (ANOVA) para la concentración de coliformes termotolerantes	44
Tabla 13 Prueba de significación de Tukey al 5% entre los grupos para la concentración de coliformes termotolerantes	45
Tabla 14 Prueba de Q Test entre los grupos para la concentración de coliformes termotolerantes (CCT).....	45
Tabla 15 Análisis de varianza (ANOVA) para sólidos disueltos totales (TDS)	48
Tabla 16 Prueba de significación de Tukey al 5% entre los grupos para los sólidos disueltos totales.....	48

Tabla 17 Prueba de Q Test entre los grupos para la concentración de sólidos disueltos totales	49
Tabla 18 Porcentaje de remoción de sólidos disueltos totales	50
Tabla 19 Análisis de varianza (ANOVA) para unidades de	51
Tabla 20 Esquema del diseño completamente al aza	62
Tabla 21 Esquema del análisis de varianza completamente al azar (DCA).....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	página
Figura 1 Neutralización de cargas de un coloide por adición de coagulante	8
Figura 2 Representación de fuerzas de atracción y repulsión.	12
Figura 3 Formación de flóculos y consecuencia por exceso de coagulante.	13
Figura 4 Formación de puente entre partículas en suspensión por adición de polímero.	14
Figura 5 Atrapamiento de partículas en un floculo.....	15
Figura 6 Representación de fuerzas de atracción y repulsión.	19
Figura 7 Ubicación del trabajo de investigación.	26
Figura 8 Procedimiento del experimento	29
Figura 9 Porcentaje de remoción de la turbidez	31
Figura 10 Turbidez NTU en promedio.....	44
Figura 11 Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes CCT	41
Figura 12 Coliformes termotolerantes en promedio	37
Figura 13 Sólidos disueltos totales (TDS) en promedio	47
Figura 14 Porcentaje de remoción de sólidos disueltos totales.	47
Figura 15 Unidades de pH en promedio	50

RESUMEN

Se evaluó la eficiencia de las semillas de *Moringa oleifera* como coagulante natural en la remoción de turbidez y coliformes fecales del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín, Cajamarca. Se aplicó un diseño experimental, complementado con un estudio de variación aleatoria de un factor en múltiples muestras, con un grado de confianza del 95%. Para ello, se llevaron a cabo exámenes de coagulación/floculación, añadiendo dosis del coagulante natural *M. oleifera*, obtenido a través de la pulverización de las semillas. Las muestras de agua residual fueron recolectadas a la salida de la laguna facultativa de la PTAR - Celendín. Por cada periodo de análisis se obtuvo 16 unidades experimentales, distribuidas de la siguiente manera 3 tratamientos por cuatro repeticiones más 4 blancos, las dosis aplicadas fueron (T1): 0.5 g/L, (T2): 1 g/L y (T3) 1.5g/L. se realizó 2 estudios de muestras de agua distribuidos de igual manera obteniendo un total de 32 unidades experimentales. Los análisis se realizaron en el laboratorio Regional del Agua – Cajamarca, acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025. Los resultados evidenciaron que la dosis de 1.5 g/L logró la mayor eficiencia de remoción, alcanzando un 80.91%, en la concentración de coliformes termotolerantes, 75.55 % en turbidez, 13.56 % en sólidos disueltos totales, manteniendo un pH promedio de 7.08. No obstante, pese a la alta eficiencia, los niveles de coliformes termotolerantes tuvieron un valor promedio de 1.57175×10^5 NMP/100mL en el T4, sobrepasando los límites máximos permisibles, establecidos en la normativa nacional N° 003-2010-MINAM que establece un valor máximo de 10 000 NMP/100 mL.

Palabras clave: coagulación/floculación, *M. oleifera*, remoción.

ABSTRACT

We evaluated the efficiency of *Moringa oleifera* seeds as a natural coagulant in the removal of turbidity and fecal coliforms from the effluent of the wastewater treatment plant of Celendín, Cajamarca. An experimental design was applied, complemented by a study of random variation of one factor in multiple samples, with a confidence level of 95%. For this, coagulation/flocculation tests were carried out, adding doses of the natural coagulant *M. oleifera*, obtained by spraying the seeds. The waste water samples were collected at the exit of the PTAR - Celendín optional lagoon. For each period of analysis 16 experimental units were obtained, distributed as follows 3 treatments by four repetitions plus 4 targets, the doses applied were (T1): 0.5 g/L, (T2): 1 g/L and (T3) 1.5g/L. were carried out 2 studies of water samples equally distributed, resulting in a total of 32 experimental units. The analyses were carried out at the Regional Laboratory of Water - Cajamarca, accredited under ISO/IEC 17025. The results showed that the dose of 1.5 g/L achieved the highest removal efficiency, reaching 80.91%, in the concentration of thermotolerant coliforms, 75.55% in turbidity, 13.56% in total dissolved solids, maintaining an average pH of 7.08. However, despite the high efficiency, the levels of thermotolerant coliforms had an average value of 1.57175×10^5 NMP/100mL in T4, exceeding the maximum permissible limits, established in national regulation No 003-2010-MINAM setting a maximum value of 10,000 NMP/100 mL.

Keywords: Coagulation/flocculation, *M. oleifera*, removal.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las aguas domésticas no tratadas son una de las principales causas de contaminación de los recursos hídricos, en los países ricos el 70 % de éstas son tratadas, un 38% en los países sub desarrollados y solamente el 8% en los países con escasos recursos (Jiménez et al., 2010).

De acuerdo con el reporte de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS, 2022) sobre las 202 instalaciones de plantas donde se tratan las aguas residuales, se recopiló información sobre la infraestructura, funcionamiento, conservación y eficacia del tratamiento a través de formatos enviados por las compañías proveedoras durante el periodo 2020-2021. Se llevaron a cabo inspecciones de campo para confirmar en el lugar 175 PTAR y a distancia 27 PTAR. En el contexto de 36 compañías prestadoras, se constató que: 171 se encontraban en funcionamiento, 27 estaban paralizadas y 4 en proceso de construcción (p. 26).

Campos (2020), menciona que el agua es el recurso natural es esencial para mantener la vida en el planeta; sin embargo, está siendo ampliamente contaminadas cuándo las personas arrojan basura o vierten aguas residuales en los cuerpos de aguas, terminan contaminándolos y afectando su calidad impidiendo el consumo o utilización directa del agua.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) menciona que el incremento de la población mundial, la falta de agua de buena calidad, la expansión acelerada de las ciudades y el aumento en el costo de los fertilizantes han llevado a que cada vez se utilicen más aguas

residuales, aguas grises y desechos orgánicos en la agricultura y la acuicultura, de este modo se vuelve más complicado adquirir nuevas fuentes de agua, debido a las grandes contaminaciones que se viene dando a este recurso.

De acuerdo con el reporte anual Perú de estadísticas ambientales, publicado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2019), en 2018, la descarga de aguas residuales domésticas sin tratamiento aumentó en un 5.2% en comparación con el año anterior. Además, evidencia que, durante el año 2018, en el departamento de Cajamarca se descargaron 7 742 474 m³ de aguas residuales sin tratamiento, lo que lo coloca en la posición 10 a escala nacional.

En muchas ciudades al no contar con una instalación para el tratamiento de aguas residuales y con el afán de liberarse de este problema y de la responsabilidad, sus aguas domésticas desembocan en las fuentes superficiales, aumentando significativamente la turbiedad y alterando sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Frente a lo expuesto, es necesario buscar alternativas que permitan minimizar este problema, siendo una de ellas la utilización de la semilla de *M. oleifera*, como tratamiento primario en aguas residuales domésticas; en la investigación se pretende determinar su eficiencia en remoción de turbiedad y coliformes fecales en aguas domésticas.

Las semillas de *M. oleifera* poseen características coagulantes que permiten la clarificación de diversos tipos de agua a diferentes niveles de turbidez. Este método, asequible y sencillo de implementar, potencia la calidad de vida en las comunidades. Las proteínas divalentes floculantes presentes en las semillas de *M. oleifera* facilitan la eliminación de la turbidez y coliformes fecales en efluentes de aguas residuales (Vela, 2016, pág.19).

La investigación fue de tipo experimental con enfoque cuantitativo, utilizando un diseño completamente al azar con arreglo factorial, donde se aplicaron distintas dosis de coagulante natural extraído de semillas de *M. oleifera* (0.5, 1.0 y 1.5 g/L) sobre muestras de agua residual doméstica provenientes de la PTAR de Celendín. Se evaluaron parámetros como turbidez, sólidos disueltos totales, coliformes termotolerantes y pH, mediante métodos estandarizados en laboratorio acreditado. Los resultados demostraron que la dosis de 1.5 g/L alcanzó la mayor eficiencia de remoción: 80.91 % en coliformes termotolerantes, 75.55 % en turbidez, 13.56 % en sólidos disueltos, manteniéndose el pH en un promedio de 7.08.

El objetivo general fue determinar el porcentaje de remoción de turbiedad y coliformes fecales del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín utilizando semillas de *M. oleifera*, como objetivos específicos tenemos los siguientes:

Determinar los valores de turbiedad del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín, previo y posterior al tratamiento con semillas de *M. oleifera*.

Determinar las concentraciones de coliformes fecales del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín, previo y posterior al tratamiento con semillas de *M. oleifera*.

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes de la Investigación

Mera et al., (2016) evaluaron el impacto del polvo de semilla de *M. oleifera* como un coagulante y floculante natural en el tratamiento de aguas residuales. Para ello, se realizaron pruebas con el test de jarras, agitándolo a 130 revoluciones por minuto, a una temperatura de 21.5 °C, durante 30 minutos. Los autores, determinaron la calidad del agua evaluando indicadores de turbidez, pH, conductividad eléctrica, cloruros, sólidos suspendidos, coliformes totales y fecales. Los resultados obtenidos indicaron que, para el parámetro de turbiedad, empleando 4g de polvo de *M. oleifera* en 600 mL de agua residual se obtuvo una eficiencia del 92% y con la dosis de 0.15 g/600 mL, lograron una remoción de 80%. Asimismo, los autores concluyen que el polvo de semilla de *M. oleifera* es una alternativa efectiva para el tratamiento de aguas residuales, mejorando parámetros físicos, químicos y microbiológicos en un 80,9%.

Los autores Hernández y Perilla (2019), determinaron la efectividad del biocoagulante obtenido de las semillas de *M. oleifera* es clave para conseguir un tratamiento adecuado de aguas residuales con niveles bajos de turbidez. Es una investigación tipo experimental, donde se analizó tres dosis de *M. oleifera* 0.10g, 0.15g y 0.25g, evaluando los diferentes indicadores pH, sólidos totales disueltos, turbidez, conductividad eléctrica, cloruros, acidez y alcalinidad, concluyen que con relación al pH no existe mucha variación, con respecto a la turbidez se logra

una mayor remoción con la dosis 0.25 g/L de 12.6 NTU a 5.1 NTU. Con respecto de la acidez, la dosis de 0,15 g/l provocó un aumento menos marcado en la acidez de la muestra (10, 20 mg CaCO_3/L) en comparación con las otras dosis. Resultados similares se observaron al medir la alcalinidad. Al tratar las muestras con las tres dosis diferentes, los valores de alcalinidad aumentaron: con 0,10 g/l subió de 37,48 mg CaCO_3/L a 65,34 mg CaCO_3/L ; con 0,15 g/l alcanzó los 64,88 mg CaCO_3/L , y con 0,25 g/l llegó a 65,34 mg CaCO_3/L .

Rubí et al., (2011), utilizaron la semilla de *M. oleifera* como coagulante para mejorar la calidad del agua en un sistema de lagunas de estabilización de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, ubicada en la región Zuliana, Venezuela. Para evaluar su efectividad, se realizaron pruebas de jarra y se analizaron parámetros como turbidez, color, pH, alcalinidad total, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales. En TDS tuvieron valores de reporto un inicial 560 y un decantado de 360 mg/L, turbiedad inicial de 75 y 145 NTU y para su remoción utilizaron valores de dosis de 300 y 480 mg/L de la solución coagulante de *M. oleifera*. Los autores concluyen que, con las dosis de *M. oleifera* mencionadas, la remoción de turbidez fue 95.5% y 89.8%, el color se redujo en un 80% y 60%, respectivamente. Del mismo modo concluyen que la aplicación de la solución coagulante no tuvo un impacto significativo en los valores de alcalinidad ni en el pH.

Mejía et al., (2020) evaluaron los parámetros de DBO_5 , DQO, pH, turbiedad y SST, determinando así la efectividad de la *M. oleifera*, como coagulante en el tratamiento de aguas con alta turbidez y alta demanda bioquímica de oxígeno. Los ensayos lo realizaron por triplicado a fin de tener reproductibilidad de los resultados. De los resultados los autores concluyen que las remociones de turbiedades alcanzadas fueron de 80.1% con una dosis de 1g/L, un 76.4% con 1.2 g/L y 74.1% con 1.5g/L, Cuando el coagulante natural se aplicó en polvo, utilizando

una dosis de 0.5 g/L, se lograron los mejores resultados: una remoción del 97.8% de turbidez, 89.9% de sólidos suspendidos totales (SST), 51.4% de demanda química de oxígeno (DQO) y 35.3% de demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO₅). Sin embargo, se notó un aumento en la fracción orgánica soluble tras el uso del coagulante natural, lo que requiere un tratamiento secundario después de la coagulación. Los autores concluyen que los coagulantes naturales son una excelente opción para eliminar contaminantes con alta carga orgánica y turbidez, representando una alternativa viable para el tratamiento primario en zonas rurales con baja demanda de agua.

Arias et al., (2017) utilizaron el polvo de la semilla de la *M. oleifera* como coagulante natural para tratar las aguas residuales de un camal. Los autores obtuvieron el polvo mediante la pulverización de semillas y extracción de su polvo. Utilizaron diversas dosis de polvo de *M. oleifera* que varían entre 0.5 g/L hasta 10g/L, de los cuales los autores afirman que la dosis más recomendada fue de 7.5 g/L. Por tanto, según sus resultados obtenidos en las pruebas de eficiencia reportados. En términos generales, se observó una remoción y reducción en todos los parámetros establecidos para este estudio, logrando un 55,2% de remoción de DBO₅, 49,4% de DQO y 29,7% de sólidos suspendidos totales (TSS). Además, los resultados más destacados fueron los de coliformes totales y fecales, con porcentajes de eliminación del 96,3% y 98,5%, respectivamente.

Según lo investigado por el autor se puede determinar que la *M. oleifera* tiene un buen poder coagulador y floculador, logrando altos porcentajes de remoción en los indicadores que tiene como objetivo la presente investigación. Los antecedentes descritos, permitieron mejorar la metodología y seleccionar las dosis más eficientes para la realización del trabajo de investigación.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1 Coagulación

Es el proceso utilizado para tratar el agua, en el cual se separan las partículas pequeñas que permanecen en suspensión debido a su tamaño. Para ello, se agrupan en partículas más grandes, lo que facilita su eliminación por sedimentación. (Aguilar Ascón, 2010, p. 28)

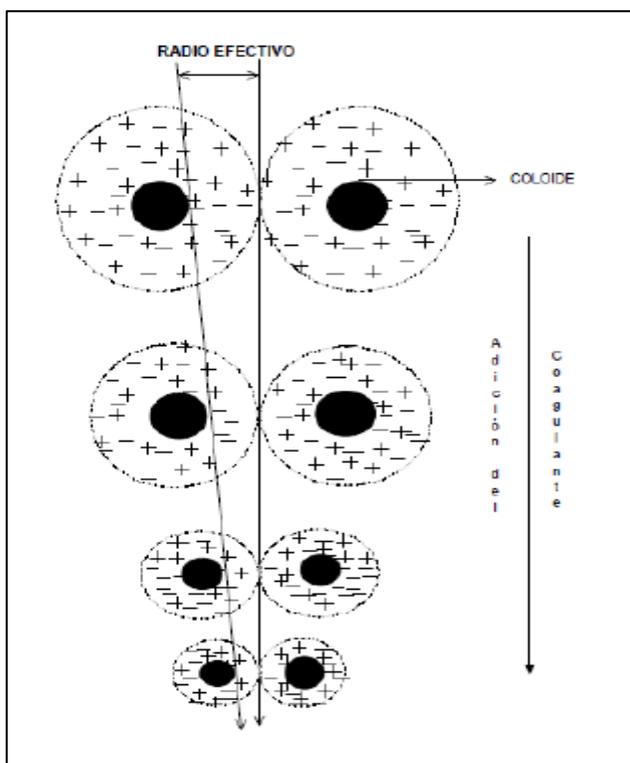
“Las partículas en el agua, pueden clasificarse como hidrófobas e hidrófilas, la principal propiedad eléctrica de las partículas finas en el agua es la carga superficial” (Infante y Carrera, 2015, p. 32). Por otro lado, Ramírez Cortina (1992), plantea que “para romper la estabilidad en partículas coloidales y separarlas, se realiza tres operaciones: la coagulación, la floculación y la decantación o flotación posterior” (p.58).

El agua contiene diferentes tipos de partículas, que se dividen en suspendidas y coloidales según su tamaño. Los coloides, que miden menos de aproximadamente 1 μm , son tan pequeños y ligeros que tardan mucho más en sedimentar, lo que los hace más estables en el agua. Debido a esto, es necesario utilizar coagulantes para eliminarlos eficazmente. (Anselme et al., 1994).

La coagulación es un “proceso se basa en desestabilizar partículas y coloides, mediante adición de coagulantes, originando agregados como flóculos de mayor tamaño, luego realiza la filtración y eliminación de flóculos” (Arboleda Valencia, 2000, p.20). “Además de remover la turbidez, contribuye a la eliminación de materia orgánica y microorganismos” (Andía Cárdenas, 2000, p. 20).

Figura 1

Neutralización de cargas de un coloide por adición de coagulante



Fuente: Andía (2000).

Sin embargo, para lograr el proceso de coagulación es necesario añadir algún aditivo que tenga estas propiedades, como lo menciona Bueno, quien explica que “coagulación–floculación consiste en añadir al agua residual aditivos químicos con el objetivo de favorecer la sedimentación de materia coloidal o aumentar la rapidez de sedimentación” (Bueno, 1997, p.45).

En términos generales, la coagulación es un proceso en el que se reduce el potencial repulsivo de la doble capa eléctrica de los coloides, permitiendo la formación de micropartículas. Estas, al colisionar entre sí, generan estructuras más grandes conocidas como floculos, los cuales luego pasan al proceso de floculación. (Matilainen et al., 2010)

Según Andía Cárdenas (2000), “coagulación proceso de la desestabilización química de partículas coloidales, se producen al neutralizar fuerzas que las mantienen separadas por medio de adición de coagulantes químicos” (p.25). Por otro lado, Aguilar menciona “el proceso de coagulación mal realizado, conduce a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas” (Aguilar Ascón, 2010, p. 18).

2.2.2 Floculación

Es un proceso químico en el que se añaden floculantes para que las partículas coloidales del agua se agrupen, facilitando su filtración y eliminación. La floculación ocurre después de la coagulación, por lo que ambos suelen mencionarse juntos como parte del proceso de coagulación-floculación. (Aguilar, 2013)

Feria y Polo (2016) citado por Suárez (2019), mencionan que la aglomeración forma flóculos que no son lo suficientemente grandes para sedimentar rápidamente, por lo que se necesita un floculante que los conecte en una red, agrupando las partículas individuales. La mezcla lenta favorece este proceso, permitiendo que los flóculos se unan gradualmente, mientras que una mezcla intensa los separa y dificulta que vuelvan a su tamaño y fuerza originales. Este proceso aumenta tanto el tamaño como el peso de las partículas. La floculación puede mejorar al añadir un reactivo específico (p. 18)

La floculación es un proceso que facilita la unión de partículas en suspensión, reduciendo las fuerzas de repulsión entre ellas. Gracias a este proceso, el tamaño y peso de los flóculos aumentan, lo que permite que se eliminen a través de sedimentación por gravedad y/o filtración (Andía Cárdenas, 2000; Romero Rojas, 2005). Así se identifica la floculación pericinética, la aglomeración que ocurre de manera natural entre el coagulante y las partículas en el agua se debe al movimiento aleatorio de las partículas, conocido como movimiento

browniano. (Ojeda, 2013), y la floculación ortocinética en donde la aglomeración de las partículas en el agua es provocada por una energía externa, que puede ser de origen mecánico o hidráulico (Rony y Quintana, 2013).

2.2.3 Mecanismos de coagulación – floculación

El proceso de mecanismo de coagulación-floculación es el proceso en el que las partículas se agrupan formando pequeñas masas llamadas flóculos, que tienen un peso específico mayor al del agua, favoreciendo su sedimentación, autores como Arboleda Valencia (2000) afirma que:

El proceso ayuda a eliminar la turbidez orgánica e inorgánica que no puede sedimentar rápidamente, contribuyendo también a la remoción del color, tanto verdadero como aparente. Además, facilita la eliminación de bacterias, virus y otros organismos patógenos que pueden separarse mediante coagulación, así como la destrucción de algas y plancton en general.

También puede eliminar sustancias que causan malos olores y sabores, y en algunos casos, precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos. (p. 28)

Asimismo, Romero (2012) señala lo siguiente:

La adición de iones es crucial para determinar el potencial de coagulación, ya que facilita este proceso. De igual manera, añadir bases o ácidos fuertes que reduzcan los valores cercanos a cero, junto con la carga de los hidróxidos u óxidos metálicos, promueve la coagulación. También se pueden incorporar electrolitos para coagular suspensiones coloidales. (p. 41)

Por otro lado, referente al proceso de floculación autores como Aguilar (2010), mencionan que es un proceso que ocurre de manera simultánea tras la coagulación, favoreciendo la unión de los flóculos para aumentar su tamaño y peso, lo que facilita la sedimentación de las

partículas “Para lograr la agregación de partículas se debe reducir las cargas o superar el efecto de estas. Esto se realiza mediante diferentes tipos de mecanismos” (Romero, 2012, p. 48):

1. La incorporación de iones que determinan el potencial, los cuales se absorben o reaccionan con la superficie, o la adición de electrolitos.
2. La adición de moléculas orgánicas de cadena larga, cuyas subunidades son ionizables, conocidas como polielectrolitos, que eliminan partículas mediante absorción y la formación de puentes entre ellas.
3. La incorporación de productos químicos que generan iones metálicos hidrolizados.

Los polielectrolitos pueden ser de origen natural o sintético. Los naturales provienen de fuentes biológicas, como el almidón, mientras que los sintéticos están formados por monómeros simples que se polimerizan para crear sustancias de alto peso molecular. Hay tres tipos de polielectrolitos: aniónicos, catiónicos y no iónicos (Metcalf y Eddy, 1995).

Entre los principales mecanismos de coagulación - floculación para la desestabilización de partículas se encuentran:

a) Compresión de la doble capa

Arboleda Valencia (2000), define a la compresión de la doble capa como:

La introducción de un electrolito neutro en un sistema coloidal aumenta la densidad de cargas en la capa difusa, lo que reduce el área de influencia de las partículas. Esto provoca la coagulación debido a la compresión de dicha capa. Cuando hay altas concentraciones de iones positivos y negativos (gran fuerza iónica) en el agua, el número de iones en la capa difusa aumenta, lo que, para mantener el equilibrio eléctrico, reduce su volumen. Esto hace

que las fuerzas de Van der Waals dominen, eliminando la estabilización electrostática (p.35)

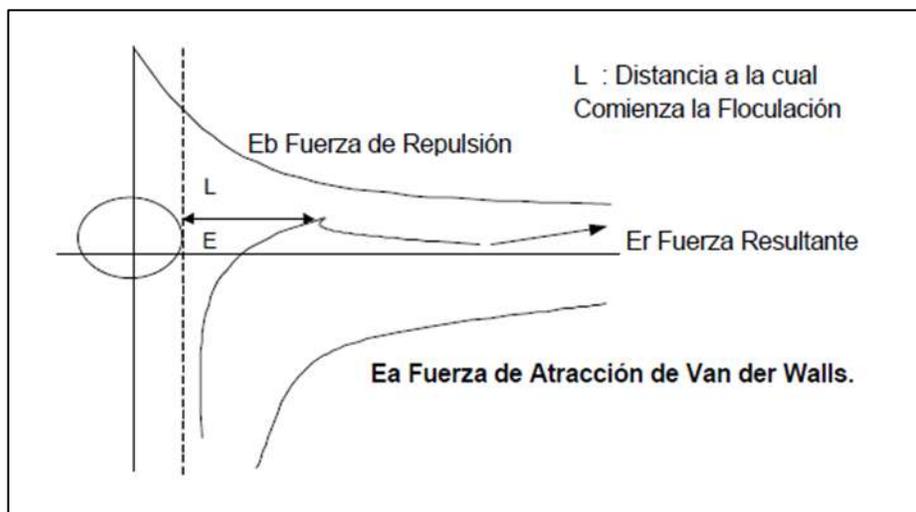
Molano (2011) p. 25, destaca dos aspectos interesantes sobre ese mecanismo de coagulación:

- 1) La concentración del electrolito que provoca la coagulación es casi independiente de la cantidad de coloides presentes en el agua.
- 2) No es posible reestablecer las partículas coloidales al añadir más electrolitos, ya que esto provoca una inversión en su carga, que pasa a ser positiva.

En el mismo contexto Andia Cárdenas (2000), “cuando dos partículas con cargas similares se acercan, se produce repulsión, que depende de la distancia entre ellas, mientras que las fuerzas de atracción atómica también influyen” (p.31).

Figura 2

Representación de fuerzas de atracción y repulsión.



Fuente: (FAO, 2015).

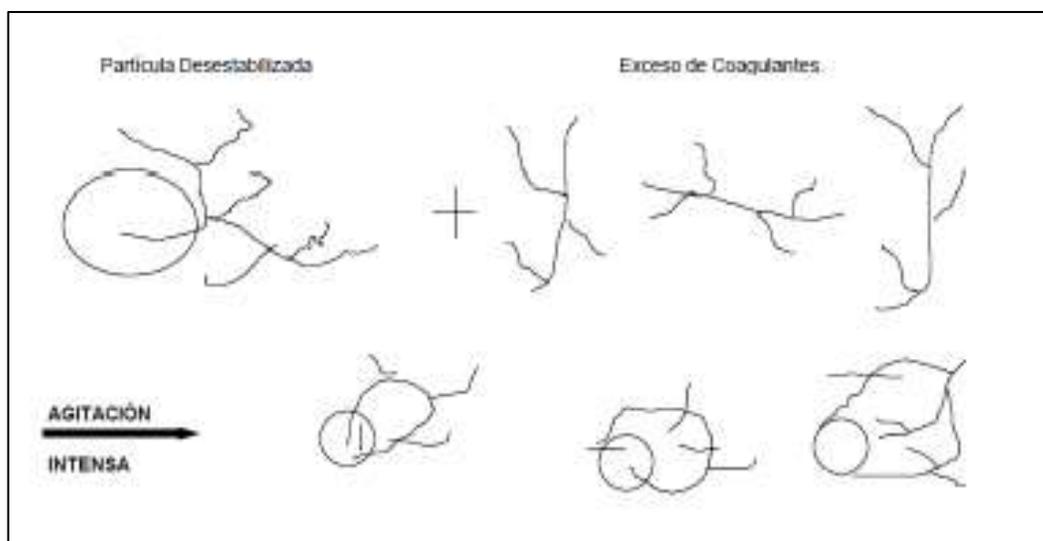
b) Adsorción y neutralización de la carga

El proceso de adsorción y neutralización de la carga está fuertemente relacionado con la compresión de la doble capa. Andía Cárdenas (2000), menciona que la adsorción y neutralización de la carga:

Este proceso está vinculado al mecanismo de la doble capa, donde la potencial zeta se anula al agregar coagulantes. Para esto, se necesita energía adicional a través de agitación mecánica o hidráulica. La mayoría de las partículas en el agua tienen cargas negativas y pueden desestabilizarse por adsorción de iones o polímeros cargados positivamente. Sin embargo, si se añade un exceso de coagulante, las partículas se estabilizan nuevamente. (p.33)

Figura 3

Formación de flóculos y consecuencia por exceso de coagulante.



Fuente: (FAO, 2015).

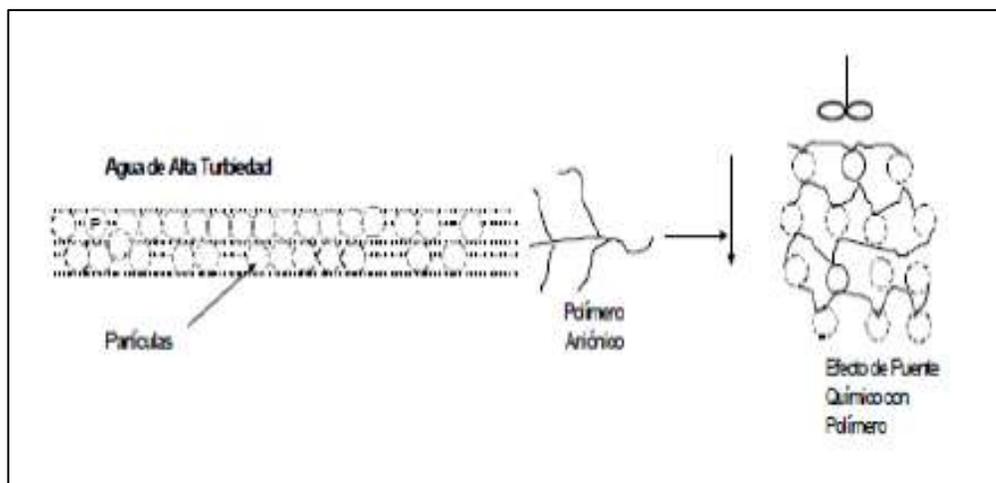
“La neutralización de un coagulante o floculante con una alta carga positiva es adsorbido en a las superficies de coloides con carga negativa” (Gregory, 2014, p. 22).

c) Adsorción e interconexión de puente

“Las moléculas de polímero largas tienen grupos químicos que pueden absorber partículas coloidales, uniéndolas en un extremo, mientras los otros sitios absorben más partículas” (Andía, 2000, p. 33).

Figura 4

Formación de puente entre partículas en suspensión por adición de polímero.



Fuente: Andía (2000)

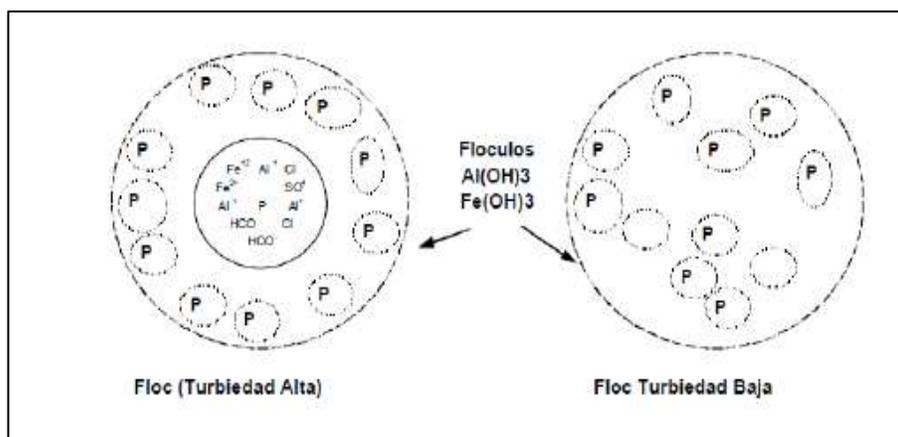
El puenteo, como se muestra en la **figura 4**, este proceso ocurre cuando un segmento de una cadena de polímeros se adhiere a múltiples partículas, enlazándolas entre sí. Para que esto suceda, es necesario que haya suficiente área libre en cada partícula para que los segmentos del polímero se fijen. (Gregory, 2014)

a) En mezclado y precipitado

Cuando se utilizan dosis altas de coagulantes, puede formarse un precipitado amorfo que atrapa partículas dentro de su estructura, dificultando su eliminación.

Figura 5

Atrapamiento de partículas en un floculo.



Fuente: Andía (2000)

Romero Rojas (2005), señala: En muchos casos el mecanismo de compresión de la doble capa no es ideal para el tratamiento de agua. Es más efectivo optar por la adsorción de iones o polímeros catiónicos, ya que la mayoría de las partículas tienen carga negativa. De esta forma, se pueden utilizar sales metálicas y polímeros orgánicos para desestabilizar las partículas, neutralizando su carga negativa. (p. 49)

2.2.4 Aguas residuales domésticas

Morales et al., (2009), define que el agua residual se transforma en aguas urbanas cuando circula a través del sistema de alcantarillado, llevando consigo sustancias que modifican su composición original, y se dirige hacia una planta de tratamiento o un cuerpo de agua

Corona menciona que las “Aguas negras (excrementos, orina, lodos fecales) y grises (cocina, lavado, limpieza, baño), provenientes de viviendas, comercios e instituciones; conocidas como aguas residuales sanitarias” (Corona, 201, p. 31). “Dicha mezcla y composición dependerán del suministro de agua y las instalaciones de saneamiento disponibles, las prácticas de uso del agua y las normas sociales” (Raffo y Ruiz, 2014, p. 33).

Existen diversas características particulares de las aguas residuales domésticas:

2.2.4.1 Turbiedad

“Las aguas residuales domésticas son turbias por partículas en suspensión, tanto orgánicas como inorgánicas, lo que hace esencial controlar este parámetro en aguas contaminadas” (Romero Rojas, 2000, p. 38).

Andía (2000), menciona que la turbiedad “la turbiedad mide indirectamente la concentración de partículas suspendidas, evaluando cómo dispersan la luz, y depende del número, tamaño y forma de las partículas presentes” (p. 19). Para eliminar la turbiedad, es necesario aplicar dosis crecientes de coagulante, ya que el agua tiene diferentes áreas que requieren distintos niveles de coagulación, según Andía (2000) son las siguientes:

- Zona 1: La dosis de coagulante es insuficiente para desestabilizar las partículas, por lo que no ocurre coagulación.
- Zona 2: Al aumentar la dosis de coagulante, los coloides se agrupan rápidamente.
- Zona 3: Con dosis adicionales, la coagulación se ve afectada ya que los coloides se reestablecen.
- Zona 4: Si la dosis sigue subiendo, alcanzando la sobresaturación, se produce una precipitación rápida de coagulantes que arrastra las partículas de turbiedad.

2.2.4.2 Color

El color del agua natural es causado por ácidos húmicos y fúlvicos, iones metálicos, materia suspendida, plancton, malezas y efluentes industriales. Se elimina para que el agua sea adecuada para uso general e industrial, y se evalúa comparando visualmente la muestra con agua destilada. (Goyenola, 2013).

2.2.4.3 Temperatura

Las aguas residuales urbanas y domésticas tienden a liberar energía porque el calor específico del agua es un poco más alto que el del aire. Como resultado, el agua contaminada suele tener una temperatura más elevada que el agua limpia, lo que se convierte en un factor importante, ya que puede influir en los cuerpos de agua, favoreciendo el crecimiento de bacterias, hongos o plantas acuáticas (Metcalf y Eddy, 1995)

2.2.4.4 Sólidos

“Los sólidos totales son partículas obtenidas por evaporación del agua, clasificados en disueltos (orgánicos e inorgánicos) y en suspensión (sedimentables y no sedimentables)” (Aguilar, 2014, p. 30).

2.2.4.5 Sólidos disueltos totales (TDS)

Los sólidos disueltos totales (TDS) son sólidos en el agua que pueden pasar a través de un filtro. TDS es una medida de material disuelto en agua incluye iones como carbonato, bicarbonato, cloruro, sulfato, fosfato, nitrato, calcio, magnesio, sodio y otros, esenciales para la vida acuática. Sin embargo, los cambios en la concentración de estos iones pueden afectar negativamente, ya que la densidad del agua influye en el flujo dentro y fuera de las células de los organismos. (Mitchell y Stapp, 1992).

2.2.4.6 Material Orgánico

Este material puede causar la muerte de organismos aeróbicos en cuerpos de agua al desoxigenarlos. La demanda biológica de oxígeno (DBO) mide la cantidad de oxígeno consumido por el agua residual durante cinco días a 20°C. Estos datos son esenciales para diseñar un tratamiento adecuado de las aguas residuales y para controlar su efectividad. (Metcalf y Eddy, 1995).

La demanda bioquímica de oxígeno (DQO) se refiere a la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación química del material orgánico en el agua. Generalmente, los valores de DQO son más altos que los de DBO, ya que la oxidación química ocurre más rápidamente que la biológica para descomponer los compuestos. (Espigares y Pérez, 1985).

2.2.4.7 Microorganismo

En las aguas residuales se encuentran diversos microorganismos, como eubacterias, eucariotas y arqueobacterias, siendo las eubacterias las más predominantes. Los desechos humanos, especialmente aquellos infectados con enfermedades como tifoidea, cólera y diarrea, pueden introducir organismos patógenos en las aguas residuales (Espigares y Pérez, 1985).

“Las bacterias en aguas residuales provienen de descomposición orgánica o material fecal. Pueden ser anaerobias, aerobias, coliformes o facultativas, adaptándose a diferentes ambientes” (Aguilar, 2014, p. 50).

Las bacterias coliformes en el agua son un indicativo de la presencia de patógenos. Se estima que el ser humano elimina entre 100,000 y 400,000 millones de organismos al día, cantidad suficiente para identificar patógenos en el agua (Rojas, 2000).

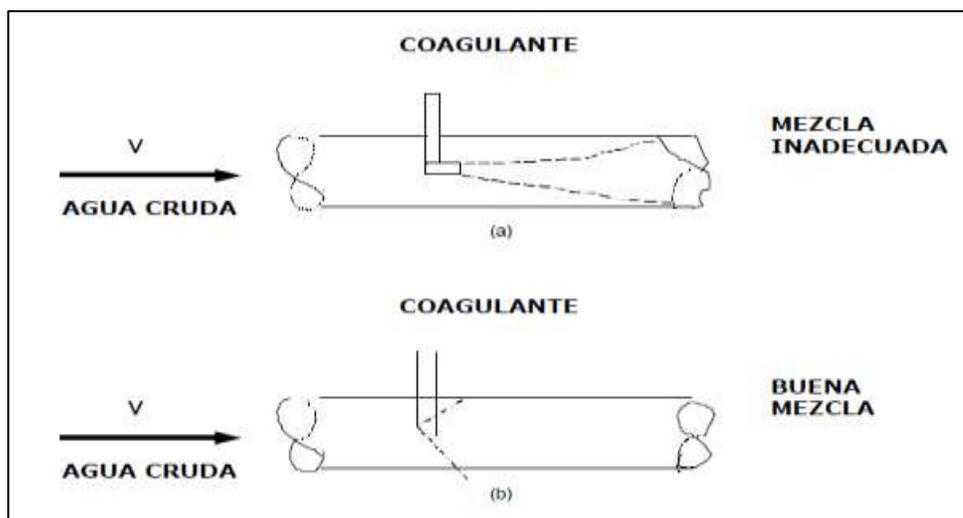
2.2.5 Coagulante natural

La coagulación y floculación dependen en gran medida de las propiedades fisicoquímicas del agua cruda, como su alcalinidad, pH y turbiedad. Algunos iones presentes pueden alterar el equilibrio fisicoquímico, influyendo en la formación de cadenas poliméricas de hidróxidos o en cómo interactúan estos con las partículas coloidales, lo que afectará el proceso de floculación. Se considera que la reacción del coagulante con el agua es óptima cuando: (Andía, 2000, p. 20)

- La cantidad de coagulante añadida al agua debe ser dosificada de manera constante y uniforme en la unidad de mezcla rápida, asegurando que el coagulante se disperse completamente y se mezcle bien con el agua.
- El sistema de dosificación debe asegurar un flujo constante y ajustable, lo cual se logra mediante equipos de dosificación para coagulantes tanto en estado sólido como líquido, los cuales deben estar calibrados y verificados mediante pruebas de aforamiento.

Figura 6

Representación de fuerzas de Atracción y Repulsión.



Fuente: Andía (2000, p. 23)

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo casi instantáneo, en el que se presenta las siguientes etapas (Duarte, 2019):

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- Formación de Compuestos químicos poliméricos.
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- Adsorción mutua de coloides.
- Acción de barrido.

2.2.6 Semillas de *M. oleifera*

“Es un árbol de la familia Moringaceae originario del norte de la India” (Folkard, 2012, p. 22), originaria del sur del Himalaya, específicamente de áreas como Bangladesh, Afganistán y Pakistán, fue introducida en América Central en 1920, inicialmente como planta ornamental (Foild et al., 1999), “hoy en día, la *M. oleifera* se cultiva en todo el mundo, especialmente en zonas áridas y semiáridas, destacándose por su rápido crecimiento, alcanzando hasta cuatro metros en un año.” (Pérez et al., 2010, p. 15). “El árbol en su totalidad posee diversas propiedades, de las cuáles resalta su uso para el tratamiento de aguas” (Molano, 2011, p. 25).

Las semillas provienen de una vaina alargada, que mide entre 20 y 45 cm de largo y madura en tres meses. Son carnosas, con una fina cáscara de color marrón, y tienen una forma con alas de 2.5 a 3 mm de largo. El interior de la semilla es blanquecino y tiene un alto contenido de aceite. (Liñan, 2010)

“La semilla de *M. oleifera* contiene un polielectrolito catiónico y 40% de aceite, cuyo perfil graso es 73% ácido oleico, comparable al aceite de oliva” (Folkard, 2012, p. 29).

Clasificación y origen

Tabla 1

Clasificación y origen de M. oleifera.

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Capparidales
Familia	Moringaceae
Género	<i>Moringácea</i>
Especie	<i>M. oleifera</i>
Nombre Científico	<i>M. oleifera</i> Lam.

Fuente: Folkard (2012)

“La familia Moringaceae comprende únicamente un género, *Moringácea*, siendo la especie más estudiada la *M.oleifera*” (Sánchez y Beltrán, 2010, p. 51). El comercio de estas semillas actualmente es de fácil acceso ya que las venden en cualquier mercado zonal en la provincia de Cajamarca.

***M.oleifera* en tratamiento de aguas residuales domésticas**

Según Guzmán y Nuñez (2013), la coagulación es un proceso clave en el tratamiento del agua, ya que elimina contaminantes en suspensión. En este contexto, el uso de coagulantes naturales como alternativa a los químicos. Estos coagulantes naturales demostraron ser eficaces para reducir la turbidez, actuando mediante la adsorción y neutralización de cargas. Entre ellos, la *M. oleifera* ha sido especialmente destacada y ampliamente investigada como un coagulante natural.

La *M. oleifera* contiene una gran cantidad de proteínas, de las cuales aproximadamente el 1% son polielectrolitos catiónicos activos. Estas proteínas son responsables de desestabilizar los coloides, ya que, al ser principalmente de carga negativa, tienen la capacidad de neutralizar

las partículas suspendidas, facilitando así su posterior sedimentación. (Sánchez y Beltrán, 2010, p. 55)

Asimismo, autores como Muyibi y Evison, mencionan que, La semilla de *M. oleifera* tiene la capacidad de eliminar iones de calcio, magnesio y otros cationes divalentes presentes en el agua con altas concentraciones de sales. Esto es relevante, ya que, al reducir la dureza del agua, mejora la eficacia de los jabones, detergentes y otros productos de limpieza. Por esta razón, también se utiliza como una alternativa para tratar la dureza del agua (Muyibi y Evison, 1995).

“El componente activo es el polielectrolito que ya fue identificado y aislado para utilizarlo como prueba de un coagulante natural” (Sáenz, 2015, p. 27). De lo mencionado por los diferentes autores se puede decir que la capacidad floculante de *M. oleifera* ha sido evaluada en el proceso de coagulación-floculación con el fin de mejorar la calidad del agua. Algunos estudios han demostrado que su uso incluso puede lograr la potabilización del agua., siendo un coagulante natural que neutraliza partículas en suspensión en el agua y provoca que se reúnan entre sí para que, por peso mayor a la inicial, comiencen a sedimentarse.

La semilla de *M. oleifera* contiene 17 aminoácidos, incluyendo glicina, prolina, alanina, ácido aspártico, serina, entre otros. En la fracción activa de *M. oleifera*, se han encontrado varios aminoácidos, con excepción de la lisina. Este último aminoácido puede jugar un papel importante en la desestabilización de las partículas coloidales, lo que contribuye a la coagulación y reducción de la turbidez del agua (Sáenz Damián, 2019, p. 32).

Los aminoácidos polares hidrofílicos presentes en las semillas de *M. oleifera*, como arginina, lisina, histidina, ácido glutámico y ácido aspártico, son los principales responsables de la actividad coagulante. Estos aminoácidos forman parte de las proteínas solubles en agua que,

al estar presentes en las semillas, facilitan el contacto con las partículas coloidales en aguas turbias, mejorando así la capacidad de coagulación de las semillas de Moringa. (Campos et al., 2003)

Definición de Términos Básicos

2.3.1. Coagulante natural

Son compuestos solubles en agua, originarios de fuentes vegetales o animales, que funcionan de manera similar a los coagulantes sintéticos, agrupando las partículas suspendidas en el agua cruda, lo que facilita su sedimentación y disminuye la turbidez inicial del agua (García, 2007).

2.3.2. Coagulación

Es un proceso químico que desestabiliza las partículas coloidales al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, mediante la adición de coagulantes y la aplicación de energía de mezcla (Carrera e Infante, 2015).

2.3.3. Turbiedad

La turbidez es la opacidad del agua debido a la presencia de partículas suspendidas, como arcillas y arenas, que se desplazan con las corrientes. Se mide con un turbidímetro y se reporta en Unidades Nefelométricas (UNT) (Cárdenas, 2000).

2.3.4. Microorganismo

Unos de los microorganismos presentes en las aguas residuales son las eubacterias, eucariotas, arqueobacterias, entre ellos las eubacterias son la especie de mayor presencia. Los desechos humanos infectados con enfermedades como la tifoidea, cólera y diarrea traen consigo la presencia en las aguas residuales de organismos patógenos (Espigares García y Pérez López 1985).

“Las bacterias en aguas residuales pueden ser de origen fecal o por descomposición orgánica, incluyendo anaerobias, aerobias, coliformes y facultativas, adaptándose a diversos ambientes.” (Aguilar 2014:50).

La presencia de bacterias coliformes son indicadores de la existencia de organismos patógenos en el agua residual doméstica. Está establecido que diario el ser humano elimina por medio de las heces alrededor de 100000 a 400000 millones de organismos, cantidad necesaria en el agua para poder identificar cualquier patógeno (Romero Rojas 2000).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización de la investigación

La investigación se llevó a cabo en el distrito de Celendín - Región Cajamarca, situado entre los 815453.56 m E y 9241984.35 m S a una altura de 2605 m s.n.m. (ver **Figura 7**)

3.2. Materiales

Materiales experimentales

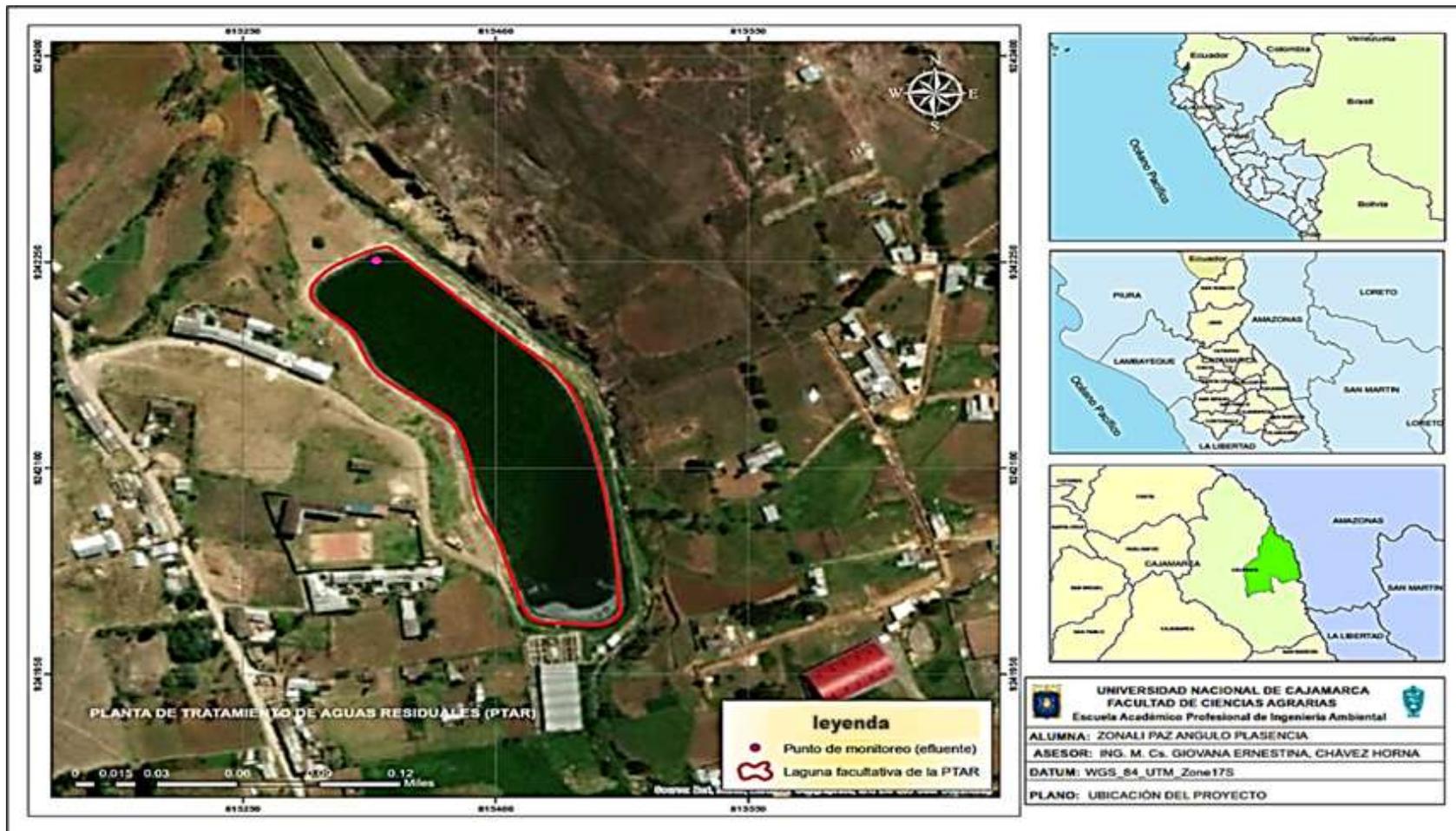
- Semillas de *M. oleífera*.
- Aguas residuales domésticas

Materiales de campo

- Guantes
- Mascarilla
- Vasos de precipitación de 2000 mL
- Etiquetas de identificación
- Libreta de campo

Figura 7

Ubicación del trabajo de investigación.



Equipos e instrumentos

- Tamiz
- Mortero
- Balanza analítica And GR 200
- Cronómetro Naxtech
- Turbidímetro Hach, 2100 Q
- Multiparámetro Hanna HI9829
- Cámara fotográfica Canon EOS Rebel T100 EF – S 18
- Estufa Memmert UF 110

3.3. Metodología

El tipo de investigación es experimental, ya que se manipularon las variables, asimismo, se desarrolló un nuevo proceso y se generó conocimientos prácticos resolviendo el problema de remoción de turbiedad, de acuerdo con Carrasco (2015), se denomina tipos de diseños experimentales de la investigación a las diferentes formas de resolver problemas de interés científico en el campo experimental. En este caso específico, se llevó a cabo un experimento con el objetivo de proponer posibles soluciones a un problema determinado.

El enfoque de investigación es cuantitativo porque los resultados se obtienen a través de mediciones que facilitan el proceso experimental, generará datos numéricos que serán plasmados en gráficas o tablas, permitiendo comprobar la hipótesis en cuestión. La dimensión temporal de la investigación será longitudinal prospectiva, ya que se llevarán a cabo diversas pruebas a lo largo de un periodo de tiempo.

3.3.1. Factor y variable independiente, niveles y tratamientos en estudio

Los factores y variables en estudios son:

VI: Dosis del coagulante (*M. oleifera*)

VD: Remoción de turbiedad y coliformes termotolerantes en agua residual doméstica

Para la determinación de las dosis del coagulante natural *M. oleifera*, se ha tenido en cuenta estudios anteriores, tomado las dosis más eficientes en dichos estudios.

Tabla 2

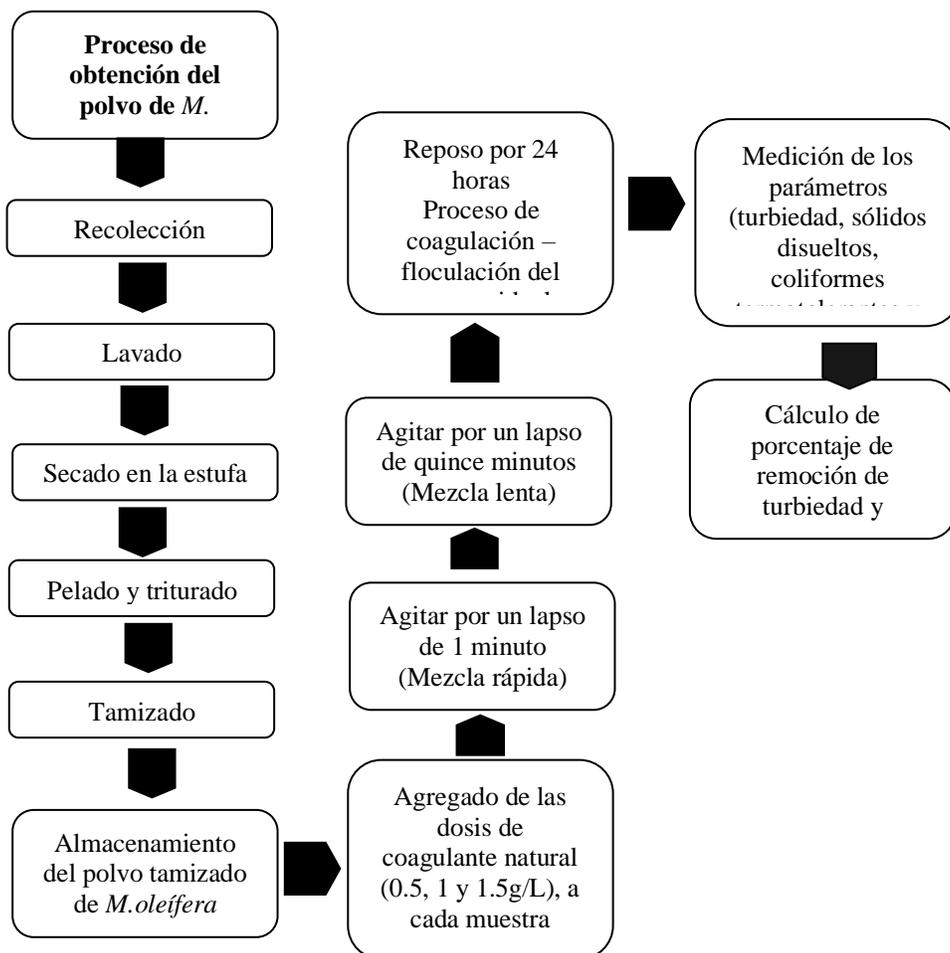
Niveles y tratamiento en estudio

Factor A: Coagulante natural	Factor B: Dosis de coagulante natural			
	B ₀ : 0 g/L	B ₁ : 0.5 g/L	B ₂ : 1 g/L	B ₃ : 1.5 g/L
a₁: <i>M. oleifera</i>	a₁b₀	a₁b₁	a₁b₂	a₁b₃

3.3.2. Procedimiento del experimento

Figura 8

Procedimiento del experimento



3.3.3. Evaluaciones realizadas (variables dependientes)

Tabla 3

Variables dependientes

VARIABLE	CONCEPTO	INDICADOR	UND DE MEDIDA
Variables dependientes			
Son los parámetros físico-químicos y microbiológicos de las aguas residuales municipales domésticas presentes en el tratamiento.	Porcentaje de remoción de parámetros físico-químicos y microbiológicos	Turbidez	NTU
		Coliformes fecales	NMP/100mL

3.3.4. Obtención del coagulante natural

La metodología que se ejecutó para la obtención del coagulante natural se detalla a continuación:

La obtención de las semillas del coagulante de *M. oleifera* fueron recolectadas del distrito de Magdalena provincia de Cajamarca, teniendo en cuenta que las vainas se encuentren secas, por recomendaciones de investigaciones anteriores no se usarán semillas verdes, pues no tienen propiedades coaguladoras.

Las vainas recolectadas fueron lavadas y secadas en estufa en un tiempo de 8 horas a una temperatura de 80 °C; una vez secas se procedió a retirar la cáscara, dejando al descubierto la pequeña semilla, que se asemeja a una almendra de color blanco. Del total obtenido (500g), de semillas en su estado seco, se trituró la mitad de esta (250g) con un mortero y pistilo.

Se tamizó para eliminar restos de cascara y obtener un polvo más fino (75µm), número de malla 200.

Después de triturar, se recogió el polvo resultante en un recipiente seco para poder medir las dosis necesarias del coagulante natural de *M. Oleifera*, propuestas para el tratamiento de las aguas residuales municipales domésticas (ver **ANEXO Foto 1**)

3.3.5. *Proceso de remoción de turbiedad*

Para cada tratamiento se utilizó 1 L. de agua residual municipal doméstica, el total utilizado fue 32 L. incluidos los blancos, en dos monitoreos, la aplicación del coagulante natural (0.5; 1;1.5 g del polvo de *M. oleifera* por cada litro de agua residual doméstica) luego se ejecutó mediante una agitación constante de mezcla, agitación manual rápida durante 1 minuto seguida de una agitación manual lenta por 15 minutos en cada tratamiento para activar el efecto coagulante de la *M. oleifera*. luego de ello se dejó en reposo durante 24 horas.

3.3.6. *Diseño Experimental*

La presente investigación se estructuró bajo un “Diseño Completamente al Azar” de un solo factor, correspondiente a las diferentes dosis del coagulante natural *M. oleifera*, evaluadas en cuatro niveles:

B0: 0 g/L (tratamiento blanco)

B1: 0.5 g/L

B2: 1.0 g/L

B3: 1.5 g/L

Cada nivel fue replicado cuatro veces en dos fases de monitoreo, lo que permitió obtener un total de 32 unidades experimentales. Las muestras de agua residual doméstica utilizadas

en el estudio fueron recolectadas a la salida de la laguna facultativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del distrito de Celendín.

Para evaluar el efecto de cada dosis en los parámetros de calidad del agua, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de un solo factor, considerando múltiples muestras y un nivel de significancia del 95 %. Este análisis estadístico permitió identificar las diferencias significativas entre tratamientos en relación con los indicadores evaluados: turbidez, coliformes fecales (termotolerantes), sólidos disueltos totales (TDS) y pH.

Tabla 4

Croquis del experimento.

Dosis (g/L)	Unidad Experimental (Monitoreo 1)	Unidad Experimental (Monitoreo 2)
0.0 (B0)	T1, T5, T9, T13	T17, T21, T25, T29
0.5 (B1)	T2, T6, T10, T14	T18, T22, T26, T30
1.0 (B2)	T3, T7, T11, T15	T19, T23, T27, T31
1.5 (B3)	T4, T8, T12, T16	T20, T24, T28, T32

3.3.7. Análisis de los indicadores de calidad

Pasado el tiempo de sedimentación, se ingresó las muestras de cada litro sobrenadante al Laboratorio Regional del Agua de Cajamarca, acreditado por el Instituto Nacional de la Calidad - INACAL - con registro N° LE-084. para medir los parámetros de turbidez, pH, sólidos disueltos y coliformes termotolerantes.

En la **Tabla 5** se describe los parámetros y métodos de ensayo, según la norma ISO/IEC 17025 es el estándar internacional que establece los requisitos para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, garantizando la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos.

Tabla 5*Método del ensayo*

Parámetros	Nº Reactores	Cantidad (L)	Método de Ensayo
Turbidez	32	1 L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 23 rd Ed. 2017: Turbidity. Nephelometric Method
pH	32	1L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 23 rd Ed. 2017: pH Value. Electrometric Method
Sólidos disueltos	32	1L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23 rd Ed. 2017: Sólids. Total Dissolved Sólids Dried at 180 oC
Coliformes fecales	32	0.250 L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9222 D, 23 rd Ed. 2017: Membrane Filter Technique fro Members of the Coliform Group. Thermotolerant (Fecal) Coliform Membrane Filter Pcedure

3.3.8. *Tratamiento y análisis de datos*

El tratamiento y análisis de datos se realizó mediante dos fases:

1. Se registraron los resultados emitidos por el laboratorio los cuales fueron procesados para obtener el porcentaje de remoción.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

Donde:

\bar{x} = promedio aritmético

x = valor de cada parámetro

n = número de datos

Haciendo uso del promedio aritmético de los parámetros se procedió a calcular los indicadores de eficiencia.

Indicadores de eficiencia. La eficiencia del coagulante se calculó mediante la siguiente fórmula

$$\% \text{ remoción} = \frac{(\text{afluente} - \text{efluente})}{\text{afluente}} * 100$$

2. Análisis estadístico de datos

Los resultados fueron evaluados a través de un análisis de varianza de un solo factor, utilizando varias muestras y un nivel de confianza del 95%. Este análisis estadístico se realizó para los indicadores de turbiedad y coliformes termotolerantes, con el objetivo de determinar el impacto de cada dosis de *M. oleifera* como coagulante.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Porcentaje y concentraciones de Turbidez y coliformes termotolerantes.

Tabla 6

Porcentaje y concentraciones de Turbidez y Coliformes Termotolerantes.

<i>Unidades Experimentales</i>								
<i>N°</i>	<i>Turbidez (NTU)</i>				<i>Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)</i>			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
	B0: 0 g/L	B1: 0.5 g/L	B2: 1 g/L	B3: 1.5 g/L	B0: 0 g/L	B1: 0.5 g/L	B2: 1 g/L	B3: 1.5 g/L
1	72.40	56.20	40.70	19.50	820100	653100	439800	164200
2	72.15	54.90	38.80	11.70	819900	649800	420200	143900
3	73.20	56.85	40.28	11.50	833000	660100	453100	159900
4	72.38	55.98	41.25	19.40	824100	659600	439900	160100
5	72.40	54.20	40.70	19.50	819800	643100	422400	145100
6	72.12	54.90	40.80	20.60	830500	653500	440000	179700
7	72.20	54.28	41.12	19.60	820200	649000	432400	163500
8	72.38	54.68	40.24	19.80	819700	645100	420000	141000
X̄	72.40	55.25	40.49	17.70	823412.5	651662.5	433475	157175

La **Tabla 6** presenta los resultados experimentales obtenidos para el porcentaje de remoción de turbidez y la cantidad de coliformes termotolerantes, luego de aplicar diferentes concentraciones de semillas de *M. oleifera* (0; 0.5; 1.0; y 1.5 g/L) a las muestras de agua residual.

4.2. Porcentaje de remoción de la turbidez

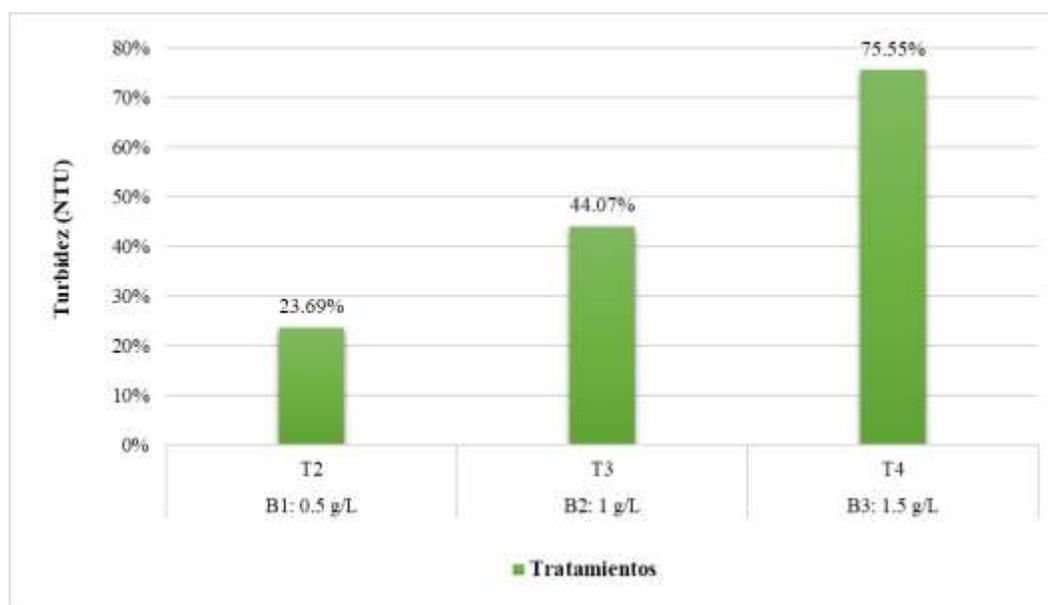
Tabla 07

Porcentaje de remoción de la turbidez

Puntos de muestreo	Concentración promedio NTU		Porcentaje remoción %
	Blanco	Tratamientos	
T2	72.4	55.25	23.69
T3		40.49	44.07
T4		17.70	75.55

Figura 9

Porcentaje de remoción de la turbidez



El porcentaje de remoción como se muestra en la **Tabla 07**, en los tratamiento T2, T3 y T4 alcanzaron una remoción del 23.69, 44.07 y 75.55 % de tal manera que la mayor eficiencia en remoción de la turbidez se obtuvo en el tratamiento T4 con una dosis de semilla de *M. oleífera* de 1.5 g/L con un valor de 75.55 %, esta remoción es porque la semilla de *M.oleífera* contienen un polielectrolito catiónicos diméricas que adsorben y neutralizan las cargas coloidales, causando un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la esfera de influencia de

las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa difusa, concentraciones elevadas de iones positivos y negativos (fuerza iónica grande) por el cual las partículas se agrupan en pequeñas masas, con peso específico superior al del agua, llamadas flóculos, favoreciendo su sedimentación (Arboleda, 2000)

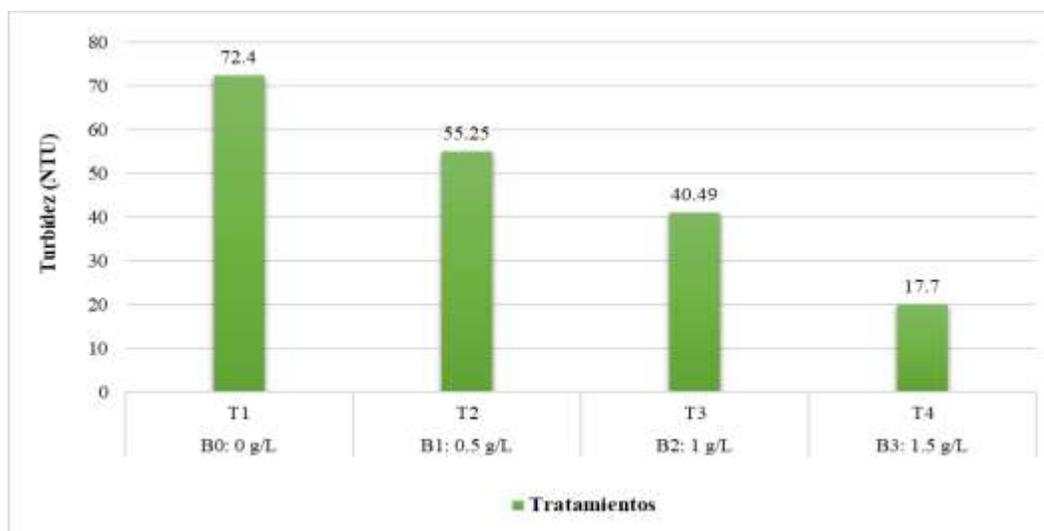
Dichos resultados de remoción coinciden con los obtenidos por Mejía et al., (2020), quien obtuvo un valor de 74.1 % con una dosis de 1.5 g/L; mientras que Mera et al., (2016) obtuvo porcentaje de remoción de la turbidez de 80 a 92% respectivamente con dosis de 0.15 a 4 g de polvo de *M. oleifera*.

4.3. Turbidez (NTU)

Se registraron concentraciones de turbidez, desde un valor mínimo de 11.50 NTU en T4, hasta un valor máximo de 73.2 NTU en el T1. Asimismo, los promedios variaron entre un mínimo de 17.70 NTU en el T4 hasta un valor máximo de 72.40 en el T1, ver en la **Figura 10**.

Figura 10

Turbidez NTU en promedio



En la **Figura 10** se detalla la remoción de turbidez en promedio de los tres tratamientos más el blanco T1, la mayor remoción en el T4 (B3:1.5 g/L) redujo la concentración inicial de 72.4 a 17.7 NTU. En el estudio de MohseniBandpei et al. (2018), evidencia que el polvo de *M. oleifera*, un coagulante de semilla sólido, posee propiedades físicas y químicas que son fundamentales para su desempeño en el tratamiento de líquidos con alta carga coloidal. En primer lugar, las propiedades físicas de la semilla de *M. oleifera* fueron evaluadas en laboratorio, lo que permitió establecer una base comparativa para su desempeño como coagulante. Dicho análisis físico es crucial, ya que determina la estabilidad y la capacidad de dispersión del coagulante en el medio de tratamientos.

Además, para identificar la composición química que confiere estructura y funcionalidad, emplearon la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF) utilizando el equipo Spectro IQ11/Ametek. Los resultados obtenidos revelaron que los óxidos de SO_3 , P_2O_5 , K_2O , MgO , CaO , Na_2O y Al_2O_3 se presentan en porcentajes significativos (6,214 %, 1,643 %, 0,9871 %, 0,5613 %, 0,2542 %, 0,157 % y 0,1076 %, respectivamente, por cada 5 g del polvo de semilla). Estos componentes son responsables de dotar al coagulante de importantes propiedades de atracción electrostática, esenciales para la desestabilización y agregación de partículas coloidales. Las semillas fueron secadas al aire y separadas en capa externa “outer layer” e interna “inner seed”, cada parte se secó a 40 °C y se transformó en polvo fino, luego prensado en pastillas para el análisis, se empleó un analizador de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (EDXRF), marca Rigaku con ánodo de Pd y detector SDD, también se utilizó el contenido de elementos como Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca.

La presencia de estos óxidos confiere al polvo de la semilla de *M. oleifera* una capacidad de interacción con las partículas en suspensión, facilitando su neutralización y posterior

sedimentación. En efecto, al actuar sobre las cargas coloidales del líquido, se favorece la formación de flóculos, lo que resulta en una mejora significativa de la clarificación del agua. Este mecanismo es comparable a la acción de otros coagulantes naturales, en los cuales la composición química y la presencia de grupos funcionales catiónicos desempeñan un papel determinante en la agregación de partículas.

Los resultados presentados por MohseniBandpei et al. (2018) aportan evidencia de que la eficacia como coagulante está íntimamente relacionada con su composición química. Esto respalda la hipótesis de que, al optimizar las propiedades físicas y químicas del coagulante, se puede potenciar su rendimiento en la remoción de partículas coloidales.

Tabla 08

Análisis de varianza (ANOVA) para la turbidez

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamiento	5725.47526	2	2862.73763	541.745062	8.5134E-19	3.46680011
Error	110.970075	21	5.28428929			
Total	5836.44533	23				

CV = 6 %

En la **Tabla 08** se observa los resultados del análisis de varianza para la turbidez, en los cuales se observa que existe significación estadística en las dosis del coagulante (*M. oleifera*). Dado que el valor de significación (8.5134E-19) para esta fuente de variación es menor al 0.05 (5 %). Esto indica que las diferencias de turbidez en los diferentes tratamientos se deben a la influencia de las dosis del coagulante (*M. oleifera*). Es decir, que ejerce efecto significativo en la turbidez.

El coeficiente de variación es 6 %, este valor indicó que los datos son consistentes y la variabilidad de la turbidez dentro de los tratamientos es baja.

Tabla 09

Prueba de significación de Tukey al 5 % entre los grupos para la Turbidez

<i>group</i>	<i>mean</i>	<i>n</i>	<i>ss</i>	<i>Df</i>	<i>q-crit</i>
T1	72.40	8	0.8215875		
T2	55.25	8	6.6086875		
T3	40.49	8	4.1213875		
T4	17.70	8	100.24		
		32	111.791663	28	3.861

Tabla 10

Prueba de Q Test entre los grupos para la concentración de Turbidez

<i>group 1</i>	<i>group 2</i>	<i>mean</i>	<i>std err</i>	<i>q-stat</i>	<i>Lower</i>	<i>upper</i>	<i>Cohen d</i>
T1	T2	17.155	0.70644881	24.2834297	14.4274011	19.8825989	8.58548889
T1	T3	31.9175	0.70644881	45.1802021	29.1899011	34.6450989	15.9736136
T1	T4	54.70375	0.70644881	77.4348391	51.9761511	57.4313489	27.3773499
T2	T3	14.7625	0.70644881	20.8967724	12.0349011	17.4900989	7.38812473
T2	T4	37.54875	0.70644881	53.1514095	34.8211511	40.2763489	18.791861
T3	T4	22.78625	0.70644881	32.2546371	20.0586511	25.5138489	11.4037363

En la **Tabla 10**, la prueba de Tukey revela diferencias significativas en la reducción de turbidez en comparación T1 con T4 mostrando el mayor impacto ($q = 77.43$, $d = 27.38$), seguido de T3 ($q = 45.18$, $d = 15.97$) y T2 ($q = 24.28$, $d = 8.59$). Estos resultados indican que el aumento en la dosis del coagulante mejora significativamente la eficiencia en la reducción de turbidez, siendo T4 la dosis más efectiva, *M. oleifera* de 1.5 g/L., con la mayor clarificación del agua en relación con el control T1.

4.4. Porcentaje de remoción de la concentración de coliformes termotolerantes (CCT)

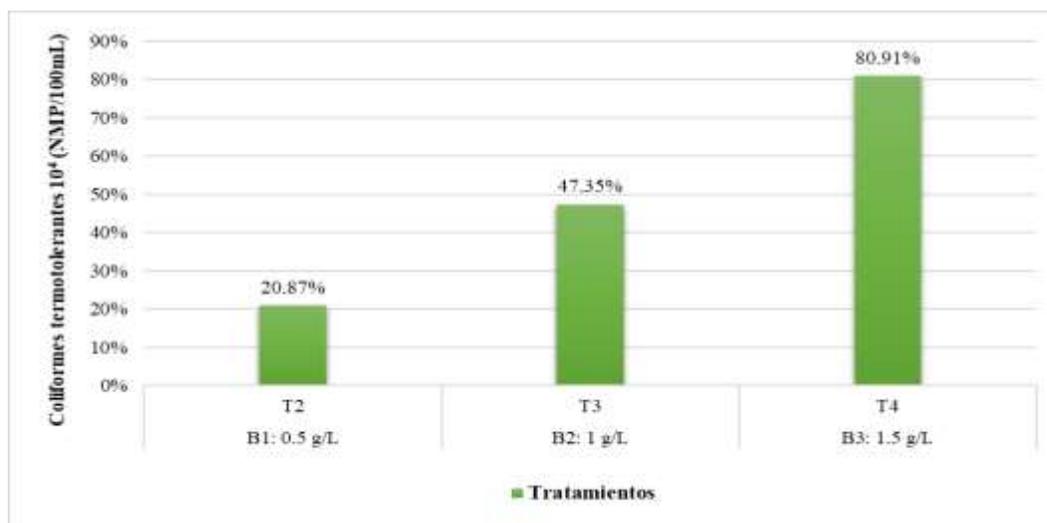
Tabla 11

Porcentaje de remoción de la concentración de coliformes termotolerantes (CCT)

Puntos de muestreo	Concentración promedio (mg/L)		Porcentaje remoción %
	Blanco	Tratamientos	
T2		651662.5	20.87
T3	823412.5	433475	47.35
T4		157175	80.91

Figura 9

Porcentaje de remoción de coliformes termotolerantes CCT



El porcentaje de remoción como se muestra en la **Tabla 11** y la **Figura 9** se aprecia en el tratamiento T2, T3 y T4 alcanzaron una remoción del 20.87, 47.35 y 80.91 % de tal manera que la mayor eficiencia en remoción de la CCT se obtuvo en el tratamiento T4 con una dosis de semilla de *M. oleifera* de 1.5 g/L con un valor de 80.91 %, lo que coincide en gran medida con los valores de eficiencia reportados por Mera et al. (2016). debido a que, la semilla de *M. oleifera* contiene un polielectrolito catiónico diméricas que absorben y neutralizan las cargas coloidales, estas son cargas eléctricas que se generan en la superficie de las partículas presentes en una suspensión coloidal, estas cargas pueden originarse, por ejemplo, por la ionización de grupos funcionales de

la superficie de la partícula o por la adsorción de iones presentes en el medio. La presencia de estas cargas confiere estabilidad a la suspensión, ya que provoca repulsiones electrostáticas entre las partículas, evitando que se agrupen y sedimenten.

Cuando se desea eliminar o clarificar una suspensión coloidal, se utilizan agentes coagulantes o floculantes que neutralizan o disminuyen las cargas superficiales de las partículas en suspensión. Al hacerlo, se reduce la repulsión electrostática entre ellas, lo que permite que se unan y formen flóculos de mayor tamaño. Estos flóculos son más fácilmente separados del medio líquido, ya sea por sedimentación o filtración.

Las partículas coloidales poseen cargas en su superficie, lo que mantiene la suspensión estable debido a la repulsión electrostática entre ellas.

La adición de un coagulante químico o natural provoca la adsorción de iones (generalmente positivos) sobre estas partículas, neutralizando su carga y disminuyendo su estabilidad, lo que permite que se agreguen.

Tras la desestabilización inicial (fase de coagulación), se promueve la floculación mediante agitación suave, que favorece las colisiones entre partículas y la formación de flóculos grandes capaces de sedimentar.

Aunque Bakhshandeh et al. (2022) se enfocan en la regulación de carga de partículas coloidales en soluciones electrolíticas, su trabajo aporta un fundamento teórico a este proceso. El estudio explica cómo los grupos superficiales (ácidos o básicos) pueden ionizarse en función del pH y la concentración de electrolitos, lo que genera una carga efectiva en las partículas. Esa carga, a su vez, se regula en el entorno acuoso, afectando directamente la estabilidad coloidal

En otras palabras, la neutralización de cargas por adición controlada de coagulante se basa en principios similares a los que explican la regulación de carga, ya que ambos procesos modifican el equilibrio de protonación y la distribución electrostática en la superficie de las partículas.

También presenta capacidad antimicrobiana activa y de clarificación, como hemaglutininas, bactericida, lectinas o proteínas de unión a carbohidratos, inhibe los microorganismos con las cadenas de proteínas cargadas positivamente, hidrofobicidad y compuestos fitoquímicos que penetran y perturban la pared celular bacteriana induciendo a la muerte celular (Gregory, 2014).

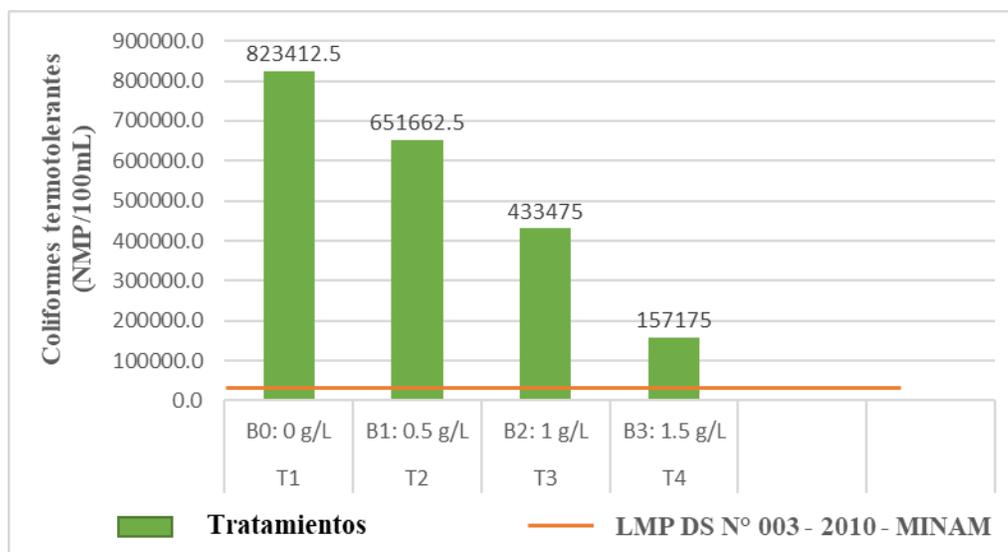
En la **Figura 9** se muestra el porcentaje de remoción de la CCT que varió entre un mínimo de 20.87 % en el T2, hasta un valor máximo de 80.91 % en el T4, dichos resultados coinciden con los obtenidos por Mera et al., (2016) quien obtuvo un valor de 80 % con dosis de 0.15 a 4 g/L de polvo de *M.oleifera*. Mientras que Arias et al., (2017) obtuvo porcentaje de remoción de la CCT de 96,3 y 98,5 % respectivamente, utilizando dosis de 0.5 a 1.5 g/L.

4.5. Concentración de coliformes termotolerantes (CCT)

Se registraron concentraciones de coliformes termotolerantes que variaron desde un valor mínimo de 1.41000×10^5 NMP/100 mL en el T4, hasta un valor máximo de 8.33000×10^5 NMP/100 mL en el T1. Asimismo, los promedios variaron entre un mínimo de 1.57175×10^5 NMP/100 mL en el T4 hasta un valor máximo de 8.23412×10^5 NMP/100 mL en el T1, ver en la **Figura 12**.

Figura 12

Coliformes termotolerantes en promedio



En la **Figura 12**, se muestra que el tratamiento T4 (B3: 1.5 g/L) logró la mayor remoción, reduciendo la concentración inicial de 823412.5 a 157175 NMP/100 mL. No obstante, estos valores exceden ampliamente según la normativa nacional N° 003-2010-MINAM, los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales deben cumplir con un límite máximo de 10,000 NMP/100 mL para coliformes termotolerantes.

Tabla 12

Análisis de varianza (ANOVA) para la concentración de coliformes termotolerantes (CCT)

<i>Fuente de variación</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamiento	9.8257E+11	2	4.9129E+11	4204.90771	4.5885E-28	3.46680011
Error	2453568750	21	116836607			
Total	9.8503E+11	23				

CV = 3%

En la **Tabla 12** se observa los resultados del análisis de varianza para la CCT, existe significación estadística en las dosis del coagulante (*M. oleifera*). Dado que el valor de significancia (p-valor: 4.5885 E-28), es inferior a 0.05 (5%), lo que significa que las variaciones en la CCT entre los diferentes tratamientos se deben a la influencia de las dosis de *M. oleifera* como coagulante, demostrando un efecto significativo en la CCT

El coeficiente de variación es 3%, este valor indicó la baja variabilidad del CCT dentro de los tratamientos.

Tabla 13

Prueba de significación de Tukey al 5 % entre los grupos para la concentración de coliformes termotolerantes (CCT)

<i>group</i>	<i>Mean</i>	<i>n</i>	<i>ss</i>	<i>df</i>	<i>q-crit</i>
T1	823413	8	203088750		
T2	651663	8	266578750		
T3	433475	8	990615000		
T4	157175	8	1196375000		
		32	2656657500	28	3.861

Tabla 14

Prueba de Q Test entre los grupos para la concentración de coliformes termotolerantes (CCT)

<i>group 1</i>	<i>group 2</i>	<i>mean</i>	<i>std err</i>	<i>q-stat</i>	<i>lower</i>	<i>upper</i>	<i>Cohen d</i>
T1	T2	171750	3443.84641	49.871562	158453.309	185046.691	17.6322598
T1	T3	389937.5	3443.84641	113.22732	376640.809	403234.191	40.0319029
T1	T4	666237.5	3443.84641	193.457379	652940.809	679534.191	68.3975122
T2	T3	218187.5	3443.84641	63.355758	204890.809	231484.191	22.3996431
T2	T4	494487.5	3443.84641	143.585817	481190.809	507784.191	50.7652523
T3	T4	276300	3443.84641	80.2300587	263003.309	289596.691	28.3656093

En la **Tabla 13** se presentan los resultados del análisis Post Hoc mediante la prueba de Tukey al 5 % para los diferentes tratamientos aplicados en la remoción de coliformes termotolerantes (CCT), según las dosis del coagulante natural *M. oleifera*. Los resultados indican

diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados, siendo más notorias al comparar el tratamiento control (T1: 0 g/L) con el tratamiento de mayor dosis (T4: 1.5 g/L), que alcanzó el mayor efecto ($q = 193.46$; $d = 68.40$). Esta diferencia sugiere un impacto contundente del coagulante en la reducción de la carga microbiológica.

Asimismo, T3 (1.0 g/L) mostró un efecto considerable con valores de $q = 113.23$ y $d = 40.03$, seguido por T2 (0.5 g/L) con $q = 49.87$ y $d = 17.63$, lo que confirma una tendencia positiva entre el aumento de la dosis y la eficiencia del tratamiento. Estos resultados permiten afirmar que existe una relación dosis-dependiente entre la concentración de *M. oleífera* y la remoción de coliformes, siendo el tratamiento T4 el más efectivo en lograr una reducción significativa.

La alta magnitud del tamaño del efecto (Cohen's $d > 0.8$ en todos los casos) respalda la robustez de estas diferencias, siendo especialmente relevante en T4, donde se evidencia un efecto muy grande. Esto refuerza el potencial del coagulante natural como alternativa eficaz para el tratamiento microbiológico de aguas residuales.

4.6. Sólidos disueltos totales (TDS)

Se registraron concentraciones de sólidos disueltos totales desde un valor mínimo de 500 mg/L en el T4, hasta un valor máximo de 708 mg/L en el T1. Asimismo, los promedios variaron entre un mínimo de 562 mg/L en el T4, hasta un valor máximo de 650 mg/L en el T1, se aprecian en la **Figura 13**.

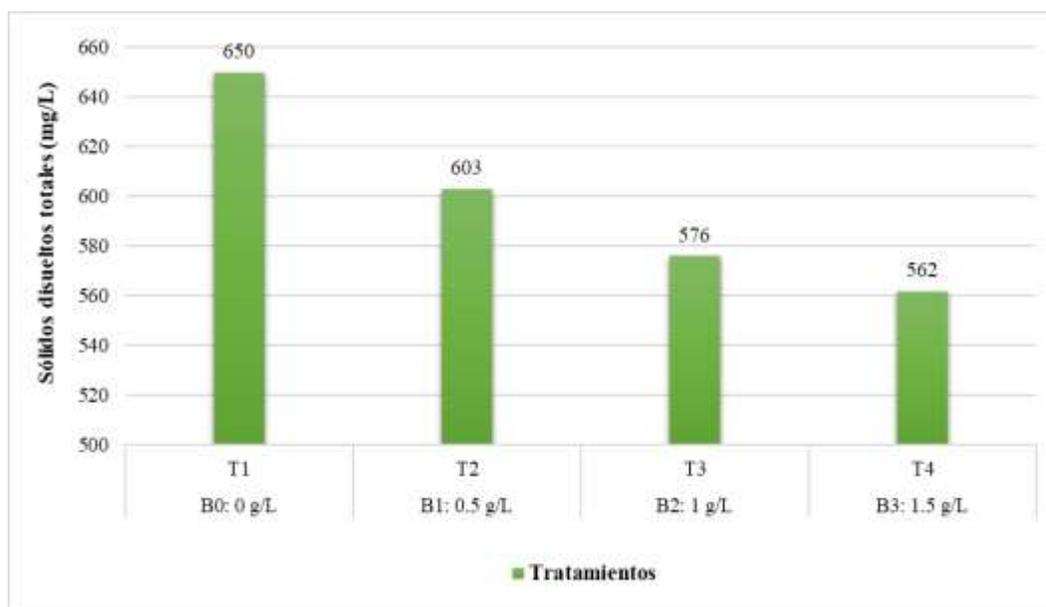
Las proteínas presentes en las semillas de *Moringa* tienen cargas positivas que neutralizan las cargas negativas de las partículas disueltas. Este proceso facilita la **adsorción** y aglomeración de sólidos, favoreciendo su remoción en la etapa de decantación, Algunos de los sólidos disueltos,

aunque sean de baja masa, pueden ser atrapados o arrastrados durante la formación de flóculos más grandes. A mayor dosis del coagulante, mayor es la probabilidad de atrapar partículas más finas y solubles. (Ndabigengesere et al. 1995).

La moringa también puede interactuar con compuestos orgánicos e inorgánicos solubles (como sales), reduciendo su presencia en el agua tratada. Por eso se observa una reducción del TDS desde 650 mg/L en T1 (sin coagulante) hasta 562 mg/L en T4 (con mayor dosis).

Figura 13

Sólidos disueltos totales (TDS) en promedio.



En la **Figura 13** se muestran los valores promedios obtenidos para este parámetro, donde la mayor remoción es en el T4 (B3:1.5 g/L) con respecto al T1 (B0:0 g/L). Arias et al., (2017) reporto un inicial 560 y un decantado de 360 mg/L utilizando dosis de 0.5 g/L hasta 1.5 g/L, este valor se asemeja al obtenido en el T4 en un inicial 650 y un decantado de 562 mg/L.

Tabla 15

Análisis de varianza (ANOVA) para sólidos disueltos totales (TDS)

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tratamiento	7032.40836	2	3516.20418	3.53556934	0.04748673	3.46680011
Error	20884.9779	21	994.522759			
Total	27917.3863	23				

CV = 5%

En la **Tabla 15** se observa los resultados del análisis de varianza para los TDS, en los cuales se observa que existe significación estadística en las dosis del coagulante (*M. oleifera*). Dado que el valor de significación (p-valor: 0.04748673) para esta fuente de variación es menor al 0.05 (5 %). Esto indica que las diferencias de los TDS en los diferentes tratamientos se deben a la influencia de las dosis del coagulante (*M. oleifera*). Es decir, que ejerce efecto significativo en los TDS.

El coeficiente de variación es 5 %, este valor indicó baja variabilidad de los TDS dentro de los tratamientos.

Tabla 16

Prueba de significación de Tukey al 5 % entre los grupos para los sólidos disueltos totales

<i>group</i>	<i>mean</i>	<i>n</i>	<i>ss</i>	<i>df</i>	<i>q-crit</i>
T1	649.80	8	8683.86435		
T2	603.00	8	7033.88035		
T3	575.88	8	5601.59759		
T4	561.75	8	8249.5		
		32	29568.8423	28	3.861

Tabla 17

Prueba de Q Test entre los grupos para la concentración de sólidos disueltos totales

<i>group 1</i>	<i>group 2</i>	<i>mean</i>	<i>std err</i>	<i>q-stat</i>	<i>lower</i>	<i>upper</i>	<i>Cohen d</i>
T1	T2	46.8	11.4892889	4.07335913	2.43985543	91.1601446	1.44014993
T1	T3	73.92625	11.4892889	6.43436251	29.5661054	118.286395	2.27489068
T1	T4	88.0525	11.4892889	7.66387724	43.6923554	132.412645	2.70958978
T2	T3	27.12625	11.4892889	2.36100338	-17.2338946	71.4863946	0.83474075
T2	T4	41.2525	11.4892889	3.59051811	-3.10764457	85.6126446	1.26943985
T3	T4	14.12625	11.4892889	1.22951473	-30.2338946	58.4863946	0.4346991

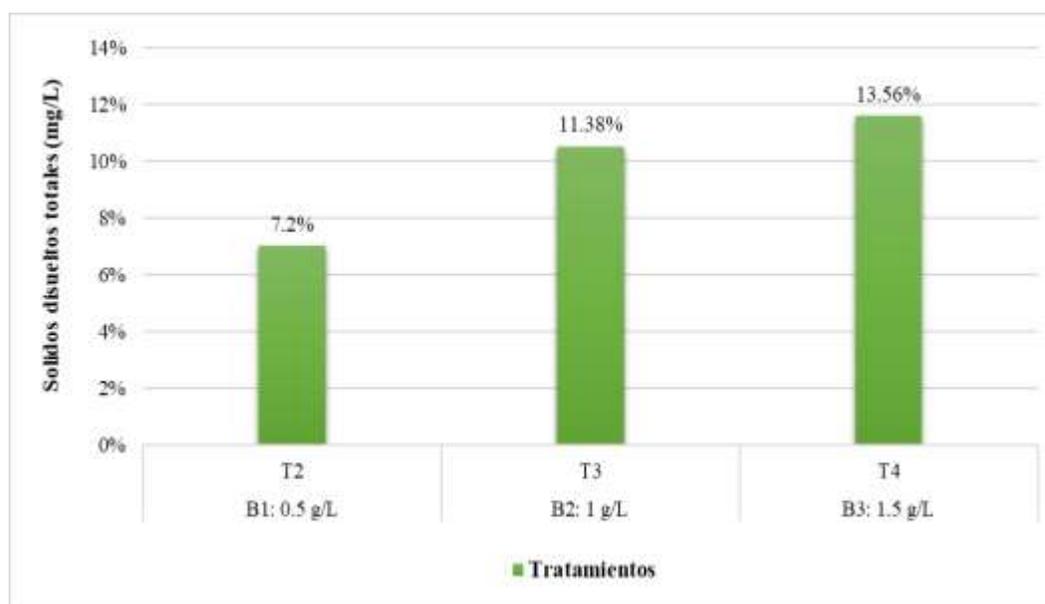
En la **Tabla 16** se muestra los resultados de los arreglos entre los grupos de la prueba de Tukey al 0.05 (5 %) para los TDS, muestra diferencias significativas en la reducción de TDS en comparación T1 con T4 presentando el mayor efecto ($q = 7.66$, $d = 2.71$), seguido de T3 ($q = 6.43$, $d = 2.27$) y T2 ($q = 4.07$, $d = 1.44$). Aunque T4 logra la mayor disminución, la diferencia entre T3 y T4 no es significativa ($q = 1.23$, $d = 0.43$), lo que sugiere que incrementar la dosis más allá de T3 tiene un impacto reducido en la remoción de sólidos disueltos.

4.7. Porcentaje de remoción de sólidos disueltos totales (TDS)

El porcentaje de remoción como se muestra en la **Tabla 18** y la **Figura 14** se aprecia en el tratamiento T2, T3 y T4 alcanzaron una remoción del 7.2, 11.38 y 13.56 %, estos bajos porcentajes de remoción se deben a que los sólidos totales disueltos comprenden carbonato, cloruro, sulfato, fosfato, nitrato, calcio, magnesio, sodio, iones orgánicos y otros iones, que en la mayoría contienen cargas positivas al igual que la semilla *M. oleifera* haciendo que estas se repelen entre si dificultando la formación de los flóculos (Mitchell y Stapp, 1992).

Tabla 18*Porcentaje de remoción de sólidos disueltos totales*

Puntos de muestreo	Concentración promedio (mg/L)		Porcentaje remoción %
	Blanco	Tratamientos	
T2	649.80	603	7.2
T3		575.88	11.38
T4		561.75	13.56

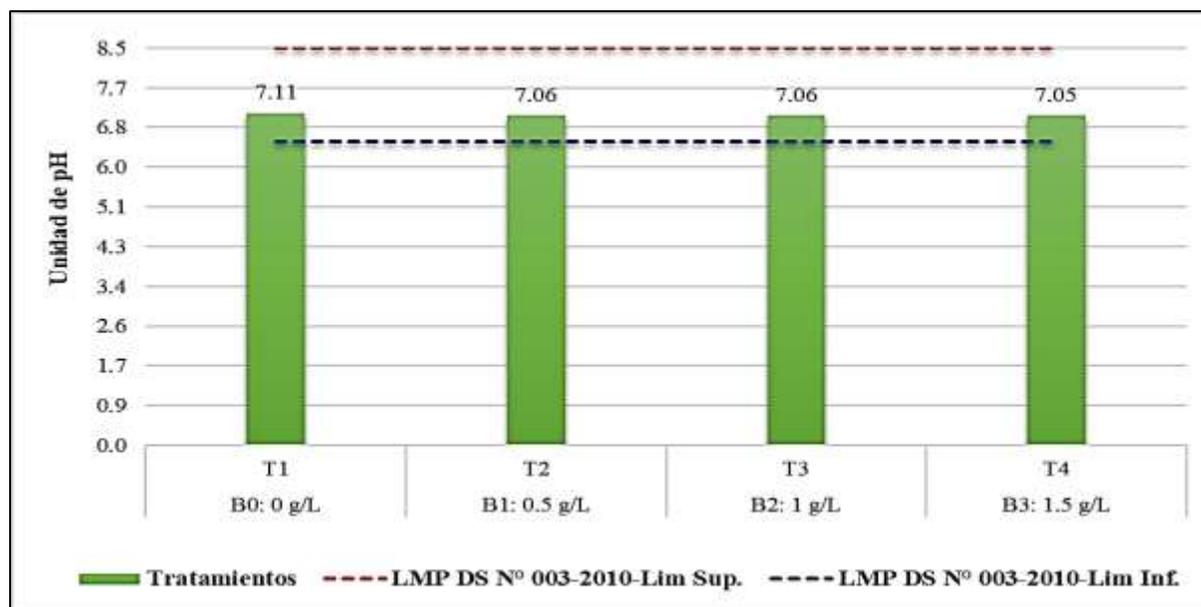
Figura 14*Porcentaje de remoción de sólidos disueltos totales*

4.8. Unidades de pH

Se registraron concentraciones de potencial de hidrógeno desde un valor mínimo de 7.0 unidades de pH en el T4 hasta un valor máximo de 7.11 unidades de pH en el T1. Asimismo, los promedios variaron entre un mínimo de 7.05 unidades de pH el T4 hasta un valor máximo de 7.11 unidades de pH en el T1, se aprecian en la **Figura 15**.

Figura 15

Unidades de pH en promedio.



Los valores obtenidos no superan los límites máximos permisibles (LMP) para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, de la normatividad nacional N° 003-2010-MINAM que especifica un valor máximo de 6.5 - 8.5 unidades de pH. Se concluyen que los valores de pH no se vieron afectados con la aplicación del coagulante (*M. oleifera*). De igual manera reportan Hernández y Perilla (2019) que no existe mucha variación por la adición de (*M. oleifera*) a diferentes dosis.

Tabla 19

Análisis de varianza (ANOVA) para unidades de pH

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tratamiento	5.8333E-05	2	2.9167E-05	0.00920707	0.99083919	3.46680011
Error	0.066525	21	0.00316786			
Total	0.06658333	23				

CV = 1 %

En la **Tabla 19** se observa los resultados del análisis de varianza para el pH, en los cuales se observa que no existe significación estadística en las dosis del coagulante (*M. oleifera*). Dado que el valor de significación (p-valor: 0.9908391

para esta fuente de variación es mayor al 0.05 (5 %). Esto indica que las diferencias del pH en los diferentes tratamientos no se deben a la influencia de las dosis del coagulante (*M. oleifera*). Es decir, que no ejerce efecto significativo en el pH.

El coeficiente de variación es 1 %, este valor indicó la mínima variabilidad del pH dentro de los tratamientos y repeticiones.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El porcentaje de remoción de turbidez y coliformes fecales del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín utilizando semillas de *M. oleifera* la dosis de 1.5 g/L fue más eficiente logrando porcentaje de remoción de un 75.55 y 80.91 %.

Los valores de turbidez promedio del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín, previo al tratamiento fue un valor de 72.4 NTU y posterior al tratamiento con una dosis de semillas de *M. oleifera* de 1.5 g/L se obtuvo un valor promedio de 17.7 NTU.

Las concentraciones promedio de coliformes fecales del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Celendín, previo al tratamiento fue 8.23412×10^5 NMP/100 mL y posterior al tratamiento con una dosis de semillas de *M. oleifera* de 1.5 g/L se obtuvo un valor de 1.57175×10^5 NMP/100 mL.

5.2. Recomendaciones

- Como tratamiento terciario en la laguna facultativa de la PTAR de Celendín se recomienda utilizar dosis de 1.5 g/L de polvo de *M. oleifera* para obtener mayor remoción, ya que proporcionó mayores resultados en CCT y turbidez.
- Se recomienda utilizar dosis de 1.5 g/L de polvo de *M. oleifera* a diferentes temperaturas para determinar su efecto a determinadas regiones y climas del país.
- Se recomienda profundizar en la utilización de semillas de *M. oleifera* como coadyuvante natural en procesos de coagulación y floculación debido a sus propiedades protéicas catiónicas.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Ascón, E. (2010). *Utilización de la semilla de tara (Caesalpinia spinosa) como ayudante en la coagulación en el tratamiento de agua*. [Tesis Pregrado, UNI, Lima- Perú].
- Aguilar, M. (2013). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación*. Universidad de Murcia. p. 167-169.
- Aguilar, M. (2014). *Análisis de agua, determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. Secretaria de Economía. p. 45-57
- Andía Cárdenas, Y. (2000). *Tratamiento de agua: Coagulación y Floculación*. SEDAPAL, Lima, Perú.
- Anselme, K., Narasiah, S., y Talbot, B. 1994. *Agentes activos y mecanismo de coagulación de aguas turbias con M. oleifera*. Elsevier Science, 1, 703-710.
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Editorial Me Grail Hill.
- Bakhshandeh, A., Frydel, D., & Levin, Y. (2022). *Teoría de la regulación de carga de partículas coloidales en soluciones electrolíticas*. Langmuir, 38(45), 13963-13971. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02313>
- Bueno, J. (1997). *Contaminación e Ingeniería Ambiental. FICYT. T III. Contaminación de las aguas*. Revista tratamientos secundarios fisicoquímicos de efluentes líquidos, 1(3), 432-450.

- Campos, H. (2020). *Efecto coagulante de la semilla de M. oleifera para clarificar agua del canal Monsefú, centro poblado Callanca, distrito Monsefú*. [Tesis pregrado, UDL-FCI]. [https://repositorio.udl.edu/bitstream/UDL/304/1/TESIS%20CAMPOS%20CASTR O.pdf](https://repositorio.udl.edu/bitstream/UDL/304/1/TESIS%20CAMPOS%20CASTR%20O.pdf)
- Campos, J. (2003). *Caracterización del agente coagulante activo de las semillas de M. oleifera mediante HPLC*. Boletín del centro de investigaciones biológicas, 37(1), 35-43.
- Carrasco, D. (2015). *Metodología de la investigación científica*. Lima: Editorial San Marcos.
- Carrera, G; Infante, E. (2015). *Influencia del pH, concentración de coagulante y floculante en la remoción de sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno y turbidez en efluente de lavado de pulpa de la planta papelerá TRUPAL S.A*. Facultad de Ingeniería Química, UNT.
- Corona, J. (2011). *Estado de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas de la cuenca del Lago de Maracaibo, Venezuela*. *Multiciencias* (11), 345–352. <http://www.redalyc.org/html/904/90421972003/>
- Duarte, F. (2019). *Calidad del agua para consumo humano en el proceso de captación, tratamiento, distribución y consumo en el Cantón La Maná, provincia Cotopaxi*. [Tesis pregrado, Facultad de ciencias ambientales].
- Espigares, M., y Pérez, J. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Granada: Universidad de Granada.
- Foidl, N., Mayorga, L. y Vásquez, W. (1999). *Utilización del Marango (M. oleifera) como forraje fresco para ganado*. *Agroforestería para la producción animal en América Latina*. Eds. M.D. Sánchez y Rosales. Estudio FAO: Producción y Sanidad Animal.
- Folkard, GY. (2012). *M. oleifera un árbol con enormes potencialidades*. <http://www.fao.org/3/a-x6324s.pdf>
- García, B. (2007). *Metodología de extracción in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial: aplicación en países en vías de desarrollo*. Instituto de seguridad

Industrial, Radiofísica y Medioambiental. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia-España.

Goyenola, G. (2013). *Transparencia, color y turbidez. Red de monitoreo ambiental participativo de sistemas acuáticos*. RED MAPSA.

Gregory, B. (2014). *Polielectrolitos orgánicos en el tratamiento de aguas*. Aguas residuales. 2301-2324.

Guzmán, L; Núñez, A. (2013). *Utilización del polvo de semilla de cañafístula (Cassia fistula) como agente coagulante natural en el tratamiento de agua potable*. Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería. p. 8-9.

Hernández, E., Perilla, A. (2019). *Análisis del efecto coagulante semilla M. Oleífera para el tratamiento de aguas residuales en el Hotel Ítaca*. *Boletín Semillas Ambientales*, 13(2): 59-69. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/view/15873>

Hernández, R., y Fernández, C. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta edición). México D.F.: Mc Graw Hill/Interamericana Editores S.A.

INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2019). Perú: *Anuario de Estadísticas Ambientales*. https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1704/libro.pdf

Jiménez C., B.; J.C. Durán, J. M. Méndez C. Calidad. En: Jiménez C., M.L. Torregrosa y L. Aboites (Eds.). *Tratamiento de Agua Residual*. AMC-Conagua. México. 2010.

Liñan, F. (2010). *M. oleifera, el árbol de la nutrición*. *Ciencia y Salud Virtual*. ISSN: 2145 -5333. 2 (1): 130-138

Matilainen, A; Vepsalainen, M; Sillanpaa, M. (2010). *Eliminación de materia orgánica natural por coagulación durante el tratamiento del agua potable: una revisión*. *Adv. Ciencia de la interfaz coloide*, 159: 189-197.

- Mejía, P., Urquia, K., Cabello, R., Valdiviezo, LG. (2020). *Evaluación de la M.oleifera en el tratamiento de aguas con alta turbidez y carga orgánica. Ingeniería del agua*, 24(2): 119-127. <https://doi.org/10.4995/Ia.2020.12274>
- Meoño, F., Taranco Gonzales, C., y Olivares Morales, Y. (2018). *Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. Universidad San Ignacio de Loyola*, 2(2): 9-25. <https://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf>
- Mera, C., Gutiérrez, M., Montes, C., Paz, J. (2016). *Efecto de la M. oleifera en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2): 100-109. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S169235612016000200012&script=sci_abstract&tlng=es
- Metcalf; Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid España. Editorial McGraw Hill: (1).
- Mitchell y Stapp, (1992) *General Information on Total Dissolved Solids*. Boulder.co.us. <https://bcn.boulder.co.us/basin/data/NEW/info/TDS.html>
- Molano, L. (2011). *La semilla de M. oleifera como alternativa de coagulante natural para el tratamiento de agua*. [Tesis en especialidad, Universidad Industrial de Santander].
- Morales Avelino, F., Méndez Novelo, R., Tamayo Dávila, M. (2009). *Tratamiento de aguas residuales de rastro mediante semillas de M. Oleifera Lam como coagulante. Tropical and Subtropical Agroecosyste*. <http://www.redalyc.org/pdf/939/93912996021.pdf> E-ISSN: 1870-0462
- MohseniBandpei, A., García, L. M., & Ruiz, J. (2018). *Propiedades físicas y composición química del MOSE como coagulante natural*. *Journal of Environmental Engineering*, 45(3), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jenveng.2018.03.005>
- Muyibi Suleyman, A; Evison, Lilian, M. (1995). *Semillas de M. oleifera para ablandar aguas duras. Investigación del agua* 29(4), 1099-1104. ISSN: 0043-135

- Ndabigengesere, A., Narasiah, K. S., & Talbot, B. G. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Research*, 29(2), 703–710.
- Ojeda, L. (2013). *Determinación de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del Tropaeolum tuberosum, en el tratamiento del agua cruda de la planta de Puengasi de la EPMAPS*. Universidad Politecnica Salesiana, 1(2), 56-59.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2017). *Agua, saneamiento y salud (ASS): Informe acerca de los progresos sobre el agua potable y saneamiento*. http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2012/drinking_water_20120306/es
- Pérez, A. (2010). *Características y potencialidades de M. oleifera, Lamark. Una alternativa para la alimentación animal*. Scielo, 1(2), 45-57. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942010000400001
- Raffo, E., Ruiz, E. (2014). *Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno*. *Industrial Data*, 17(1), 71–80. https://www.redalyc.org/html/816/81640855_010/
- Ramírez Cortina, C. (1992). *Tratamiento de aguas residuales industriales*. UNUM. Colección de texto.
- Romero Rojas, JA. (2000). *Purificación del agua*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Romero Rojas, JA. (2005). *Calidad del agua*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, Colombia.
- Romero, M. (2012). *Caracterización y tratamiento de agua residual provenientes de plantas de producción*. [Tesis pregrado, Universidad simón Bolívar].
- Rony, C; Quintana, P. (2013). *Uso de floculantes de origen natural en el tratamiento del agua en términos de turbidez en el rio Santa-Huara*. Huacho. Universidad Nacional José Faustino Sánchez. p. 76-89.
- Rubí, M; Martínez, D; Carrasqueo, S; Vargas, L. (2011). *Uso de la M. oleifera para el mejoramiento de la calidad del agua de un efluente doméstico proveniente de lagunas de*

estabilización. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 45(2): 169 – 180.
<https://produccioncientificaluz.org/index.php/boletin/article/view/289>

Sáenz Damián, GS. (2019). *Comparación de la eficiencia de M. oleifera y Caesalpinia spinosa para mejorar la calidad del agua residual del dren 2000* (en línea). Tesis pregrado, Universidad Cesar Vallejo. <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/44614>

Sáenz, W. S. (2015). *Utilización de la semilla natural M. oleifera como ayudante de la coagulación en la planta potabilizadora de agua de la ciudad de Caráz provincia de Huaylas Ancash*. [Tesis pregrado, Facultad de Ciencias del Ambiente. UNAS]. <http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/1692/T%20B00120%20S14%202015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sánchez, J., Beltrán, J. (2010). *La M. oleifera, un recurso agrosostenible para la potabilización de agua optimización de la extracción del agente coagulante*. Departamento de Ingeniería Química y Química Física Universidad de Extremadura.

Suarez, CA. (2019). *Eficiencia de la Opuntia ficus indica y M. oleifera para mejorar la calidad de aguas residuales*. [Tesis pregrado, Universidad Cesar Vallejo] http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/36665/Su%C3%A1rez_ACA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

SUNASS (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento). (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras*. Pdf. 26 p.

Vela, C. (2016). *Disminución de la turbidez utilizando coagulante natural M. oleifera en aguas obtenidas del rio Alto Chicama, puente Ingón*. [Tesis pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Cesar Vallejo]. http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/7597/vela_ac.pdf?sequence=1&isAllowed=y

CAPÍTULO VII

ANEXOS

ANEXO 1. Presentación de la matriz de consistencia.

ANEXO 2. Cálculos de los resultados.

ANEXO 3. Resultados de parámetros de campo.

ANEXO 4. Panel fotográfico de la construcción, instalación y análisis del sistema.

ANEXO 5. Resultados de los análisis del laboratorio regional del agua.

7.1. ANEXO 1. Presentación de la información y matriz de consistencia.

La metodología del trabajo de investigación es de tipo experimental porque se administra un estímulo o tratamiento y después aplicar una medición de una o más variables.

Metodología de la investigación.

Modelo estadístico del diseño completamente al azar (DCA)

El modelo aditivo lineal de este diseño es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

$i = 1, 2, \dots, t$;

$t =$ número de tratamientos

$j = 1, 2, \dots, r$;

$r =$ número de repeticiones por tratamiento

Donde:

$\mu =$ es el efecto medio

$\tau_i =$ es el efecto de i –ésimo tratamiento

$\varepsilon_{ij} =$ error experimental

Tabla 20

Esquema del diseño completamente al azar (DCA)

Repeticiones	Tratamientos			T	Gran total
	1	2	...		
1	Y_{11}	Y_{21}	...	Y_{t1}	
2	Y_{12}	Y_{22}	...	Y_{t2}	
.		Y_{tr}	
.			
R	Y_{1r}	Y_{2r}	...		
Total, tratamiento	Y_1	Y_2	...	Y_t	$Y_{..}$
Media	Y_1	Y_2	...	Y_t	$Y_{..}$
Tamaño de muestra	n	...	n		N

Fuente. (Romaina, 2012).

Análisis de variancia

Tabla 21

Esquema del análisis de varianza del diseño completamente al azar (DCA)

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrado	Cuadrado medio	F calculado	P - valor
Tratamiento	t - 1	$\frac{\sum y_1^2}{r} - TC$	$\frac{SCt}{t - 1}$	$\frac{CMt}{CME}$	*
Error	t(r - 1)	SCT - SCt	$\frac{SCE}{t(r - 1)}$		**
Total	rt - 1	$\sum y_{ij}^2 - TC$			

*Diferencia estadística significativa

**Diferencia estadística altamente significativa

Dónde:

t = N° de tratamientos

r = N° de repeticiones

SCt = suma de cuadrado de tratamientos

SCT = suma de cuadrados totales

SCE = suma de cuadrado del error

CMt = cuadrado medio del tratamiento

CME = cuadrado medio del error

7.2. ANEXO 2. Cálculos de los resultados.

Cálculos de eficiencia de remoción de la CCT.

- Procesamiento de datos para la eficiencia del (T2)

$$T1 = \frac{813750 - 647500}{813750} * 100 = 20.43 \%$$

- Procesamiento de datos para la eficiencia del (T3).

$$T3 = \frac{813750 - 431250}{813750} * 100 = 47.0 \%$$

- Procesamiento de datos para la eficiencia del (T4).

$$T4 = \frac{813750 - 157500}{813750} * 100 = 80.65 \%$$

Cálculos de eficiencia de remoción de la turbidez.

- Procesamiento de datos para la eficiencia del (T2)

$$T1 = \frac{72.3 - 54.6}{72.3} * 100 = 24.43 \%$$

- Procesamiento de datos para la eficiencia del (T3).

$$T3 = \frac{72.3 - 40.7}{72.3} * 100 = 43.64 \%$$

- Procesamiento de datos para la eficiencia del (T4).

$$T4 = \frac{72.3 - 19.8}{72.3} * 100 = 72.59 \%$$

7.3. ANEXO 3. Panel fotográfico la toma de muestras y obtención de las dosis del coagulante (*M. oleifera*)



Figura 1 secado de semillas en horno Memmert UF110



Figura 2 semillas de *M. oleifera* secas/deshidratadas.



Figura 3 Trituración de semillas de *M. oleifera* en capsula de porcelana y mortero



Figura 4 Polvo resultante de la trituración de *M. oleifera*



Figura 5 Toma de muestra de agua residual doméstica PTAR – Celendín – fecha 20/12/2022



Figura 6 Toma de muestra de agua residual doméstica PTAR – Celendín – fecha 26/01/2022



Figura 7 *Recolección de las muestras en el efluente de la laguna facultativa de la PTAR – Celendín. Para su análisis de los diferentes parámetros.*



Figura 8 *Pesado del coagulante de la dosis (0.5 g/L).*



Figura 9 Pesado del coagulante de las dosis (0.5, 1 y 1.5 g/L).



Figura 10 Agregado de las respectivas dosis del coagulante en las diferentes muestras de agua residual doméstico, se agito constante por 1 minuto y una agitación lenta por 15 minutos.

7.4. ANEXO 4. Resultados de los análisis del Laboratorio Regional del Agua

 <p>LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA</p>	<p>LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - D CON REGISTRO N° LE-084</p>	 <p>INACAL DA - Perú Laboratorio de Ensayo Acreditado Registro N° LE - 084</p>
INFORME DE ENSAYO N°		IE 1222766

DATOS DEL CLIENTE

Razon Social/Nombre	ZONALI PAZ ANGULO PLASENCIA		
Dirección	-		
Persona de contacto	ZONALI PAZ ANGULO PLASENCIA	Correo electrónico	zangulop14@unc.edu.pe

DATOS DE LA MUESTRA

Fecha del Muestreo	20.12.2022	Hora de Muestreo	7:00 a 7:22
Responsable de la toma de muestra	Cliente	Plan de muestreo N°	- 01
Procedimiento de Muestreo	-		
Tipo de Muestreo	Puntual		
Número de puntos de muestreo	16		
Ensayos solicitados	Fisicoquímico - Microbiológicos		
Breve descripción del estado de la muestra	Las muestras cumplen con los requisitos de volumen, preservación y conservación		
Referencia de la Muestra:	Celendin		

DATOS DE CONTROL DEL LABORATORIO

N° Contrato	SC-1023	Cadena de Custodia	CC - 766- 22
Fecha y Hora de Recepción	20.12.22	08:00	Inicio de Ensayo 20.12.22 10:10
Reporte Resultado	06.01.2023	15:50	

LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA



Firmado digitalmente por NEYRA JAICO
Edder Neyra FAU 304523744 108 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 06/01/2023 08:15 p.m.

Edder Neyra Jaico
Responsable de Laboratorio
CIP: 147028

Cajamarca, 06 de Enero de 2023

INFORME DE ENSAYO N° IE 1222766

ENSAYOS			FISICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			T1	T2	T3	T4	T5	T6
Código Laboratorio			1222766-1	1222766-2	1222766-3	1222766-4	1222766-5	1222766-6
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	Municipal
Localización de la Muestra			PTAR - Celendin					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Turbidez	NTU	0.0900	72.40	56.20	40.70	19.50	72.15	54.90
pH a 25°C	pH	NA	7.11	7.11	7.10	7.11	7.11	7.10
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2.5000	630	589	570	541	708	652

Leyenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

ENSAYOS			MICROBIOLÓGICOS					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Coliformes Termotolerantes	NMP/ 100mL	1.8000	8.201 x 10 ⁵	6.531 x 10 ⁵	4.398 x 10 ⁵	1.642 x 10 ⁵	8.199 x 10 ⁵	6.498 x 10 ⁵

Nota: Los Resultados <1.0, <1.8, <1.7 y <1 : significa que el resultado es equivalente a cero, no se aprecian estructuras biológicas en la muestra. VE: valor estimado

ENSAYOS			FISICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			T7	T8	T9	T10	T11	T12
Código Laboratorio			1222766-7	1222766-2	1222766-3	1222766-4	1222766-5	1222766-6
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	Municipal
Localización de la Muestra			PTAR - Celendin					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Turbidez	NTU	0.0900	38.80	11.70	73.20	56.85	40.28	11.50
pH a 25°C	pH	NA	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.10
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2.5000	624	613	631	594	561	545

Leyenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

ENSAYOS			MICROBIOLÓGICOS					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Coliformes Termotolerantes	NMP/ 100mL	1.8000	4.202 x 10 ⁵	1.439 x 10 ⁵	8.303 x 10 ⁵	6.601 x 10 ⁵	4.531 x 10 ⁵	1.599 x 10 ⁵

Nota: Los Resultados <1.0, <1.8, <1.7 y <1 : significa que el resultado es equivalente a cero, no se aprecian estructuras biológicas en la muestra. VE: valor estimado



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL- DA
CON REGISTRO N° LE-084



INFORME DE ENSAYO N° IE 1222766

ENSAYOS			FISICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			T13	T14	T15	T16	-	-
Código Laboratorio			1222766-13	1222766-14	1222766-15	1222766-16	-	-
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	-	-
Descripción			Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	-	-
Localización de la Muestra			PTAR - Celendin	PTAR - Celendin	PTAR - Celendin	PTAR - Celendin	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Turbidez	NTU	0.0000	72.38	55.98	41.25	19.40	-	-
pH a 25°C	pH	NA	7.11	7.11	7.10	7.11	-	-
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2.5000	630	587	551	539	-	-

Legenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

ENSAYOS			MICROBIOLÓGICOS					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Coliformes Temotolerantes	NMP/ 100mL	1.8000	8.241 x 10 ⁵	6.596 x 10 ⁵	4.399 x 10 ⁵	1.601 x 10 ⁵		

Nota: Los Resultados <1.0, <1.6, <1.1 y <-1 : significa que el resultado es equivalente a cero, no se aprecian estructuras biológicas en la muestra. VE: valor estimado



Firmado digitalmente por
COLINA VENEGAS Juan Jose
FAU 20453744168 soft

Motivo: Viso en señal de
conformidad
Fecha: 06/01/2023 08:08 p. m.



Firmado digitalmente por
LOPEZ LEON Freddy Humberto
FAU 20453744168 soft

Motivo: Viso en señal de
conformidad
Fecha: 06/01/2023 08:02 p. m.

Cajamarca, 06 de Enero de 2023



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - D
CON REGISTRO N° LE-084



INFORME DE ENSAYO N°

IE 1222766

Ensayo	Unidad	Método de Ensayo Utilizado
Turbidez	NTU	SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 2130. B, 23rd Ed. 2017. Turbidity, Nephelometric Method
Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C	pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 4500-H+ B, 23rd Ed. 2017. pH Value: Electrometric Method.
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 A,C 23rd Ed. 2017. Solids, Total Dissolved Solids Dried at 180°C
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 A,B,C,E, 23rd Ed. 2017. Multiple - Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group - Fecal Coliform Procedure.

NOTAS FINALES

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos y/o matriz que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

(*) Los Resultados son referenciales, no cumplen los requisitos de volumen, tiempo, preservación o conservación estipulado por el método, por lo tanto no se encuentra dentro del alcance de acreditación.

ii Los resultados indicados en este informe concierne única y exclusivamente a las muestras recibidas y sometidas a ensayo o realizadas en campo por el Laboratorio Regional del Agua. Cuando la toma de muestra lo realiza el cliente los resultados aplican a las muestras como son recibidas.

ii La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito del Laboratorio Regional del Agua. Este informe no será válido si presenta tachaduras o enmiendas.

ii Las muestras sobre las que se realicen los ensayos se conservaran en Laboratorio Regional del Agua de acuerdo al tiempo de perecibilidad que indica el método de ensayo y por un tiempo máximo de 10 días luego de la emisión de la informe de ensayo; luego serán eliminadas salvo pedido expreso del cliente.

ii Este documento al ser emitido sin el símbolo de acrei

ii Se prohíbe el uso del símbolo de acreditación o la declaración de condición de acreditado emitida en este informe, por parte del cliente.

Cajamarca, 06 de Enero de 2023

**LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA**



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - D
CON REGISTRO N° LE-084



INFORME DE ENSAYO N° IE 1222790

DATOS DEL CLIENTE

Razon Social/Nombre **ZONALI PAZ ANGULO PASENCIA**
Dirección -
Persona de contacto **ZONALI PAZ ANGULO PASENCIA** Correo electrónico zangulop14@unc.edu.pe

DATOS DE LA MUESTRA

Fecha del Muestreo **25.01.2023** Hora de Muestreo **1:00 a 1:30**
Responsable de la toma de muestra **Cliente** Plan de muestreo N° **- 02**
Procedimiento de Muestreo -
Tipo de Muestreo **Puntual**
Número de puntos de muestreo **16**
Ensayos solicitados **Fisicoquímico - Microbiológicos**
Breve descripción del estado de la muestra **Las muestras cumplen con los requisitos de volumen, preservación y conservación**
Referencia de la Muestra: **Cetendln**

DATOS DE CONTROL DEL LABORATORIO

N° Contrato **SC-1055** Cadena de Custodia **CC - 766- 56**
Fecha y Hora de Recepción **26.01.23 08:30** Inicio de Ensayo **27.01.23 10:10**
Reporte Resultado **06.02.2023 15:50**

**LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA**



Firmado digitalmente por NEYRA JAICO
Edder Miguel FAU 20453744 108 soft

Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 06/02/2023 06:15 p.m.

Edder Neyra Jaico
Responsable de Laboratorio
CIP: 147028

Cajamarca, 06 de Febrero de 2023



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL- DA
CON REGISTRO N° LE-084



INFORME DE ENSAYO N° IE 1222790

ENSAYOS			FISICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			T1	T2	T3	T4	T5	T6
Código Laboratorio			1222766-1	1222766-2	1222766-3	1222766-4	1222766-5	1222766-6
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	Municipal
Localización de la Muestra			PTAR - Celendin					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Turbidez	NTU	0.0900	72.40	54.20	40.70	19.50	72.12	54.90
pH a 25°C	pH	NA	7.10	7.01	7.00	7.00	7.10	7.01
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2.5000	660	589	575	561	690	650.02

Legenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

ENSAYOS			MICROBIOLÓGICOS					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Coliformes Termotolerantes	NMP/ 100mL	1.8000	8.198x 10 ⁵	6.431x 10 ⁵	4.224x 10 ⁵	1.451x 10 ⁵	8.305x 10 ⁵	6.535x 10 ⁵

Nota: Los Resultados <1.0, <1.8, <1.1 y <1 : significa que el resultado es equivalente a cero, no se aprecian estructuras biológicas en la muestra. VE: valor estimado

ENSAYOS			FISICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			T7	T8	T9	T10	T11	T12
Código Laboratorio			1222766-7	1222766-2	1222766-3	1222766-4	1222766-5	1222766-6
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	Municipal
Localización de la Muestra			PTAR - Celendin					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Turbidez	NTU	0.0900	40.80	20.60	72.20	54.28	41.12	19.60
pH a 25°C	pH	NA	7.00	7.00	7.10	7.00	7.00	7.00
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2.5000	612.01	614	649	593	571	560

Legenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

ENSAYOS			MICROBIOLÓGICOS					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Coliformes Termotolerantes	NMP/ 100mL	1.8000	4.400x 10 ⁵	1.797 x 10 ⁵	8.202 x 10 ⁵	6.490 x 10 ⁵	4.324 x 10 ⁵	1.635 x 10 ⁵

Nota: Los Resultados <1.0, <1.8, <1.1 y <1 : significa que el resultado es equivalente a cero, no se aprecian estructuras biológicas en la muestra. VE: valor estimado



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - D/A
CON REGISTRO N° LE-084



INFORME DE ENSAYO N° IE 1222790

ENSAYOS			FISICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			T13	T14	T15	T16	-	-
Código Laboratorio			1222766-13	1222766-14	1222766-15	1222766-16	-	-
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	-	-
Descripción			Municipal	Municipal	Municipal	Municipal	-	-
Localización de la Muestra			PTAR - Celendin	PTAR - Celendin	PTAR - Celendin	PTAR - Celendin	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Turbidez	NTU	0.0000	72.38	54.68	40.24	19.80	-	-
pH a 25°C	pH	NA	7.10	7.00	7.00	7.00	-	-
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2.5000	600.42	561	543	521	-	-

Leyenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor -LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

ENSAYOS			MICROBIOLÓGICOS					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	1.8000	8.197 x 10 ⁵	6.451x 10 ⁵	4.200x 10 ⁵	1.410x 10 ⁵	-	-

Nota: Los Resultados <1.0, <1.6, <1.1 y <1. . significa que el resultado es equivalente a cero, no se aprecian estructuras biológicas en la muestra. VE: valor estimado

**LABORATORIO REGIONAL
LAGUA**



Firmado digitalmente por
COLINA VENEGAS Juan Jose
FAU 20453744168 soft

Motivo: Visto en señal de
conformidad
Fecha: 06/02/2023 06:08 p. m.



Firmado digitalmente por
LOPEZ LEON Freddy Humberto
FAU 20453744168 soft

Motivo: Visto en señal de
conformidad
Fecha: 06/02/2023 06:20 p. m.

Cajamarca, 06 de febrero de 2023



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - D
CON REGISTRO N° LE-084



INFORME DE ENSAYO N°

IE 1222790

Ensayo	Unidad	Método de Ensayo Utilizado
Turbidez	NTU	SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 2130. B, 23rd Ed. 2017. Turbidity, Nephelometric Method.
Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C	pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 4500-H+ B, 23rd Ed. 2017. pH Value: Electrometric Method.
Sólidos disueltos Totales	mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 A,C 23rd Ed. 2017. Solids, Total dissolved Solids Dried at 180°C
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 A,B,C,E, 23rd Ed. 2017. Multiple - Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group - Fecal Coliform Procedure.

NOTAS FINALES

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos y/o matriz que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

(*) Los Resultados son referenciales, no cumplen los requisitos de volumen, tiempo, preservación o conservación estipulado por el método, por lo tanto no se encuentra dentro del alcance de acreditación.

ii Los resultados indicados en este informe concierne única y exclusivamente a las muestras recibidas y sometidas a ensayo o realizadas en campo por el Laboratorio Regional del Agua. Cuando la toma de muestra lo realiza el cliente los resultados aplican a las muestras como son recibidas.

ii La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito del Laboratorio Regional del Agua. Este informe no será válido si presenta tachaduras o enmiendas.

ii Las muestras sobre las que se realicen los ensayos se conservaran en Laboratorio Regional del Agua de acuerdo al tiempo de perecibilidad que indica el método de ensayo y por un tiempo máximo de 10 días luego de la emisión de la informe de ensayo; luego serán eliminadas salvo pedido expreso del cliente.

ii Este documento al ser emitido sin el símbolo de acrei

ii Se prohíbe el uso del símbolo de acreditación o la declaración de condición de acreditado emitida en este informe, por parte del cliente.

Cajamarca, 06 de Febrero de 2023

**LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA**