

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Estudio de la semilla de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como coagulante en el
proceso de tratamiento de agua en muestras sintéticas de mediana y alta
turbidez.**

Tesis presentada por el Bachiller:

Mendoza Pary, Carlos Raul

ORCID: 0009-0005-0794-4156

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor:

Dr. Colina Andrade, Gilberto de Jesús

ORCID: 0000-0002-6623-0760

Arequipa-Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 03 de Junio del 2025

Dictamen: 013839-C-EPIA-2025

Visto el borrador del expediente 013839, presentado por:

2019200131 - MENDOZA PARY CARLOS RAUL

Titulado:

**ESTUDIO DE LA SEMILLA DE TARA (CAESALPINIA SPINOSA) COMO COAGULANTE EN EL
PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA EN MUESTRAS SINTÉTICAS DE MEDIANA Y ALTA
TURBIDEZ**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**29611452 - ARENAZAS RODRIGUEZ ARMANDO JACINTO
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



**72384055 - MEDINA RAMOS ROBERT JOAQUIN
DICTAMINADOR**



Estudio de la semilla de Tara (Caesalpinia spinosa) como coagulante en el proceso de tratamiento de agua en muestras sintéticas de mediana y alta turbidez.

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	Trabajo del estudiante	2%
2	hdl.handle.net	Fuente de Internet	2%
3	www.coursehero.com	Fuente de Internet	1%
4	repositorio.ucsm.edu.pe	Fuente de Internet	1%
5	docs.google.com	Fuente de Internet	1%
6	pdffox.com	Fuente de Internet	<1%
7	www.lillo.org.ar	Fuente de Internet	<1%
8	revistas.unimilitar.edu.co	Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

A mi querido padre Raul, quien siempre me demostró su apoyo y nunca dudo de mí, por su gran sabiduría, paciencia y perseverancia que me animaron a seguir este sueño.

A mi querida madre Zonia, por todo el amor brindado, fortaleza y guiarme por un camino correcto.

A mi querida hermana Alexandra, quien siempre estuvo pendiente de mí, en situaciones difíciles, brindándome consejo y su amistad incondicional.

A mis tíos David y Nancy por brindarme un hogar en momentos difíciles y creer en mi en cada paso.

A la persona que estuvo presente y recibí su incondicional apoyo en todo este proceso Camila, una compañera única ¡Gracias por estar a mi lado y creer en mi!

A Martín y Tofi fieles compañeros que disfrutaba durante mis vacaciones.

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Gilberto Jesús Colina Andrade, quien fue mi asesor, un apoyo y sobre todo confió en mí y mis capacidades en el presente trabajo. Su compromiso como asesor fue aún más allá, me guio brindándome conocimientos, oportunidades y perspectivas nuevas para el desarrollo en mi vida profesional.

Al laboratorio de Ciencias de los Materiales y laboratorio de Bioprocesos, en los cuales conocí personas talentosas, las cuales me brindaron ayuda, conocimiento, instrucción y compañerismo a lo largo de este proceso.

A el Vicerrectorado de Investigación UCSM y PROCENCIA por financiar este proyecto.

RESUMEN

El tratamiento de aguas para el consumo humano sigue siendo un aspecto importante por investigar en la etapa de coagulación – floculación, con el fin de garantizar la sostenibilidad de estas operaciones unitarias. En los últimos años el estudio de los coagulantes naturales de origen vegetal se ha incrementado significativamente, debido a que ofrecen una alternativa rentable, ecológica y eficiente. En este estudio se evaluó la eficiencia de un coagulante natural derivado de la semilla de Tara (*Caesalpinia spinosa*) y su posterior comparación con un coagulante sintético convencional. Las muestras de *Caesalpinia spinosa* fueron caracterizadas mediante la determinación del contenido de lípidos, humedad y pH, adicionalmente se aplicaron las técnicas de FTIR, SEM, potencial Z y HPLC. La composición química y morfológica promueve la desestabilización de cargas coloidales y favorece la formación de micro y macro flóculos. La optimización del proceso de coagulación se desarrolló inicialmente mediante un diseño factorial fraccionado (2^{5-1}) y un diseño compuesto central (CCD), siendo las variables clave el pH, nivel de turbidez y dosis del coagulante. Los experimentos se realizaron utilizando muestras de agua turbia sintética (ATS) y agua de río. Para condiciones de turbidez media se logró un rendimiento óptimo con 6.0 mL de coagulante a pH 7.4, lo que resultó en una eficiencia de remoción del 96.15% de turbidez y 95.97% de sólidos suspendidos totales (SST). En condiciones de alta turbidez se obtuvo una remoción de 98.11% y 99.02% para SST, aplicando una dosis de 4.2 mL a pH 7.3. Los modelos estadísticos exhibieron un ajuste de R^2 0.99% y CV 1%, los análisis de diagnóstico confirman su validez. Las pruebas de jarra con agua de río (215 NTU y pH 7.24), demostraron una eficiencia de remoción de turbidez y SST de 98.51% y 98.90% respectivamente, con valores residuales de turbidez por debajo de los límites máximos permisibles descritos en la legislación peruana vigente. Estos resultados subrayan el potencial del coagulante a base de semilla de Tara como una alternativa sostenible y eficiente en el proceso de coagulación floculación, lo cual ofrece beneficios adicionales si se compara con coagulantes convencionales donde la presencia de sales metálicas es evidente.

Palabras Clave: *Caesalpinia spinosa*, coagulación, turbidez.

ABSTRACT

The treatment of water for human consumption remains an important area of research in the coagulation-flocculation stage, in order to ensure the sustainability of these unit operations. In recent years, the study of natural plant-based coagulants has increased significantly, as they offer a cost-effective, environmentally friendly, and efficient alternative. This study evaluated the efficiency of a natural coagulant derived from the Tara seed (*Caesalpinia spinosa*) and subsequently compared it with a conventional synthetic coagulant. *Caesalpinia spinosa* samples were characterized by determining lipid content, moisture, and pH. Additionally, FTIR, SEM, Z potential, and HPLC techniques were applied. The chemical and morphological composition promotes the destabilization of colloidal charges and favors the formation of micro and macro flocs. Coagulation process optimization was initially developed using a fractional factorial (2^5-1) design and a central composite design (CCD), with pH, turbidity level, and coagulant dosage as key variables. Experiments were conducted using synthetic turbid water (STV) and river water samples. Under medium turbidity conditions, optimal performance was achieved with 6.0 mL of coagulant at pH 7.4, resulting in a removal efficiency of 96.15% turbidity and 95.97% total suspended solids (TSS). Under high turbidity conditions, removals of 98.11% and 99.02% for TSS were obtained, applying a dose of 4.2 mL at pH 7.3. Statistical models exhibited an R^2 fit of 0.99% and CV 1%, and diagnostic analyses confirmed their validity. Jar tests with river water (215 NTU and pH 7.24) demonstrated turbidity and TSS removal efficiencies of 98.51% and 98.90%, respectively, with residual turbidity values below the maximum permissible limits described in current Peruvian legislation. These results underscore the potential of the Tara seed-based coagulant as a sustainable and efficient alternative in the flocculation coagulation process, offering additional benefits compared to conventional coagulants where the presence of metal salts is evident.

Keywords: *Caesalpinia spinosa*, coagulation, turbidity.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 4

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... 5

1.1. Problemática de la investigación 5

1.2. Justificación 7

1.2.1. Justificación ambiental 7

1.2.2. Justificación social..... 7

1.2.3. Justificación económica..... 8

1.2.4. Justificación tecnológica 8

1.3. Objetivos 9

1.3.1. Objetivo general 9

1.3.2. Objetivos específicos..... 9

1.4. Hipótesis 9

CAPÍTULO II..... 10

2. FUNDAMENTO TEÓRICO 11

2.1. Antecedentes 11

2.2. Marco teórico 15

2.2.1. Fuentes naturales 15

2.2.2. Métodos para la Potabilización 16

2.2.3. Mecanismos de Coagulación 16

2.2.4. Tara (*Caesalpinia spinosa*)..... 18

2.2.5. Impacto Ambiental 24

2.2.6. Sistemas Coloidales..... 25

2.3. Marco legal 27

CAPÍTULO III..... 30

3. METODOLOGÍA 31

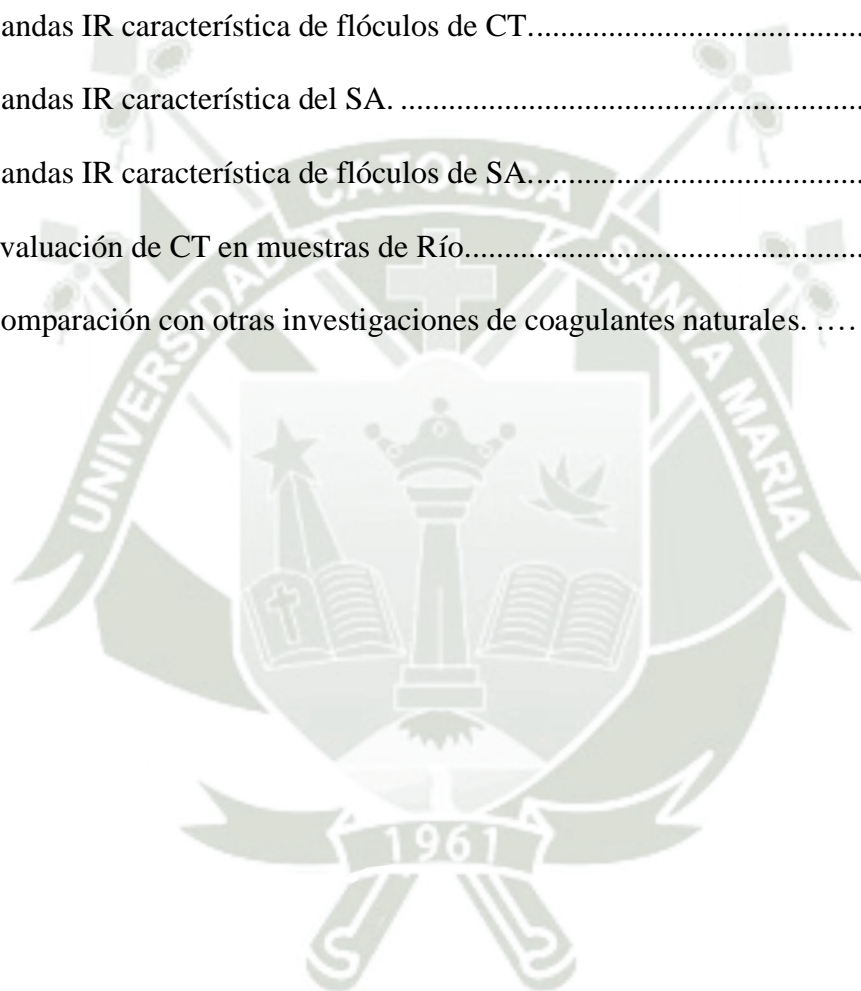
3.1. Tipo y nivel de Investigación..... 31

3.2. Diseño de la Investigación.....	31
3.2.1. Variables.....	32
3.3. Materiales y Equipos.....	36
3.3.1. Materiales	36
3.3.2. Materiales Biológicos.....	37
3.3.3. Insumos y Reactivos.....	37
3.3.4. Equipos.....	37
3.3.5. Software.....	38
3.4. Métodos de Investigación	39
3.4.1. Caracterización de muestras de agua del río Chili.	39
3.4.2. Caracterizar las muestras de la semilla de Tara.....	39
3.4.3. Establecer las variables sobre la aplicación del coagulante natural. ...	45
3.4.4. Evaluar la eficiencia de la semilla de Tara como coagulante.....	48
CAPÍTULO IV.....	51
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	52
4.1. Análisis y discusión de los resultados obtenidos	52
4.1.1. Caracterización de muestras de agua del río Chili.	52
4.1.2. Caracterización de las muestras de la semilla de Tara	54
4.1.3. Establecer variables sobre la aplicación del coagulante natural.....	64
4.1.4. Evaluación la eficiencia de la semilla de Tara como coagulante	73
CAPÍTULO V.....	117
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
5.1. Conclusiones.....	118
5.2. Recomendaciones	120
CAPÍTULO VI.....	121
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXOS.....	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación Taxonómica de la <i>Caesalpinia spinosa</i>	19
Tabla 2. Estructura de la <i>Caesalpinia spinosa</i>	20
Tabla 3. Valores experimentales del diseño.	32
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos analizados en la muestra de agua.	39
Tabla 5. Cuadro de Valores de Pesos.	42
Tabla 6. Valores experimentales del Diseño Experimental.....	46
Tabla 7. Distribución de Valores Experimentales 2^{5-1}	47
Tabla 8. Distribución de Valores Experimentales CCD.....	49
Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos iniciales de la muestra de agua, mes de febrero.....	52
Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos iniciales de la muestra de agua, mes de Noviembre.	53
Tabla 11. Porcentaje de Humedad.....	54
Tabla 12. Bandas encontradas IR y caracterizadas.....	55
Tabla 13. Valores Obtenidos de los parámetros fisicoquímicos Polvo-Coagulante.....	57
Tabla 14. Bandas encontradas IR y caracterizadas.....	60
Tabla 15. Resultados del diseño factorial fraccionado 2^{5-1}	66
Tabla 16. Análisis de varianza (ANOVA) del diseño factorial fraccionado 2^{5-1}	69
Tabla 17. Ajuste estadístico del diseño factorial fraccionado 2^{5-1}	70
Tabla 18. Respuesta del % de remoción de TM y SST del diseño CCD.....	74
Tabla 19. ANOVA del modelo CCD en la V1.	76
Tabla 20. Ajuste estadístico del CCD V1.....	77
Tabla 21. ANOVA del modelo CCD TM V2.....	82
Tabla 22. Ajuste estadístico del CCD V2.....	83
Tabla 23. Respuesta del % de remoción de TA y SST del diseño CCD.	88

Tabla 24. ANOVA del modelo CCD TA V1.	90
Tabla 25. Ajuste estadístico del CCD TA V1.	91
Tabla 26. ANOVA del modelo CCD TA V2.	95
Tabla 27. Ajuste estadístico del CCD TA V2.	96
Tabla 28. Cuadro Comparativo SA/CT.	103
Tabla 29. Bandas IR característica de flóculos de CT.....	107
Tabla 30. Bandas IR característica del SA.	107
Tabla 31. Bandas IR característica de flóculos de SA.....	108
Tabla 32. Evaluación de CT en muestras de Río.....	112
Tabla 33. Comparación con otras investigaciones de coagulantes naturales.	116



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capa eléctrica e Interacción de una partícula Coloidal.....	26
Figura 2. Ubicación de la PTAP “La tomilla”.....	36
Figura 3. Procedimiento para la extracción del Coagulante Natural.....	44
Figura 4. Proceso de Coagulación-Floculación.....	46
Figura 5. Espectro FTIR del polvo de Tara.....	55
Figura 6. Representación morfológica de la Tara.....	59
Figura 7. HPLC Cuantitativa de la semilla de Tara.....	60
Figura 8. Potencial Zeta del Coagulante de Tara.....	64
Figura 9. Curva de Sedimentación ATS.....	65
Figura 10. Diagrama de Pareto del diseño factorial fraccionado 2^{5-1}	68
Figura 11. Supuestos de Normalidad del diseño factorial fraccionado 2^{5-1}	71
Figura 12. Homogeneidad de Varianza del diseño factorial fraccionado 2^{5-1}	72
Figura 13. Independencia de Residuos del diseño factorial fraccionado 2^{5-1}	73
Figura 14. Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez media (50 NTU-t).	78
Figura 15. Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de Turbidez.	80
Figura 16. Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez media (50 NTU-sst) .	84
Figura 17. Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de SST.....	85
Figura 18. Optimización del CCD en Turbidez Media.	87
Figura 19. Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez alta (100 NTU-t).	92
Figura 20. Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de TA V1.....	94
Figura 21. Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez alta (100 NTU-sst). ...	97
Figura 22. Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de SST en TA V2.	99
Figura 23. Optimización del CCD en Turbidez Alta.....	100

Figura 24. Distribución Z potencial en el proceso de Coagulación- Flocculación.	102
Figura 25. Espectro FTIR de flóculos formados por CT y SA.....	105
Figura 26. Representación Morfológica de los flóculos del CT y SA.....	109
Figura 27. Cromatograma comparativo del Polvo de Tara y flóculos formados.	111



INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la densidad poblacional dificulta el acceso agua potable, esta se vuelve cada vez una necesidad elemental prioritaria. Para ello deben cumplir una serie de parámetros antes de ser destinadas al consumo humano y no comprometan la salud pública. Según la investigación de Ang y Mohammad (2020), mencionan que la escasez de agua afectara a más de 2 mil millones de persona y la calidad de agua potable se verá comprometida un 80% a causa de aguas residuales no tratadas. En el Perú, la SUNASS, entidad encargada de regular a los cuidados la prestación de servicios de agua potable en conjunto con los límites máximos permisibles establecidas por el DS 031-2010, el agua destinada al consumo humano debe presentar calidad sin perjudicar la salud pública.

Los cuerpos de agua superficiales presentan en su mayoría una opacidad generada por sedimentos e interacciones con microorganismos, por lo general estos sedimentos se encuentran en suspensión, provocando turbidez (Zhang et al., 2024). La turbidez es un indicador relativo de la opacidad de los cuerpos de agua, este parámetro se considera dentro de los más estudiados por su constante presencia, el cual se mide mediante la concentración de sedimentos o sólidos totales. La presencia de turbidez en ecosistemas es perjudicial, estos generan la disminución del paso de luz solar lo que dificulta a procesos fotosintéticos y la disminución de oxígeno disuelto (Tinterri et al., 2020), retención de materia orgánica (Shammas, 2005), entre otros. Una característica común de la turbidez del agua es la presencia de partículas suspendidas con cargas negativas, lo que genera interacciones espontaneas entre partículas reduciendo su velocidad de sedimentación , formando un sistema coloidal estable, presentando repulsión y manteniendo la suspensión (Napper, 2002).

Para eliminar la turbidez del agua potable, las plantas de tratamiento incluyen etapas de clarificación, donde se utilizan sistemas de coagulación – floculación, consideradas operaciones eficientes y de bajo costo, donde se hacen uso de coagulantes, por lo general son de naturaleza sintética en su mayoría (Baquerizo-Crespo et al., 2021). Los coagulantes sintéticos tales como sales y polímeros aluminizados logran una excelente efectividad en la remoción de la turbidez, pero presentan limitaciones debido a su baja estabilidad química como; la toxicidad de sus residuos debido a la presencia de metales pesados, además en medios acuosos el aluminio es soluble, dicha disolución es nociva tanto al consumidor y el proceso post - clarificación (Kalibbala et al., 2023), la generación de enormes volúmenes de lodos generados, las cuales no son biodegradables, ocasionado problemas de contaminación por su compleja disposición final (Loor-Moreira et al., 2021).

Los coagulantes naturales son polímeros de origen natural, animal o microbiano, estos garantizan su biodegradabilidad de residuos y menor toxicidad (Miyashiro et al., 2021). Los coagulantes naturales gozan de una amplia aceptación debido a su abundancia en el medio, como su obtención. Los coagulantes naturales más estudiados son la *Moringa Oleífera* y Cactus *Opuntia* que se caracterizan por poseer grandes cantidades de cadenas poliméricas con un alto peso molecular (proteínas y polisacáridos) (Choudhary et al., 2019; Gandiwa et al., 2020).

El uso de un coagulante natural ha demostrado ser eficiente para el tratamiento de aguas superficiales destinadas para el consumo humano; sin embargo, su implementación en el sector sur del Perú es casi nula, enfrenta desafíos tanto para la obtención de materia prima como la optimización del proceso. Es necesario considerar una búsqueda de un método sostenible, con la finalidad de reducir costos y reciclar los desechos generados con avance a una economía circular en beneficio a su población.

Por tales motivos, este estudio tiene como objetivo principal evaluar el uso de la semilla de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como coagulante orgánico natural para el tratamiento de agua potable bajo la normativa nacional vigente.





CAPÍTULO I.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

El sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, son especies químicas utilizadas comúnmente durante el tratamiento convencional de coagulación floculación, estos químicos son de uso comercial y masivo a nivel mundial debido a su efectividad; sin embargo, el uso excesivo de estos productos genera dos problemáticas comprometedoras a la salud del consumidor y al ambiente; tales como, la generación de aluminio residual. Sousa Ribau Teixeira (2020), indican que el exceso de este metal es potencialmente peligroso para la salud humana entre los efectos colaterales se incluyen la anemia, daños renales y demás afecciones a la salud. Así mismo, Fernandes et al. (2020) explican acerca de la acumulación de aluminio en el cerebro, se ha demostrado que causa neurotoxicidad clínica, la cual interfiere en el sistema nervioso central, generando daño a sus células nerviosas e interfiriendo en sus funciones, en consecuencia, generando enfermedades neurodegenerativas y favorece al envejecimiento neuronal. Esta situación genera una preocupación epidemiológica a nivel mundial, Sanajou et al. (2023) consideran que la exposición del consumidor y la absorción del Al se realiza a través del tracto gastrointestinal, donde se espera el aumento de incidentes de enfermedades como el Alzheimer, Parkinson entre otras.

La demanda por recursos hídrico en el Perú es una problemática nacional, a causa del crecimiento demográfico y por las actividades antropogénicas. Según Hernández-Vasquez et al. (2021), el 89.1 % de la población en el Perú accede al agua para el consumo humano, sin embargo, sólo el 59.9 % puede acceder las 24 horas a este recurso, debido a la sobrecarga del sistema y el abastecimiento de estas. Sólo el 2.5 % de agua es consumible. Es por ello que las plantas de tratamiento de agua potable en el Perú exigen cada vez una mayor

producción con una eficiencia mayor Hernández-Vásquez et al. (2023). En la actualidad la calidad de agua potable está en riesgo, en vista del consumo masivo conlleva al incremento en el uso componentes químicos que son característicos de nuestras plantas (PTAP). La generación de lodos residuales, contienen grandes cantidades de Al y Fe en su composición, obligando a las empresas a utilizar recursos económicos adicionales para una adecuada disposición final (Espinoza-Guillen et al., 2024). Generando un suministro inadecuado tanto a la salud del consumidor como al medio ambiente

En la región de Arequipa, la población y el consumo de agua potable viene en ascenso para la cual las empresas responsables encargadas de brindar dicho servicio presentan las mismas dificultades en cuanto a la generación de lodos residuales, conociendo ya estos casos problemáticos a la salud opta por la contratación de empresas terciarias para su disposición final, sin embargo la producción de lodos es irregular, debido a la variación de la turbidez, como demás parámetros fisicoquímicos y las condiciones meteorológicas que conlleva una inquietud en la dosificación correcta y el cumplimiento de sus parámetros óptimos para el consumo humano (Alcama, 2019). Es por lo que buscar fuentes naturales, que reemplacen a dichos coagulantes químicos, es fundamental para el bienestar humano como medioambiental, en busca de potenciar un tratamiento tan eficaz y representativos a la normativa nacional vigente. Optando por la sostenibilidad del tratamiento de aguas y garantizar logros dentro de las ODS.

1.2. Justificación

1.2.1. Justificación ambiental

Desde una perspectiva ambiental, Megersa et al. (2019) afirman que el uso de coagulantes naturales genera una alternativa sostenible, dado que se hace uso de materia prima renovable. En actualidad la Tara es una especie oriunda de la zona altoandina del Perú, con gran presencia predominante en la sierra peruana. Dentro del proceso de coagulación-floculación se generan lodos ecológicos y de fácil biodegradabilidad. Además de ello el uso de coagulantes naturales considera la seguridad ambiental, Mohamed Noor y Ngadi (2024) dentro de su investigación presentan un resumen detallado sobre el daño y riesgo a ecosistemas acuáticos sensibles, haciendo uso de coagulantes naturales donde la posibilidad de acumulación de sustancias nocivas por presencia materia orgánica presenta una toxicidad significativamente menor en los organismos presentes, complementando con su capacidad para degradarse naturalmente, presentando un gran potencial sin generar daños al medio ambiente si se compara con coagulantes químicos utilizados, logrando de esta forma el cumplimiento de las ODS 6 y ODS 11, minimizando materiales peligrosos y contribuyendo a la sostenibilidad y seguridad en la comunidad.

1.2.2. Justificación social

Esta investigación permite brindar calidad de vida al consumidor, proporciona agua potable con características óptimas para su consumo, Loor-Moreira et al. (2021) mencionan que reducir parámetros fisicoquímicos mediante coagulantes naturales, fortalece una medida preventiva, garantizando mejoras en la salud e inclusive reduciendo pérdidas humanas, así mismo albergaría de forma expansiva sistemas de potabilización a comunidades que carecen

de este recurso, favoreciendo así a las ODS 3, ODS 6 y ODS 11, fomentando desarrollo inclusivo en zonas rurales.

1.2.3. Justificación económica

Ang & Mohammad (2020) dentro de su investigación mencionan la necesidad de innovar procesos en el sector empresarial, utilizando coagulantes naturales para lograr elevar la productividad mediante la diversificación e innovación, donde los costos por adquisición son evidentemente menores en comparación a los químicos usados. El uso de estos coagulantes incentiva el crecimiento económico en comunidades locales rurales para su producción y expansión a lo largo del territorio peruano. Así mismo, genera agua de calidad, reduce los gastos médicos y tratamientos, combinando prácticas innovadoras y sostenibles, promoviendo la economía circular según informa la ODS 8.

1.2.4. Justificación tecnológica

Esta investigación brinda tecnologías innovadoras que impulsa el desarrollo industrial y social, es por ello Abderrezzaq et al. (2024) mencionan que el proceso unitario de coagulación-floculación mediante el uso de coagulantes naturales ofrece una alta eficiencia en la remoción de estos parámetros fisicoquímicos, representado innovación en las prácticas industriales convencionales y disminuyendo la dependencia de productos químicos, haciendo hincapié en el eficiente uso de los recursos naturales y modernizando la industria según la ODS 9 y ODS 11.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo general*

Evaluar el uso de la semilla de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como coagulante orgánico natural para el tratamiento de agua potable en muestras sintéticas de mediana y alta turbidez.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Caracterizar muestras de agua del río Chili de la toma de aducción mediante la determinación de parámetros de turbidez y pH con la finalidad de identificar las características de la muestra sintética a preparar.
- Analizar las muestras de la semilla de Tara mediante la determinación de parámetros tales como: contenido de humedad, conductividad eléctrica, pH, aminoácidos, lípidos e identificación de grupos funcionales.
- Establecer variables tales como pH, dosis, velocidad de agitación, tiempo de agitación y turbidez sobre la aplicación del coagulante natural en pruebas de Jarras a muestras sintéticas.
- Evaluar la eficiencia de la semilla de Tara como coagulante natural para la remoción de turbidez, sólidos suspendidos totales y su comparación con sulfato de aluminio en muestras sintéticas y muestras reales provenientes del río Chili.

1.4. Hipótesis

Dado que la semilla de Tara (*Caesalpinia spinosa*) posee un alto porcentaje proteico, es probable que pueda ser utilizada como coagulante orgánico natural de alta eficiencia para remover turbidez en agua de muestras sintéticas y fuentes naturales para consumo humano.



CAPÍTULO II.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Baquerizo-Crespo et al. (2021), la investigación titulada “Biocoagulantes como alternativa para el tratamiento del agua”, enfatiza los problemas relacionados con la calidad de agua, en búsqueda de una alternativa con métodos convencionales ya existentes. Se analizaron aspectos relacionados a su aplicación y su producción de biocoagulantes, donde el estudio hace uso de *Moringa oleífera*, *Caesalpinia spinosa* y la mezcla entre ambas, se evaluaron la remoción de turbidez y demás variables en comparación al uso de sulfato de aluminio, donde el procedimiento para su elaboración consiste desde su extracción hasta la pulverización, con la adición de sales inorgánicas tales como la NaCl 1M, con cada mezcla se realizó una agitación mediante el equipo (Test de Jarras) y finalmente en reposo en un promedio de 30 min/h obteniendo resultados mayores al 70 % de remoción. Se concluyó que el desempeño de ambas es viable, identificando una producción potencial de lodos biodegradables que destacan aspectos ambientales, técnicos, económicos y ambientales para su aplicación a gran escala.

Kalibbala et al. (2023), en la investigación conjunta denominada “Síntesis y eficacia del compuesto de cáscaras de cactus y plátano como coagulante natural para el tratamiento de aguas”, planteo evaluar coagulantes naturales en condiciones de bajo costo de producción y una elevada remoción, para lo cual el estudio evaluó el rendimiento del compuesto de las cáscaras de cactus y plátano. Se determinó la relación de mezcla óptima considerando las variables pH y tiempo de extracción, evaluando la eficiencia de eliminación de turbidez, sólidos disueltos totales (SDT) y *Escherichia coli* (*E.coli*), donde la composición óptima del compuesto fue la relación cactus: plátano de 0.62:0.38. Adicionalmente, las variables

mencionadas se optimizaron obteniendo como resultado una dosis de 12.25 mL/L, en un tiempo entre (7.31 y 26.53) min respectivamente. La eficiencia de remoción de turbidez, SDT y *E.coli* fueron (87.13, 82.15 y 84.02) % respectivamente. Por lo tanto, se concluyó que el desempeño del coagulante compuesto para el tratamiento de aguas era eficaz en comparación con el sulfato de aluminio.

Gandiwa et al. (2020), en su investigación titulada “Optimización de uso de una mezcla de coagulantes naturales y sintéticos de origen vegetal y sintéticos de origen vegetal para el tratamiento del agua: (mezcla de *Moringa oleífera* - cactus opuntia - alumbre)”, evaluaron la efectividad de la mezcla de coagulantes naturales comparado con un coagulante sintético, donde se evaluó su efectividad mediante los parámetros de: turbidez, pH, conductividad eléctrica y alcalinidad total, para lo cual se utilizó el software de Minitab. El agua resultante demostró que el modelo de análisis fue suficiente reduciendo turbidez, pH, conductividad y alcalinidad total con valores de 2.7 NTU, 6.99 unidades, 308 uS/cm y 1377,7 mg CaCO₃/L respectivamente. En conclusión, la investigación resalta eficiencia y la optimización dentro de sus procesos, además de cumplir con los parámetros fisicoquímicos que se encuentran dentro de las directrices de la OMS. La combinación del sulfato de aluminio con coagulantes naturales para el tratamiento de aguas crudas resultó ser exitosa.

Manda et al. (2016), en su estudio titulado “Evaluación comparativa del tratamiento de agua mediante coagulantes poliméricos e inorgánicos”, plantean la eficiencia de los coagulantes naturales en la reducción de turbidez, para lo cual enfatizan en el uso de los polímeros “sulfloc 3850” y “algasfloc 19s” en lugar del alumbre, fue determinante su remoción utilizando diferentes muestras de agua de plantas de tratamientos, siendo más eficiente el “Algasfloc 19s”, con una remoción de hasta un 98.66 %; así mismo, el pH no se alteró en todo el proceso, obteniendo rangos entre (7.20-7.80) unidades de pH y su

sedimentación fue rápida comparada con el alumbre. Se concluyó que el “Algasfloc19s”, requiere una dosis 10 veces menor que el alumbre, por lo que los coagulantes poliméricos poseen una acción sinérgica mayor que el alumbre, dependiendo al tipo de efluente de agua.

Miyashiro et al. (2021), llevaron a cabo la investigación titulada “Síntesis y evaluación del desempeño de un biocoagulante magnético en la remoción del colorante reactivo negro 5 en medio acuoso”, se plantea la mezcla en diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) y extracto de *Moringa oleifera*, las cuales fueron probados en diferentes concentraciones para la remoción de color aparente y la concentración de RB₅, donde se obtuvieron remociones entre (93.7 y 96.2) %, después de 20 min de sedimentación magnética. El modelo fue considerado con un nivel de confianza del 95 %. Además, en el proceso se observó un potencial para la eliminación de otros parámetros en el tratamiento de aguas residuales. Se concluyó que el desempeño del coagulante orgánico fue de alta eficiencia, su preparación rápida y uso simple fue beneficioso tanto para el medio y el operador.

Loor-Moreira et al. (2021), dentro de su investigación titulada “Generalidades del proceso de coagulación-floculación: una perspectiva sobre los biocoagulantes”, reportaron el desarrollo social e industrial, donde el proceso fundamental para la reducción de partículas coloidales conlleva una alta producción de lodos no biodegradables, los cuales contienen elementos nocivos para los ecosistemas. Se evaluó una serie de coagulantes naturales, donde los valores como las variables como temperatura, pH, composición del agua entre otros, interactúan con la variable de respuesta la formación de flóculos y sedimentación. Se concluyó que el estudio descriptivo realizado demuestra sustentabilidad, bajo costo y sin afecciones al ecosistema.

Yimer Dame (2021), en su estudio titulado “Extracto de semilla de papaya como coagulante para el tratamiento de agua potable en el caso del río Tulte, para la comunidad del distrito de Yekuset Etiopia”, enfatiza la efectividad del extracto de semilla de papaya para la eliminación de turbidez y los coliformes totales en agua cruda, para lo cual se llevó una serie de experimentos través de semillas de papaya de la localidad, el trabajo se desarrolló bajo 3 metodologías, mediante el extracto crudo acuoso, extracto crudo de sal y extracto de sal desgrasada. Para el tratamiento se tomaron en consideración parámetros tales como; pH, dosis y el tiempo de mezcla para niveles de mediana y alta turbidez, donde las 3 metodologías utilizadas dieron mejores resultados con una dosis de 20 mL en condiciones acida (pH= 6) y un tiempo de 60 min de agitación. Se concluyó que este hallazgo es de carácter potencial al usar la semilla de papaya como coagulante, la metodología de extracto de sal desgrasada obtuvo mejores % de remoción de turbidez, con un residual de turbidez de 4.25 NTU y resultados mayores al 90 % de remoción en los demás parámetros.

Valeriano-Mamani et al. (2019), en su investigación titulada “Influencia de la goma de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como ayudante en el Proceso de Coagulación – Floculación para la remoción de turbidez de una suspensión artificial de bentonita”, determinó la influencia de la goma de Tara, como un coadyuvante en el proceso de floculación-coagulación, para la remoción de turbidez artificial con la coagulante de bentonita, se utilizó diferentes metodológicas variando velocidades de agitación y turbidez , para lo cual se utilizó una serie de diferentes concentraciones o dosis, optimizando el uso del coagulante sintético y el coadyuvante natural, los resultados obtenidos demostraron sinergia, ayudando a reducir aún más la turbidez residual, con el apoyo del coadyuvante de (1.09 a 0.40) NTU en muestras de 400 NTU. Para muestras con turbidez inicial a 30 NTU se obtuvo una turbidez residual de (0.40 y 0.32) NTU. Se concluyó que la adición de coadyuvante natural en el proceso de

coagulación-floculación mejora la remoción de turbidez residual en un 93.3 % en el caso de 400 NTU y un 56 % en el caso de 30 NTU.

Megersa et al. (2019), el trabajo titulado “Efecto de las soluciones salinas sobre el rendimiento de la coagulación de *Moringa stenopetala* y *Maerua subcordata* para el tratamiento de aguas turbias” utilizaron soluciones salinas, a partir de NaCl, NH₄Cl y KNO₃ en diferentes concentraciones, a partir de una suspensión de arcilla de caolín, donde la eficiencia de remoción fue efectiva con dosis de (2 y 4) ug/mL respectivamente, utilizando (0.5 y 1.5) M de sales de NaCl y NH₄CL. Los extractos tanto para la *Moringa stenopetala* como para la *Maerua subcordata*, presentaron una eficiencia similar al alumbre, eliminando casi el 95 % de turbidez. En conclusión, la optimización del proceso coagulación-floculación utilizando *Moringa stenopetala* y *Maerua subcordata*, con sales orgánicas es una tecnología que puede ser utilizada a mayor escala.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Fuentes naturales

- Agua

El agua es reconocida como un recursos único e indiscutible, la cual tiene una capacidad limitada, es un elemento fundamental para el desarrollo, producción y supervivencia sostenible, en temas relacionados a la energía, alimentos, salud, economía y demás (Onu et al., 2017).

- Agua Superficial

El agua superficial hace referencia a la superficie, tales como lagos, ríos, embalses y océanos. Estas en la mayoría provienen por medios de drenaje, precipitaciones, deshielo. El

agua superficial, constituye un componente esencial del ciclo hidrogeológico. Según Salvioli et al. (2012), está condicionada por varios conjuntos de procesos naturales y actividades antropogénicas jugando un papel crucial para los ecosistemas abastecimiento y su disponibilidad.

2.2.2. Métodos para la Potabilización

- Método Físicos

Estos métodos se basan en principios físicos para la remoción de partículas, dentro de los cuales se tiene la sedimentación, filtración por membranas y adsorción, estos son utilizados para la remoción de impurezas y contaminantes mejorando la claridad y calidad física del agua (Campos et al., 2018).

- Métodos Químicos

Son aquellos procesos que agrupan y eliminan patógenos presentes en el agua alterando los procesos metabólicos de los microorganismos, entre los más convencionales se tiene la coagulación-floculación, procesos oxidativos, electroquímicos y desinfección catalítica (Rodríguez et al., 2020).

- Métodos Biológicos

Estos métodos son de uso poco convencional, hace uso de microorganismos que degradan la materia orgánica disuelta y reduce los contaminantes a través de rutas metabólicas naturales (digestión anaeróbica-aeróbica, biodegradación microbiana, fitorremediación) (Pagés-Díaz et al., 2018; Urbaniak et al., 2020).

2.2.3. Mecanismos de Coagulación

- Mecanismo de comprensión de la doble capa

Las altas concentraciones de electrolitos en una solución dan lugar a concentraciones en la capa difusa. Duan et al. (2009) indican que la comprensión de la doble capa eléctrica alrededor de las partículas coloidales (partículas pequeñas de carga similar), poseen una capa de iones cargados que impiden su aglomeración, por lo que la capa se comprimirá hasta tal punto que la barrera de energía repulsiva se reduzca. Contribuyendo a la unión de las moléculas y la formación de flóculos.

- ***Mecanismo de barrido***

La concentración del coagulante es primordial, el mecanismo de barrido en los coagulantes, forman los precipitados que capturan y barren las partículas a medida que se depositan y son atrapadas en estos precipitados. Mientras se forman los precipitados, las partículas coloidales se enredan y tienden a crecer generando la eliminación de la suspensión coloidal (Duan & Gregory, 2003).

- ***Mecanismo de neutralización de la carga***

Implica la adsorción del coagulante con carga opuesta hacia la superficie coloidal. El coagulante posee una carga catiónica positiva, la cual neutraliza la carga superficial del agua, donde las partículas coloidales son comúnmente negativas, al perder su carga se desestabilizan las partículas coloidales. La desestabilización podría ocurrir debido a una inversión de cargas que desencadena el exceso de contracciones (Saleem & Bachmann, 2019).

- ***Mecanismo de puentes de polímeros***

La capacidad de polímeros de alto peso molecular como los polielectrolitos se adhieren a la superficie coloidal y actúan como puentes que conectan partículas dispersas entre sí promoviendo la desestabilización de partículas coloidales. Para una desestabilización efectiva, el biopolímero deberá contener cadenas químicas que interactúen partícula-

polímero-partícula formando cadenas complejas, sin embargo dichos puentes pueden llegar a separarse debido a un constante movimiento (Cui et al., 2024).

2.2.4. Tara (*Caesalpinia spinosa*)

- Origen

La Tara, cuyo nombre científico es (*Caesalpinia spinosa*), es una especie forestal, leguminosa, no maderable, ampliamente distribuida en Perú, Bolivia y Ecuador (Lazo et al., 2010). Es una especie oriunda de regiones andinas, a pesar de su predominancia de la *Caesalpinia spinosa* en el Perú. Esta es una especie de origen desconocida, según Cardenas (1989), su origen se ubica en nueva granada, sector que comprendía Colombia, Venezuela, Panamá, Guayana y Ecuador, también se afirmaba que es nativa de América Tropical. Sin embargo; Alvarado Ojeda et al. (2012), realizaron un estudio de su origen en la industria de Tintes en Chile, donde sugirieron que lo más probable es que la planta fuese introducida desde Argentina o Perú antes de la época incaica. Finalmente, Velásquez y Seminario (2021) reunió fuentes lingüísticas, biológicas e históricas de la *Caesalpinia spinosa* indicando que esta especie se encuentra en proceso de domesticación y su centro de domesticación se ubica en la costa del Perú”, debido a que existe una gran cantidad de evidencias de sus usos y aplicaciones, es posible encontrarla en su estado silvestre y en 4 estados intermedios (manejada, fomentada, cultivada, silvestre-manejable). A pesar de que su selección se ha intensificado por sus cultivos y comercialización.

- Taxonomía Botánica

La evidencia biología y taxonómica indican que la Tara (*Caesalpinia spinosa*) procede del Aimara, como una leguminosa fijadora de nitrógeno (Dostert et al., 2009). Su clasificación taxonómica se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1.

Clasificación Taxonómica de la Caesalpinia spinosa.

CATEGORIAS	
Reino	<i>plantae</i>
Subreino	<i>tracheobionta</i>
Super division	<i>spermatohyta</i>
Division	<i>manoliophyta</i>
Clase	<i>magnoliopsida</i>
Subclase	<i>rosidae</i>
Orden	<i>fabales</i>
Familia	<i>fabaceae</i>
Subfamilia	<i>cesalpinoidea</i>
Genero	<i>caesalpinia l.</i>
Especie	<i>Caesalpinia spinosa</i>

Nota. *Adaptado de datos del United States Department of Agriculture (2018).*

Según Villena Velásquez et al. (2019), sugieren que su etimología proviene del botánico italiano Andrea Cesalpino y su epíteto latino significa (con espinas) de *Caesalpinia spinosa* y su sinónimo sería el *Caesalpinia tinctoria*.

- **Caracterización Botánica**

Este arbusto generalmente posee de (5-8) m de altura, con un diámetro de (20-25) cm, su tronco es espinoso y a veces torcido, la *Caesalpinia spinosa* tiene una corteza gris, la

cual se ramifica en los ejes foliosos y espinosos, donde la mayoría de sus ejes se ramifican desde la base de su tronco sus hojas son de color verde oscuro, lisas de hasta unos 10 cm de largo, sus ramas son lustrosas, de un color pardo con espinas de unos (3-7) cm, poseen flores de color amarillo entre (8-15) cm de largo y un aproximado de 100 flores por arbusto, los tiempos convencionales de florecimientos andino son setiembre-enero o lugares con características climatológicas cálidas de enero-marzo. Esta especie no exige mucho suelo y manejo (Martel et al., 2014).

En el estudio realizado por Lapa (2004), sus frutos producidos por esta especie son vainas explanadas de color rojizo-amarillos entre (5-15) cm de largo, aunque es muy variable según la calidad de este y su procedencia, sus semillas son ovoides, con la singularidad de un aparente aplanado, de un color pardo-oscuro, son de singularidad brillantes de gran dureza ,en cada vaina se llega a encontrar en un promedio de (4 a 7) semillas con un aproximado de (0.6-0.7) cm. Cada árbol de Tara maduro puede rendir un promedio de (20-40) Kg dependiendo la estación de la cosecha.

La estructura de la semilla se compone de 3 componentes según Tabla 2.

Tabla 2.

Estructura de la Caesalpinia spinosa.

Composición	Descripción	Proporción
Testa	Cubierta de la semilla, comúnmente llamado cascara y se forma a partir del tegumento. Presenta compuestos lignificados que le brinda rigidez y	(37-39.5) %

	<p>polisacáridos estructurales que forman parte de las paredes celulares.</p>
Endospermo	<p>Este varía significativamente, su (27-28) % cantidad, compuesta por polisacáridos, en el cual se destaca a los galactomananos.</p>
Embrión	<p>Joven esporofito, el cual se desarrolla (26-25) % en la etapa de germinación, este compuesto de varios tejidos y estructuras, en el cual prevalece más aun los cotiledones, órganos de reserva que contiene como nutrientes como proteínas y almidón.</p>

Nota. Adaptado de Basurto (2010).

- *Proteínas presentes en la *Caesalpinia spinosa**

El estudio realizado por Basurto (2010), se determinó que, en 100 g de muestra de semilla de Tara, se encontró la mayor cantidad de proteínas en un 40 % en el germen de Tara, los demás compuestos no presentaron mayor porcentaje de proteínas. La *Caesalpinia spinosa*, es del orden fabaceae familia de las leguminosas, la cual se caracteriza por las globulinas, teniendo dos clases principales de proteínas, designadas como leguminas y vicilinas. El perfil de proteínas es muy similar a las arvejas y frijoles del campo, las globulinas

11s en geles reductores poseen subunidades entre (21-24) kDa y una banda en 40 kDa las cuales representan la subunidad ácida (Nikolić et al., 2012).

Las globulinas se clasifican en base a su coeficiente de sedimentación en gradiente de sacarosa tales como: 7s (7s-8s) o tipo-vicilina y 11s (11s-13s) o tipo-leguminosa. Las globulinas 11s se forman a partir de un enlace disulfuro, acompañado por un corte de polipéptido con proteasas específicas, las globulinas 7s (glicosiladas), ambos grupos presentan diferente estructura (Zhang & Dee, 2023).

La globulina 11s conocida como proteína de reserva, está compuesta por varias subunidades, su capacidad de formar puentes de hidrogeno y su interacción hidrofóbica, la presencia de aminoácidos cargados y polares como la lisina, arginina, ácido aspártico, ácido glutámico, permiten la interacción de partículas contribuyendo a la capacidad de aglomeración y floculación (Li et al., 2024).

- *Distribución Geográfica*

La Tara es una especie que se distribuye a nivel mundial, con predominancia en las regiones como son Perú, Ecuador, Bolivia, Chile, así mismo como en la vertiente occidental de los Andes interandinos y fue introducida en países como Cuba, Estados Unidos, Brasil, Argentina del norte (Villena Velásquez et al., 2019). Estudios como los de Velásquez Seminario (2021), reportaron que fue introducida y cultivada en el norte de África, India, España, Australia, Nueva Zelanda e Marruecos.

En el Perú la distribución de la Tara es extensa expandiéndose a lo largo de toda la costa desde Piura, hasta Tumbes y en los departamentos de la sierra como Cajamarca, Ancash, Huancavelica, Pasco, Junín, Cusco e inclusive en zonas de la selva peruana como Madre de Dios (Lapa, 2004). En el pasado la especie también se encontraba en las lomas de Lima. Climatológicamente el área de distribución se extiende desde templado templado-cálido-

seco, hasta un clima tropical, desde los (1000 – 2600) msnm (Chambi et al., 2013). Actualmente la especie *Caesalpinia spinosa* está distribuida en poblaciones naturales en casi 17 departamentos del Perú (Silvestre, 2020).

- *Usos y Aplicaciones*

La Tara es un árbol cuyas vainas, semillas y corteza son extraídas para uso en una serie de productos, la importancia de las vainas, que aporta grandes cantidades de taninos, utilizados en la industria de curtiembre, tintorería, medicina, fabricaciones de adhesivos, protección de plásticos y demás usos las semillas usadas por la industria alimenticia de la goma y la corteza utilizada en el sector salud en la evaluación de efectos inhibidores (Martel et al., 2014).

La goma de Tara, es el producto más exportado a partir de procedimientos convencionales en la semilla, a nivel internacional son utilizados en la industria alimentaria como estabilizantes y espesantes de origen natural como son los yogurts, helados entre demás productos (Melo Ferrari et al., 2013). Por otro lado, según Callohuari et al. (2017), reportaron que su aplicación combate tumores cancerosos. Finalmente, según el estudio realizado por Valeriano-Mamani et al. (2019), la goma ayuda a remover turbidez en una suspensión artificial de bentonita.

- *Estado Actual*

El Perú presenta los bosques más antiguos de Tara, sin embargo el estado de conservación es vulnerable en algunas de sus variedades, se calcula de por lo menos las 40 variedades en Sudamérica, 28 se encuentran reportadas en Perú (Ulibarri, 2008). Los principales departamentos del Perú con mayor variedad y producción son Cajamarca, Ayacucho, La libertad. Donde Cajamarca presenta 9 variedades y 5 en Ayacucho (Villena Velásquez et al., 2019). Perú es considerado el primer productor a nivel sudamericano

exportador, con un aproximado al 80 %, para muchos productores es una gran oportunidad de eco-negocios en el país (Riego, 2019). Adicional a ello Vargas Oviedo (2016), realizó un estudio sobre la rentabilidad del producto a corto y largo plazo con proyectos con el apoyo del Ministerio de Agricultura, GORES, productores asociados y el consejo nacional de la Tara (CONATARA), con la finalidad de establecer plantaciones a nivel regional y consolidar el sistema productivo.

2.2.5. Impacto Ambiental

- Ecotoxicidad

Según Ouyang et al. (2022), definen el termino como la capacidad de un agente contaminante para inducir efectos adversos en distintos organismos que habitan el ambiente, provocando cambios en procesos enzimáticos y su integridad celular alterando su estructura y funcionamiento. La ecotoxicidad está condicionada entre agente y el medio ambiente, donde los factores como el pH y su composición química modelan el daño. Esta disciplina estudia los efectos tóxicos de sustancias químicas y físicos en los organismos, teniendo en consideración interacciones y efectos. Rosenbaum (2015), menciona que este campo combina la ecología y toxicología para la evaluación los riesgos ambientales y la biodiversidad frente a contaminantes emergentes en busca de estrategias de mitigación.

- Biodegradabilidad

Es la capacidad de un compuesto químico a descomponerse en elementos más simples, a través de procesos biológicos realizados por microorganismos. Zumstein et al. (2022), indican que el proceso de biodegradabilidad depende de las condiciones ambientales y la estructura química del compuesto.

- Toxicidad aguda

Es considerado un parámetro clave en la evaluación de los posibles impactos ambientales de sustancias químicas en organismos vivos. Según la investigación de Michelin et al. (2021), definen a la toxicidad agua como aquellos efectos adversos que una sustancia química u orgánica causada a un organismo tras una exposición breve, generalmente en un promedio de (24 a 96) h, puede incluir la mortalidad o cambios fisiológicos severos que se manifiestan en contacto en la exposición inicial.

- ***Toxicidad crónica***

La toxicidad crónica evalúa los efectos adversos que resultan de exposiciones prolongadas, Farkhondeh et al. (2021) mencionan que las dosis son por lo general bajas; sin embargo el periodo de exposición genera efectos graduales y persistentes.

2.2.6. Sistemas Coloidales

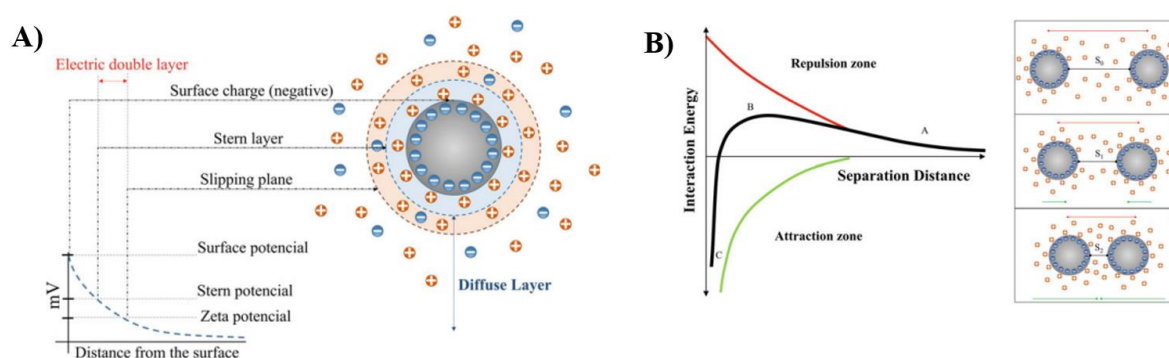
- ***Partículas Coloidales***

Las aguas superficiales son medios de dispersión de diversas sustancias, partículas y macromoléculas. Las partículas llamadas coloides, son las que mantienen su estado disperso debido a una serie de fuerzas con la interacción solido-liquido, las partículas en suspensión tienen un tamaño aproximado de (0.001-10) μm , las cuales tienen tasas bajas de sedimentación debido a las interacciones con otras partículas de cargas superficiales iguales (Bratby, 2016). Las partículas coloidales mediante la teoría de Derjaguin, Landau Verwey y Overbeek (DLVO), plantea la estabilidad de los sistemas coloidales en función de la interacción entre las fuerzas de repulsión electrostática y las fuerzas de Van de Waals, las cuales controlan las interacciones entre las partículas coloidales, determinando si se atraen o se repelen (Figura 1). Una partícula coloidal cargadas tiene cargas negativas generando una

capa difusa, lo que provoca interacciones atractivas con partículas de carga positiva generando así un potencial eléctrico (Lebovka, 2014).

Figura 1.

Capa eléctrica e Interacción de una partícula Coloidal.



Nota. (a) Capa eléctrica y (b) Interacción (repulsión y atracción) de una partícula coloidal.

Adaptado de Loor-Moreira et al., 2021.

- **Potencial de Nernst**

En un sistema de dispersión se presenta cargas negativas, lo que provoca interacciones con partículas cargadas positivamente, existente en la superficie del coloide, describe el potencial eléctrico que se desarrolla en una interfase, refiriéndose a las fuerzas electromotrices que surgen como resultado de la diferencia en la concentración o en la superficie del coloide (Espinoza-Quiñones et al., 2020).

- **Doble capa eléctrica y capa de Stern**

Las partículas están rodeadas por una doble capa eléctrica (Figura 1), la cual consta de iones adsorbidos en la superficie (capa Stern) y una capa difusa de contraiones la cual rodea las partículas en el medio dispersante. Su espesor y la interacción de esta capa

determinan el comportamiento de atracción o repulsión de las partículas (Oyegbile et al., 2016).

- **Potencial zeta**

El potencial zeta es un indicador crítico de la estabilidad coloidal ya que representa el potencial en el plano del deslizamiento de las partículas donde a menor Potencial zeta mayor es la atracción entre partículas según (Figura 1), favoreciendo así a la floculación y su eventual sedimentación (López-Maldonado et al., 2014).

- **Atracción y Repulsión**

Las fuerzas de atracción y repulsión de los coloides se basan en el balance de las fuerzas de atracción (Van der Waals) y las fuerzas de repulsión electrostática. Cuando las fuerzas de repulsión (Figura 1), superan a las de atracción, estas partículas se mantienen dispersas y lo contrario se llegan a aglomerar. Así mismo la inclusión de los electrolitos puede ayudar a la desestabilización coloidal, reduciendo el potencial y favoreciendo la floculación (López-Maldonado et al., 2014).

- **Movimiento Browniano**

Esta es otra fuerza involucrada en las interacciones coloidales promoviendo las colisiones entre partículas la combinación de estos, donde los movimientos aleatorios y las fuerzas de interacción determina la eficiencia de floculación y el proceso de sedimentación (Obiora-Okafo et al., 2022).

2.3.Marco legal

La Ley N°32065, Acceso Universal al Agua Potable, tiene como objetivo establecer medidas destinadas al acceso universal al agua potable, teniendo como prioridad a las poblaciones vulnerable en condición de pobreza. La población peruana debe acceder a agua

potable mediante soluciones rápidas y efectivas, que garanticen proyectos de saneamiento continua a la marcha.

La Ley N°17752 – Ley General de Aguas, regula el uso, conservación y gestión de recursos naturales en el país. Aunque en la actualidad esta sea poco usada, en el marco legal es una de las pioneras que abarca la gestión de recursos hídricos en el Perú.

El Decreto Supremo N.º 031-2010, establecidos en la Ley N°26842, encargado de regular la calidad de agua para el consumo humano, la cual aborda los límites máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, los cuales son fundamentales para la garantía de potabilización y seguridad del consumo humano. Donde se especifica su unidad de medida y su LMP.

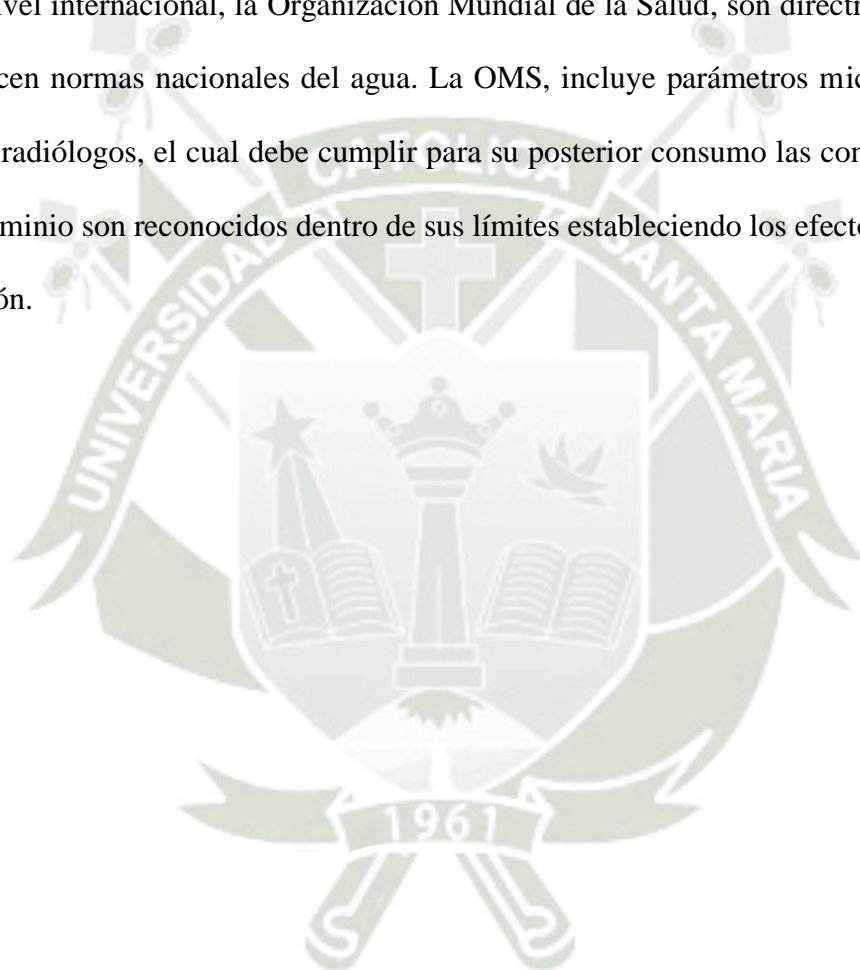
La Ley N°30588 - Reforma Constitucional que reconoce el Derecho de Acceso al Agua como Derecho Constitucional en el año 2017, esta reconoce que toda persona debe acceder de forma progresiva y universal al agua. Donde el estado garantiza y prioriza el acceso de agua para el consumo humano, promoviendo el uso adecuado y sostenible al interés público.

La Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), es la entidad encargada de asegurar el cumplimiento de las obligaciones técnicas y legales de las entidades responsables de proveer agua para el consumo humano. Así mismo esta entidad es la encargada de imponer sanciones por incumplimiento, resolución conflictos entre usuarios y la empresa prestadora de servicios.

Digesa es la autoridad adscrita al misterio de salud, encargada de las directivas técnicas relacionadas a la calidad de agua potable y sus tratamientos relacionados. Sus directivas especifican los productos químicos permisibles en los procesos de potabilización.

La norma técnica peruana ISO 24512 del 2007 establece gestión pública potable, establece que los operadores prestadores del servicio de agua potable están obligados a aplicar tecnologías adecuadas, que garanticen la calidad del servicio, establecidos por los lineamientos sobre la eficiencia y seguridad de los productos empleados en el tratamiento de aguas.

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud, son directrices globales que establecen normas nacionales del agua. La OMS, incluye parámetros microbiológicos químicos y radiólogos, el cual debe cumplir para su posterior consumo las concentraciones tanto de aluminio son reconocidos dentro de sus límites estableciendo los efectos adversos a su exposición.





CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de Investigación

Esta investigación es de tipo aplicada, según Lozada (2014), quién señala que este tipo de investigación genera y adquiere conocimiento en base a los problemas que surgen entorno a la sociedad, para finalmente brindar soluciones la calidad de vida, por lo tanto esta investigación pretende resolver el problema de la dependencia de coagulantes sintéticos que afectan al medio ambiente. Así mismo, se encuentra en un nivel perceptual de alcance exploratorio, debido a que el objetivo es examinar la *Caesalpinia spinosa* como agente coagulante en cuerpos de agua superficial para el acceso de agua potable, un tema poco investigado en la provincia de Arequipa. La revisión bibliográfica es escasa con guías o bases no investigadas, característica de estudios exploratorios, según menciono Hernández Sampieri et al (2014).

3.2. Diseño de la Investigación

Según Lucio (2021), en el diseño experimental aplicado se manipuló con intención las variables independientes, esto con el fin de identificar efectos positivos y negativos del proceso de estudio, evaluando como respuesta la variable dependiente. En la presente investigación el diseño experimental se realizó bajo condiciones controladas, dentro del laboratorio de Ciencias de los Materiales - laboratorios de la UCSM, donde se identificaron las variables con mayor relevancia, estas fueron elegidas debido a su significancia dentro de las pruebas piloto en el proceso de coagulación - floculación, además de ello, las referencias bibliográficas respaldan su consideración.

3.2.1. Variables

Se inició con un diseño factorial TWO-LEVEL, este modelo es exploratorio, donde se logró identificar la importancia de las variables y sus interacciones (ver Tabla 3), con la finalidad de aprovechar al máximo el tiempo y recursos utilizados dentro de la etapa de evaluación.

- **Variable Independiente**

- pH
- Dosis de coagulante
- Velocidad de agitación
- Tiempo de agitación
- Nivel de turbidez

- **Variable Dependiente**

- Remoción de turbidez
- Remoción de sólidos suspendidos totales (SST)

Tabla 3.

Valores experimentales del diseño.

Contextualización	Variable	Indicadores	Instrumento	Unidad de Medida
Variab Independientes	pH	Rango de pH	Potenciómetro	Unidad de pH
	Dosis de Coagulante	Cantidad de Coagulante	Micropipeta	mL

	Velocidad de Agitación	Revoluciones	RPM	RPM
	Tiempo de Agitación	Duración de Agitación	Temporizador	min
	Nivel de turbidez	Turbidez Inicial	NTU	NTU
	Remoción de Turbidez	Turbidez Final	Turbidímetro	%
Variables Dependientes			Estufa, equipo de filtración y balanza analítica (método gravimétrico)	g
	SST	Porcentaje de SST residual		

Los datos obtenidos fueron analizados utilizando el análisis de varianza (ANOVA), la cual ayudó a determinar la significancia y no significancia de cada factor y sus interacciones estadísticas, donde se evaluó los supuestos para garantizar la validez del análisis.

- *Análisis de Varianza*

Este método estadístico fue utilizado para la comparación de múltiples grupos de datos y su posterior determinación entre diferencias estadísticamente significativas. Según Kashlak et al (2023), esta técnica divide los datos de sus componentes permitiendo abortar la

hipótesis en diferentes grupos. Considerando un grado de confiabilidad al 95 %, se determinó la estimación del p-value, el cual debe poseer un valor superior o inferior 0.05, aceptando la hipótesis o rechazándola de acuerdo con los datos obtenidos.

- ***Hipótesis Nula (H_0)***

Existe al menos un nivel de los factores evaluados que genere diferencia significativa en la remoción de turbidez.

- ***Hipótesis Alternativa (H_1)***

Ocurre cuando no existen diferencias significativas en la remoción de turbidez entre los niveles de factores evaluados. Para poder aceptar la hipótesis nula se deberá seguir la siguiente condición ($p < 0.05$), donde exista al menos un factor que tenga impacto significativo en la remoción de turbidez, lo que indica que influye en la respuesta para la optimización del proceso.

Para poder rechazar la hipótesis nula se deberá seguir la siguiente condición ($p > 0.05$), donde el valor de p es mayor al nivel de significancia, lo que indica que no existe ningún factor que presente significancia en el proceso.

- ***Prueba de Normalidad***

Según Mishra et al.(2019), describe que dichas pruebas generadas por la diferencia entre los valores observados y predichos por el modelo (residuos) deben seguir una distribución normal, esta prueba ayudara al p-value dentro del ANOVA. Si el p-value > 0.05 , se sugiere que los datos no poseen una distribución correlacional, rechazando la hipótesis nula sugiriendo que los datos no se encuentran normalmente distribuidos.

- ***Prueba de Homogeneidad de Varianza***

Esta prueba ayuda a determinar si la diferencia entre los valores y los predichos por el modelo deben tener una varianza constante en todos los niveles de los factores, evitando

que los resultados sean inestables, evitando cometer un error y mejorar la confianza en los datos determinados, en caso de evidencia de heterocedasticidad (varianzas no constantes) se procede a cambiar de modelo o realizar nuevas transformaciones (Azizi et al., 2022).

- ***Independencia de los Residuos***

Saleem et al. (2022), mencionan que los residuos no deben estar correlacionados entre sí, demostrando que los coeficientes del modelo sean claves y los predichos viables. Evita sesgos en la estimación de los efectos de los factores la cual puede ser correlacionada mediante el gráfico de Residuos vs Corridas, donde si se evidencia correlación, siguen un patrón claro y la dispersión alrededor de la línea central alejada se sugiere cambiar de modelo o reestructurar el diseño.

Una vez identificados los factores significativos se procederá a realizar un Diseño Central Compuesto (CCD), cuya finalidad es optimizar y comprender más a detalle la naturaleza entre factores y respuestas. Todos los análisis fueron analizados con el software Design Expert, lo cual permitió ajustar a modelos no lineales con términos cuadráticos e interacciones. Generando gráficos de respuesta, facilitando la identificación de las condiciones óptimas para maximizar a la remoción de turbidez.

- ***Área de Estudio***

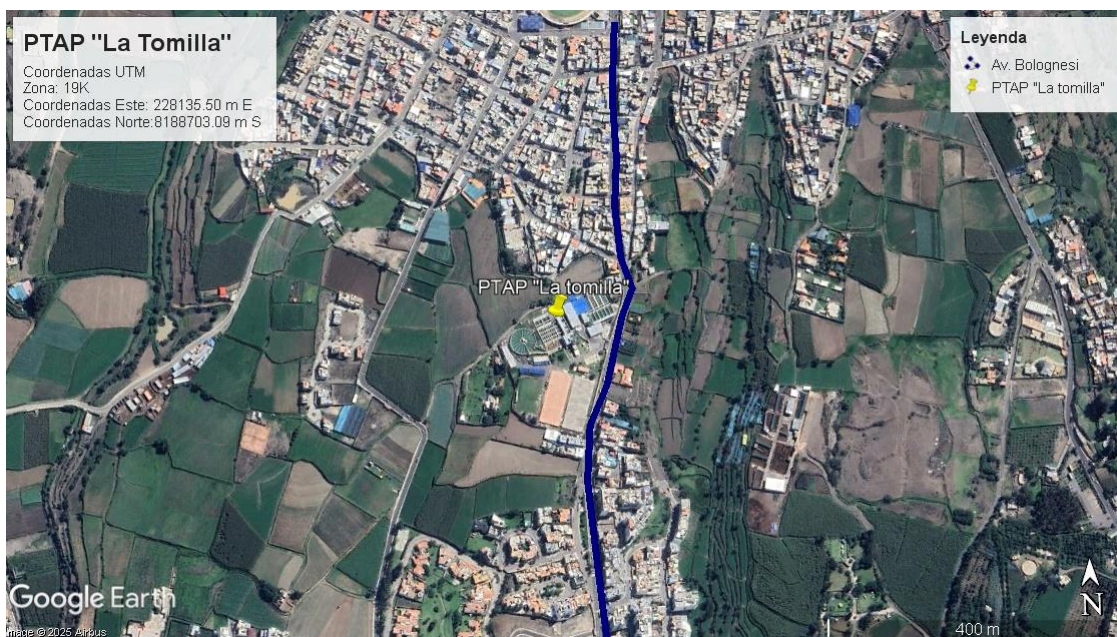
La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Ciencias de los Materiales (406) del pabellón F de la Universidad Católica Santa María en la provincia de Arequipa, Departamento de Arequipa, Perú.

- ***Selección de Muestra***

Las muestras recolectadas fueron obtenidas en los meses de febrero y noviembre, ubicado en la aducción de la EPS-PTAP “La Tomilla” - Arequipa (Imagen N°1); la cual se encuentra situada en las coordenadas geográficas detalladas en la Figura 2.

Figura 2.

Ubicación de la PTAP "La tomilla".



Nota. Google Earth.

3.3. Materiales y Equipos

3.3.1. Materiales

- Beakers
- Pipetas (10, 5 y 2) mL
- Molino para granos
- Papel filtro (15 μ m)
- Botellas de vidrio (100mL)
- Tamices (425, 300 y 250) μ m
- Fiolas (10, 50 y 100) mL
- Matraces (100, 250) mL

- Embudos (100mL)
- Espátulas
- Envases de 20 L
- Morderos de porcelana
- Bandeja de Aluminio
- Baguetas
- Crisoles
- Desecador de vidrio

3.3.2. *Materiales Biológicos*

- Semillas de Tara

3.3.3. *Insumos y Reactivos*

- Agua destilada
- Cloruro de Sodio 99.8 % (MERK)
- Sulfato de Aluminio (MERK)
- Caolín (MERK)
- Ácido Sulfúrico 37 % (MERK)
- Hidróxido de Sodio 1N (MERK)

3.3.4. *Equipos*

- Floculador Digital (VELP SCIENTIFICA-JLT 6)
- Estufa (BINDER-GmbH)
- Balanza Analítica (RADWAG-AS220.R2)
- Turbidímetro (HACH-TL2300)
- Potenciómetro (ISOLAB-pH)

- Conductímetro (ISOLAB-COND)
- Bomba al vacío (ISOLAB -21100631)
- Agitador Magnético (VWR 984VW4CH SEUS)
- Equipo Soxhelt
- FTIR (Summit Thermoscientific)
- Zetasizer Nano 90
- Destilador de agua con deposito (GF2 2004)
- Refrigerador “Oster OS-PMB 129WT”
- Microscopio electrónico de barrido (EVO 10MA CARL ZEISS)
- HPLC (VWR HITACHI CHROMASTER 5310)
- METTLER TOLEDO-HE73

3.3.5. *Software*

- Desing Expert
- Microsoft Office Excel
- Microsoft Office Word
- Google Earth
- Omnic
- Zetasizer Software

3.4. Métodos de Investigación

3.4.1. *Caracterización de muestras de agua del río Chili mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos.*

Se hicieron las colectas de agua en el mes de febrero y noviembre 2024, para evaluar los parámetros estudiados en diferentes temporadas, para ello se recolectaron un total de 6 L en cada muestra (Imagen N°2), las cuales se mantuvieron en refrigeración a 4°C. Las muestras de río chili fueron caracterizados después de la toma, teniendo en consideración los siguientes parámetros:

Tabla 4.

Parámetros fisicoquímicos analizados en la muestra de agua.

Parámetro	Método	Referencia
Turbidez	ASTM -D1889	ASTM Standars-
pH	ASTM-D1293	Section: Water I, II
Conductividad	ASTM-D1125	(2024).
SST		
SDT	ASTM- D5907-18	

3.4.2. *Caracterizar las muestras de la semilla de Tara mediante la determinación de parámetros tales como: densidad aparente, conductividad eléctrica, pH, aminoácidos, lípidos y la identificación de grupos funcionales.*

- *Lugar de procedencia.*

Para la obtención del coagulante se llevó a cabo la compra de semillas de un semillero local, las cuales tienen como origen natural el departamento de Ayacucho, siendo esta una de las principales zonas de producción del país (Imagen N°3).

- ***Extracción***

Se procedió a extraer las semillas de sus vainas, una vez obtenidas se realizó el lavado con hipoclorito de sodio al 10 % y luego con agua destilada con la finalidad de eliminar cualquier impureza después del lavado se llevó a secar a la estufa una vez secas se procedió a triturar dichas semillas con la ayuda de un molino, mediante una fuerza mecánica, una vez trituradas las semillas se procedió a separar el germen de Tara de su endospermo con la finalidad de extraer gran parte de este material (Imagen N°4).

- ***Contenido de humedad***

Para la determinación de humedad, se validó parte de la metodología descrita por Razvi et al. (2021). Para ello se procedió a utilizar el germen de Tara obtenido con la ayuda de un mortero hasta lograr un material en polvo. El análisis de humedad fue proporcionado por el Analizador de humedad METTLER TOLEDO-HE73, donde se pesó inicialmente 0.5 g de la muestra y esta será dirigida al platillo del instrumento. Seguidamente una vez obtenido dichos valores se llevó la misma muestra a la estufa durante 1 h a 105°C para la determinación de la humedad final, si este resultado llegó a variar o permaneció constante Imagen 5. Análisis de Humedad.

- ***Grupos Funcionales***

Para la determinación de grupos funcionales presente se utilizó guía de Thermo Fisher Scientific (2020), para lo cual se utilizó el FTIR (Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier) marca Thermo Scientific (Imagen 6). Se llevó a secar aproximadamente 1 g de muestra en polvo en la estufa durante 2h a 60°C. Una vez obtenido el polvo libre de humedad se almacenó en un desecador. Para la preparación de la pastilla de KBr, fue necesario pesar 50 mg de la sal (KBr) y 0.5 mg de la muestra, posteriormente se procedió a mezclar la sal con la muestra aplicando una compresión de 1.75 Tn de fuerza, la pastilla obtenida fue colocada en el holder del equipo e inmediatamente analizada a una longitud de onda entre (400 y 4000) cm^{-1} con 32 ciclos.

- ***Parámetros fisicoquímicos***

Para la determinación de pH y conductividad de la muestra, se siguió la metodología descrita en ASTM D4972. 5 g de la muestra en polvo fue pesada y disuelta en 50 mL de agua destilada, luego esta fue sometida a agitación constante durante 15 min, posteriormente se dejó por un lapso de 15 min de sedimentación, finalmente fue medido el pH y la conductividad eléctrica (Imagen 7).

- ***Caracterización Morfológica***

Para el estudio de la morfología de la superficie externa de la muestra (Germen de Tara), se realizó una Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) mediante un equipo modelo EVO 10MA CARL ZEISS con recubierta de oro-paladio, para lo cual fue necesario llevar la muestra en polvo al Laboratorio de Microscopia Electrónica de la UCSM.

- *Análisis del contenido de lípidos*

Para la determinación de contenido de lípidos presentes en la muestra del germen de tara, se validó la metodología descrita en Flory et al. (2024), para ello se utilizó un equipo de Soxhlet (Imagen 8). El análisis fue hecho por triplicado, pesando 3g de muestra de polvo de Tara y distribuida en masas de 1g aproximadamente en cada sobre de papel absorbente debidamente etiquetada y pesada (Tabla 5). Se colocó cada sobre dentro de la cámara de extracción, agregando 300 mL de hexano de alta pureza y una temperatura de 120 °C por un periodo de 8 h, una vez que terminó el proceso de extracción, se retiraron cuidadosamente los sobres con la muestra a una campana de extracción con la ayuda de unas pinzas, luego de 24 h dentro en la campana se procedió a pesar nuevamente (peso final).

Tabla 5.

Cuadro de Valores de Pesos.

N°	Determinación del peso de muestras de Tara (mg)			
	Cartucho	Muestra	Cartucho y Grapa	Total
1	973.8	1007	1035.3	2009.1
2	979.2.	1004.5	1034	2013.2
3	964.6	1006.1	1034.7	1999.3

- *Análisis del contenido de aminoácidos*

La preparación de la muestra del germen de Tara para este análisis consistió en validar la metodología parcial descrita en Araya et al. (2021). Esta consistió en realizar una hidrólisis ácida previa, utilizando ácido clorhídrico 6M en una relación de 500 mg de muestra por 50

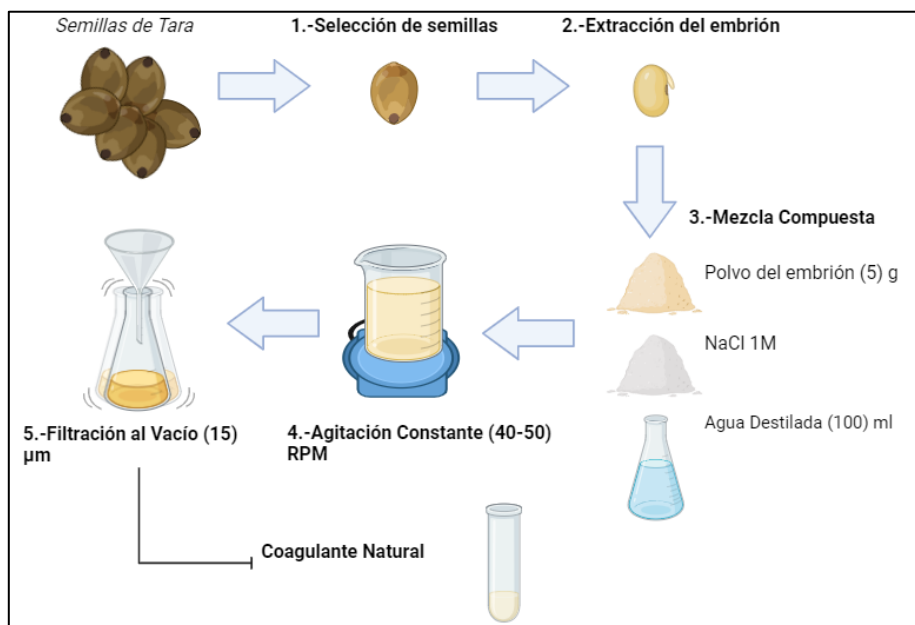
mL de ácido, luego esta mezcla fue sometida a calentamiento a una temperatura de 80 °C por un periodo 6 h, en un sistema cerrado. Posteriormente, el extracto fue sometido a una reducción de volumen utilizando un rotavaporador a una presión de 66 mbar y una temperatura de 65°C hasta llega a una consistencia viscosa y reducción del ácido. Luego al extracto obtenido se agregó el reactivo FMOC en relación 1:2 y finalmente fue inyectado un volumen de 1 uL de esta mezcla en un HPLC marca HITACHI-VWR, a través de una columna de C18 y un detector de UV a una longitud de onda de 254 nm, tiempo de análisis 24 min. Todo ello, se realizó en el Laboratorio de Química Orgánica F-402 de la UCSM (Imagen 9).

- ***Obtención del Coagulante Natural***

Para la obtención del coagulante natural se validó parte de la metodología descrita por Baquerizo-Crespo et al. (2021). Se inició con la obtención del germen de Tara, para ello se procedió a moler la muestra con la ayuda de un mortero, una vez obtenido el polvo, se tamizó para identificar el tamaño de partícula usando tamices No. 40,50,60 y 80 hasta llegar a obtener un polvo con tamaño de partícula $\leq 180 \mu\text{m}$. Una vez obtenido el polvo fino, se pesó 5g de la muestra tamizada y 5.844 g de NaCl (equivalente a 1M) en 100 mL de agua destilada, dicha mezcla se llevó en agitación rápida durante 1 h a una temperatura de 40°C, luego de la agitación se dejó en reposo durante 30 min (Figura 3). Una vez terminado el proceso se llevó a un sistema de filtración al vacío, con la ayuda de un filtro Whatman-Cat No 1440 125, el sobrenadante obtenido representa el coagulante a utilizar, este fue almacenado hasta su uso a 4°C (Imagen N°10).

Figura 3.

Procedimiento utilizado para la extracción del Coagulante Natural.



- *Z potencial*

El análisis del potencial Z, se llevó a cabo a partir del coagulante obtenido, con la finalidad de determinar la interacción iónica en diferentes pH identificando el tipo de iones presentes en la solución, para ello se utilizó un equipo Zetasizer Nano 90, con celdas DTS1070 con validez parcial de la metodología proporcionada por Varenne et al. (2019). Se inició calculando el pH inicial del coagulante, una vez obtenido el valor se procedió a ajustar los pH a valores más ácidos y alcalinos con la ayuda de soluciones de H_2SO_4 y $NaOH$ 1M, las soluciones obtenidas fueron colocadas en las celdas correspondientes para su análisis (Imagen N°11).

3.4.3. Establecer las variables sobre la aplicación del coagulante natural en pruebas de Jarras.

Para iniciar con el proceso de la evaluación de las variables, se evaluó la estabilidad del agua turbia sintética.

- Preparación de Agua turbia Sintética

Carrasquero et al. (2017), reportó un protocolo el cual fue validado para este estudio. 5 g de caolín de la marca Merck fue pesado y adicionado en 1000 mL de agua de grifo. Dicha mezcla fue llevada a agitación constante, utilizando para ello un agitador magnético durante un tiempo de 1 h, con el fin de lograr dispensar uniformemente el caolín, transcurrido ese tiempo se dejó en reposo durante 24 h para completar su hidratación y su posterior suspensión estable. Finalmente, para evaluar su estabilidad se procedió a medir a cada 5 min su turbidez durante 90 min, de esta forma se puede elaborar una curva de estabilidad de agua turbia sintética (Imagen N°12).

- Análisis de Variables

Una vez obtenido el coagulante natural y el agua turbia sintética, se procedió a poner en práctica el proceso de coagulación-floculación (Figura 4), para ello se elaboró un cuadro de variables y niveles a analizar (Tabla 6), en la cual se tuvo referencias de investigaciones similares (Amran et al., 2021; Getahun et al., 2024; Koul et al., 2022). Entre otros dentro de las cuales se hicieron uso de coagulantes naturales.

Figura 4.

Proceso de Coagulación-Floculación.

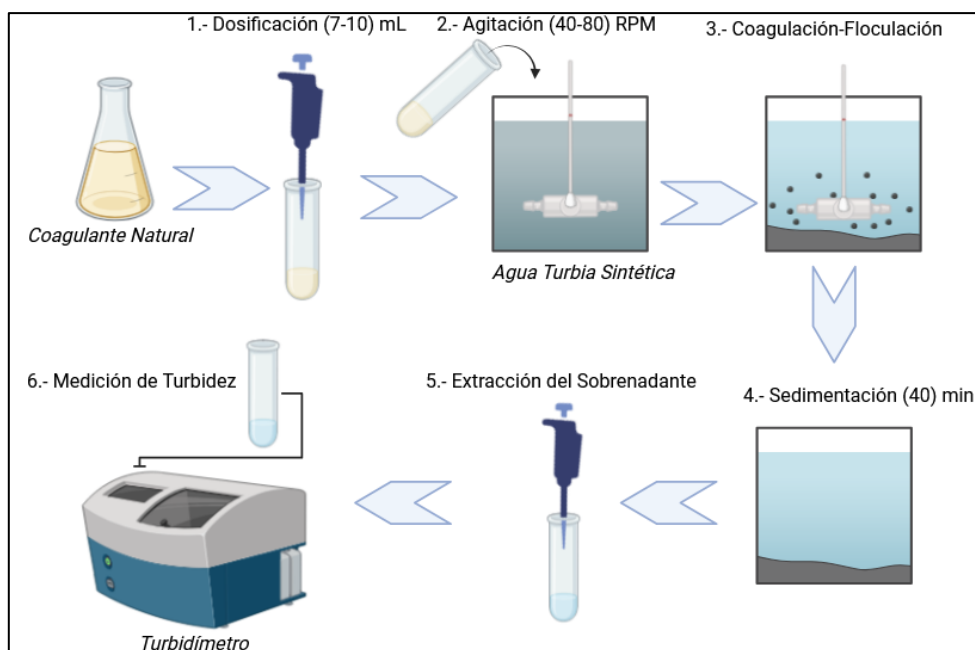


Tabla 6.

Valores experimentales del Diseño Experimental.

FACTOR	NOMBRE	UNIDADES	BAJO	ALTO
A	pH	Unidades de pH	6	8
B	Dosis de Coagulante	mL/L	7	10
C	Velocidad de Agitación	RPM	40	50
D	Tiempo de Agitación	min	30	40

E	Nivel de turbidez	NTU	50	100
---	-------------------	-----	----	-----

Una vez establecido los factores y niveles, se trabajó con un diseño factorial fraccionado de dos niveles (2^{5-1}) y con una única variable de respuesta “Remoción de Turbidez” con la finalidad de reducir experimentos sin la necesidad de perder eficiencia, reduciendo costos y tiempos, además de ello se logró identificar los efectos principales sin perder información significativa en el proceso (Tabla 7), cabe resaltar que cada experimento se realizó por triplicado para garantizar la precisión y exactitud de los datos (Imagen N°13).

Tabla 7.

Distribución de Valores Experimentales 2^{5-1} .

Std	Corridas	pH	Dosis mL	Velocidad RPM	Tiempo min	Turbidez NTU
1	7	6	7	40	30	100
2	1	8	7	40	30	50
3	12	6	10	40	30	50
4	11	8	10	40	30	100
5	10	6	7	50	30	50
6	15	8	7	50	30	100
7	5	6	10	50	30	100
8	16	8	10	50	30	50
9	6	6	7	40	40	50

10	13	8	7	40	40	100
11	3	6	10	40	40	100
12	4	8	10	40	40	50
13	14	6	7	50	40	100
14	9	8	7	50	40	50
15	8	6	10	50	40	50
16	2	8	10	50	40	100

3.4.4. *Evaluar la eficiencia de la semilla de Tara como coagulante y su comparación utilizando sulfato de aluminio.*

Se optimizó el proceso de coagulación-floculación teniendo en consideración las variables significativas obtenidas (pH y Turbidez). Para ello, se utilizó un diseño central compuesto (CCD), el cual evidencia un mejor rendimiento como puntos axiales, medios, duplicados, involucran medios cuadráticos y la optimización de respuesta según mencionan la investigación de Abderrezzaq et al. (2024), la cual fue desarrollada para cada nivel de turbidez (alta y mediana), todo ello en busca de maximizar la respuesta de remoción y reducir el gasto. Se hizo uso de las variables de pH y dosis de coagulante; esta última variable fue tomada en consideración con la finalidad de verificar si la dosificación menor logra una mayor efectividad e impulsa a un mejor rendimiento (Tabla 8) se tuvo 2 variables de respuesta, la remoción de turbidez y la remoción de SST presente en la muestra, para ello se hizo uso de la metodología descrita en ASTM- D5907-18 (Imagen N°14). Para concluir la serie de experimentación, se realizó una comparación entre el producto optimizado y el sulfato de aluminio, además de las pruebas en muestras reales de agua del río Chili (Imagen

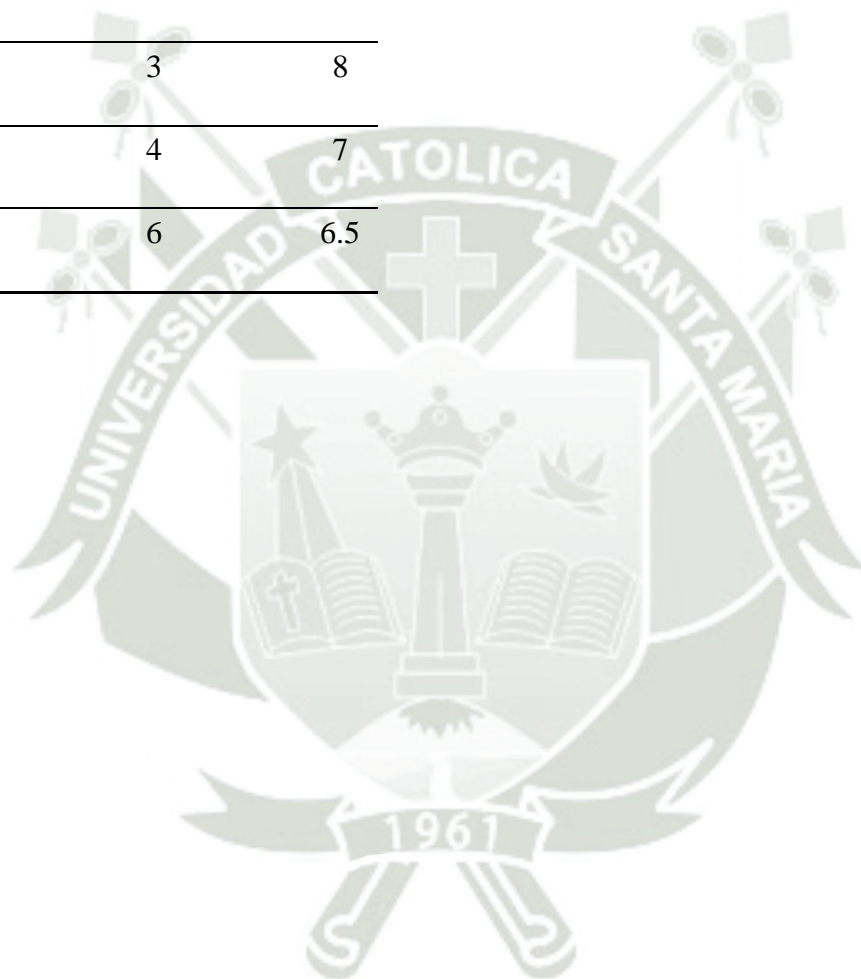
Nº15). Finalmente, se realizó de la caracterización química y morfológica de los flóculos obtenidos, con el fin de poder verificar su viabilidad de su uso a una escala mayor.

Tabla 8.

Distribución de Valores Experimentales CCD.

Corridas	Dosis del coagulante mL	pH
1	6	8
2	6	8
3	8	7
4	8	7
5	8	9
6	6	6.5
7	4	9
8	6	9.5
9	8	9
10	6	8
11	9	8
12	6	8
13	9	8
14	3	8

15	4	7
16	6	8
17	6	9.5
18	4	9
19	6	8
20	3	8
21	4	7
22	6	6.5





CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis y discusión de los resultados obtenidos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización y los ensayos experimentales realizados.

4.1.1. Caracterización de muestras de agua del río Chili mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos.

En la Tabla 9 y Tabla 10, se muestra a detalle las características fisicoquímicas iniciales de las muestras recolectadas en los meses de febrero y noviembre 2024, las cuales fueron recolectadas en la bocatoma de la PTAP “La tomilla”, donde los resultados incluyeron los niveles de turbidez, pH, conductividad, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales.

Tabla 9.

Parámetros fisicoquímicos iniciales de la muestra de agua obtenida en el mes de febrero 2024.

Parámetro	Unidad de Medida	Valor Obtenido	Valor permitido*
Turbidez	NTU	47.9	5
pH	Unidades de pH	7.7	6.5-8.5
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	358	1500
SST	mg/L	7.2	-
SDT	ppm	205	1000

Nota. * Límites Máximos Permisibles DS 031-2010.

Tabla 10.

Parámetros fisicoquímicos iniciales de la muestra de agua obtenida en el mes de noviembre 2024.

Parámetro	Unidad de Medida	Valor Obtenido	Valor permitido*
Turbidez	NTU	124.1	5
pH	Unidades de pH	6.8	6.5-8.5
Conductividad	μS/cm	580	1500
SST	mg/L	9	-
SDT	ppm	337	1000

*Nota. *Límites Máximos Permisibles DS 031-2010.*

El análisis de los valores obtenidos en cada muestreo (Tabla 9 y 10), excedieron el parámetro de turbidez de manera significativa, si se compara con los valores máximos permitidos, establecidos en el reglamento de calidad de agua para el consumo humano DS 031-2010. Es fundamental regular estos niveles de turbidez según mencionan Zimoch Paciej (2020), los cuales reportaron en su investigación que el exceso de turbidez no sólo llega a afectar el sabor y el aspecto desagradable, también las partículas suspendidas llegan a albergar bacterias, virus y parásitos, reduciendo la efectividad de los posteriores procesos que conllevan los tratamientos de plantas de tratamiento. La acumulación de sólidos llega a generar sedimentos afectando tuberías y reservorios, deteriorando su funcionamiento.

4.1.2. Caracterización de las muestras de la semilla de Tara y coagulante natural

- Contenido de humedad

En la siguiente tabla se muestra el contenido de humedad antes y después del proceso de secado.

Tabla 11.

Porcentaje de Humedad.

Muestra	Humedad %
Tara S/T*	0.79
Tara (Seco)	0.20

Nota. * Sin algún Tratamiento (S/T).

La Tabla 11, muestra los resultados del contenido de humedad, se evidencian valores bajos (0.79 %) y luego del secado este reduce (0.20 %) de su composición total. Estos resultados coinciden con la información reportada por Cojbasic et al. (2024), en la cual mencionan que un alto contenido de la humedad podría ser partícipe de un apelmazamiento indeseable lo cual hace referencia a una textura más compacta dificultando su manejo y dosificación; además de ello Souza Dos Santos et al. (2021), mencionan que a mayor contenido de humedad surgen afecciones en su eficiencia y estabilidad, en cambio la baja humedad presenta una mayor estabilidad evitando la degradación química y microbiológica.

- *Grupos funcionales*

Para determinar el potencial de la semilla de Tara, se analizó mediante espectrometría infrarroja F-TIR los grupos funcionales que presenta en su composición, estos se visualizan en la Figura 5, donde se logró encontrar una serie de compuestos favorables tanto para la coagulación como para la floculación. En la Tabla 12 se detalla la descripción de dichas bandas.

Figura 5. Espectro FTIR del polvo de Tara.

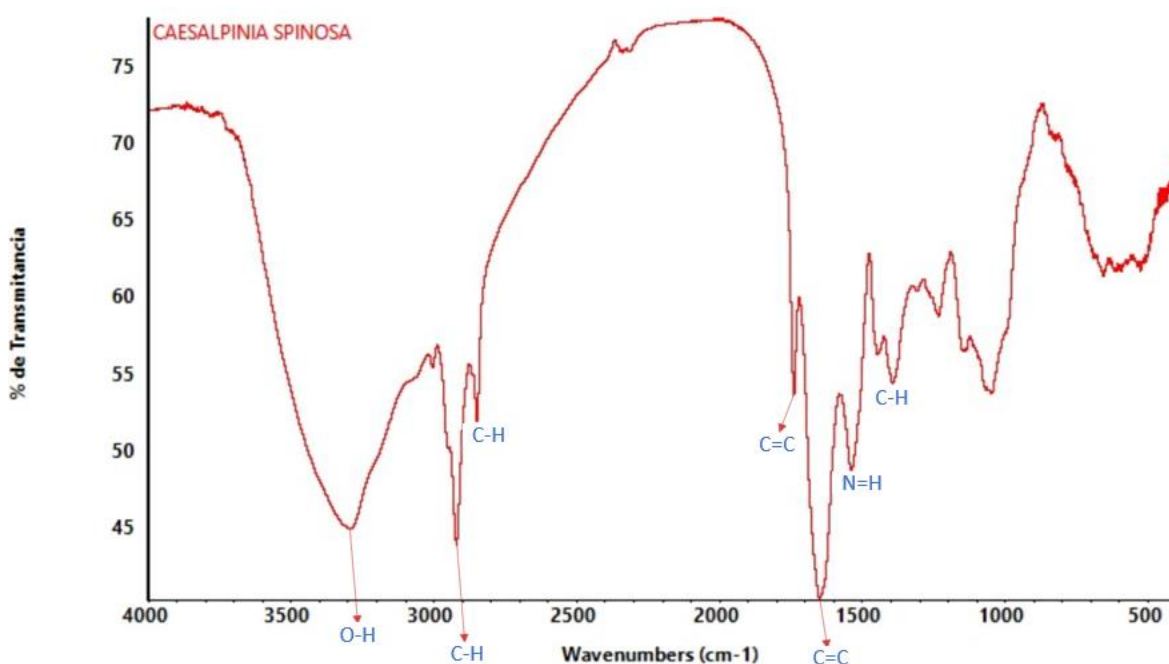


Tabla 12.

Bandas encontradas IR y caracterizadas.

Banda Infrarroja (cm ⁻¹)	Intervalo de Frecuencia Banda Infrarroja (cm ⁻¹)	de enlace	Grupo funcional	Tipo de compuesto

3303	3500 - 3200	O-H	Hidroxilos	Alcoholes, enlaces H
2926 2855	3000 - 2850	C-H	Alifáticos	Alcanos (tensión)
1745	1750 - 1730	C=C	Ésteres	Éster
1655	1670 - 1640	C=C	Amidas I	Amidas
1542	1570 - 1500	N-H	Amida II	Aminas y amidas primarias y secundarias (tensión)
1400	1450 - 1400	C-H	Alifático	-CH ₃ - (flexión), - CH ₂ - (flexión)

El pico de banda ancha 3303 corresponde principalmente a O-H, equivalente a vibraciones de estiramiento de alcoholes, proteínas y estructuras de ácidos grasos. Según Mohd-Asharuddin et al. (2017), mencionan esta banda es representativa por lo general el elevado contenido proteico lateral de la arginina, un componente fundamental en el proceso de floculación.

Las bandas 2926 y 2855 los cuales contienen dentro de su enlaces carbonos e hidrógenos comúnmente contienen ácidos alifáticos, como también ácidos carboxilos, según Dos Santos et al. (2018), mencionan que este estiramiento del enlace C-H corresponde a la banda de los ácidos grasos.

La región observada con un valor 1745, representa la presencia de un grupo funcional de esteres el cual se asocia con un estiramiento del grupo carboxilo, Sugumaran et al. (2017), indican que puede presentar modificaciones en lípidos o proteínas y este grupo forma una base de serina, aminoácido presente en gran cantidad de semillas.

En cuanto a las bandas 1655 y 1542, presentan estructuras de carbonos, hidrógenos y nitrógenos, la banda 1655 representa una señal característica de amidas tipo I, el cual es el componente principal de la estructura de una proteína, en caso de la banda 1542, es una amida tipo II, más compleja el cual deriva del estiramiento C-N o deformación N-H. Estas bandas fueron semejantes al estudio realizado por Akyuz et al. (2018), el cual mencionan que ambas amidas están asociadas a unidades de repetición de proteínas y polipéptidos.

La banda 1400, posee un enlace C-H, el cual surge de deformaciones este grupo alifático, en la investigación realizada por Sugumaran et al. (2017) estos corresponden a aminoácidos ácidos tales como ácido glutámico y diferentes compuestos orgánicos.

- ***Características Físicoquímicos***

En la Tabla 13, se evidencia los resultados del pH y la conductividad eléctrica de la muestra en polvo y coagulante obtenido.

Tabla 13.

Valores Obtenidos de los parámetros físicoquímicos Polvo-Coagulante.

Muestra	Parámetro	Unidades	Valores Obtenidos
Polvo de Tara	pH	Unidades de	6.78
		pH	
	Conductividad	mS/cm	3.30

Coagulante Natural	pH	Unidades de	6.52
	Conductividad	mS/cm	6.13

Se puede apreciar en la Tabla 13 que dentro de los valores obtenidos el pH en ambas muestras está dentro del rango, no demuestra una característica acida o muy básica, lo que indica que modificar el pH podría llevar riesgos en el proceso de coagulación. Naceradska et al. (2019) explican que la interacción con el agua en un pH no neutral o modificado interfiere en la formación de flóculos y la estabilidad precipitando compuestos no deseados. En caso de la conductividad demuestra una corriente eléctrica bastante estructurada los iones (Na^+) y (Cl^-), los cuales favorecen a la carga eléctrica presente, potenciando los mecanismos de coagulación, aumentando su solubilidad en el cuerpo de agua (Mortadi et al., 2020).

- *Caracterización Morfológica*

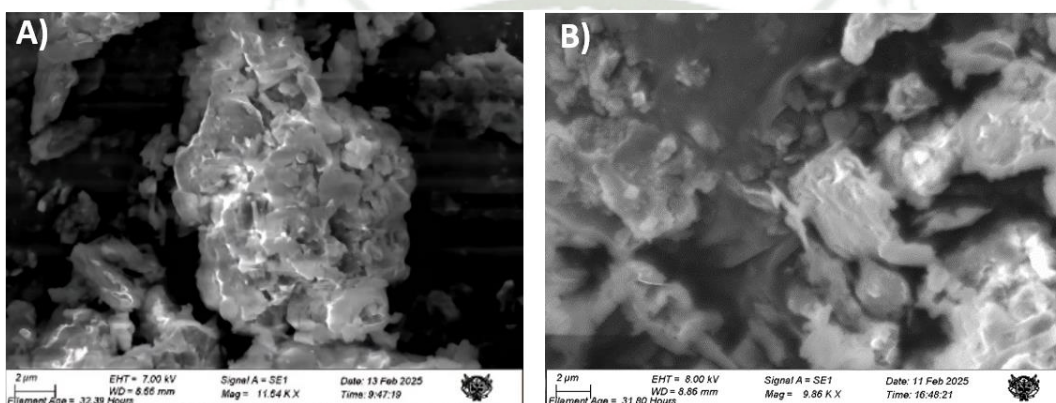
Las características de la estructura externa de la superficie de las muestras, se muestran en la Figura 6, se necesitó una tensión de 7.00 Kv a una magnitud de 18.40 KX, la Figura 6 (A) muestra una superficie heterogénea con un perfil morfológico irregular adecuado para la retención de iones, lo que conduce a la formación de cúmulos o partículas de mayor tamaño. Según (Shah et al., 2024) mencionan que esta forma irregular favorece a los procesos de adsorción permitiendo la captura de partículas coloidales en su superficie, las cuales contribuyen al proceso de floculación, facilita su sedimentación y adquiere claridad.

En la Figura 6 (B), muestra un área donde se estima una elevada superficie con presencia de macromoléculas funcionales presentes, con ligera apariencia fibrosa típico de

paredes celulares. Mohamed Noor et al. (2022), en su investigación evaluaron como coagulante el uso de la *Moringa oleífera* donde la microscopía revela características similares en su estructura externa, de igual forma se menciona que esta morfología permite aglomerados esféricos correlacionándolo a la estructura morfológica de las proteínas.

Figura 6.

Representación Morfológica de la Tara.



Nota. (a) Superficie heterogénea con un perfil morfológico irregular y (b) Alta área superficial por macromoléculas funcionales. Obtenidas de MEB proveniente de la UCSM.

- *Análisis de Lípidos*

El contenido de lípidos presentes en la muestra de germen de Tara (Tabla 14), fue en promedio 6.7 ± 0.1 %, CV= 1.5 %. tomando como base 1 g de muestra, con muy poca dispersión entre repeticiones según el coeficiente de variación CV.

Tabla 14.*Bandas encontradas IR y caracterizadas.*

N°	Determinación de % Lípidos			
	P.Inicial	P.Desgrasado	Diferencia	%
1	2009.1	1874.6	134.5	6.7
2	2013.2	1880.7	132.5	6.6
3	1999.3	1862.9	136.4	6.8

La fracción lipídica es escasa en la muestra. Según Koul et al. (2022), en su investigación indican que la fracción lipídica no favorece la acción de coagulación, esta disminuye la interacción con la capacidad de la mezcla en agua, favorece a la oxidación y degradación de su composición química. Por lo tanto, la escasa presencia lipídica mejora su potencialidad. Sin embargo, en la investigación realizada por Nath et al. (2021), se menciona que el mecanismo de coagulación-floculación, se beneficia con una ligera presencia de carga lipídica, los cuales poseen una serie de grupo cargados y funcionales en su estructura como son los ya comunes contribuyentes carbohidratos y proteínas pudiendo actuar algunos lípidos como agentes hidrofóbicos, ayudando a la formación de flóculos más densos y resistentes.

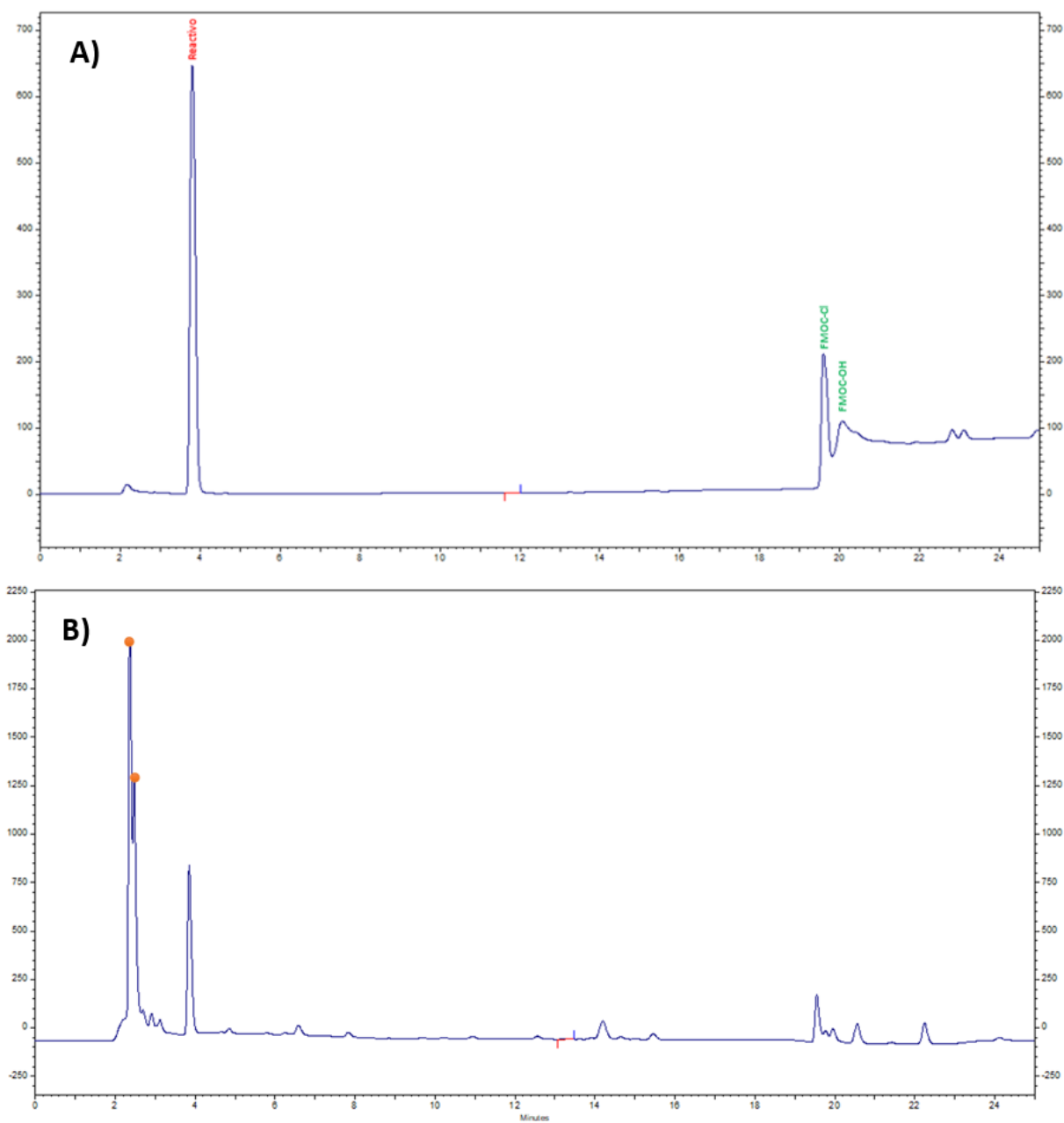
- *Análisis de Aminoácidos*

La Figura 7, muestra un cromatograma típico de la muestra del germen de Tara, cabe resaltar aun cuando no es un análisis completo, se puede observar la presencia de aminoácidos, los cuales se derivan con el reactivo FMOC a partir de los aminoácidos libres mediante fluorescencia. En la Figura 7 (a), es posible identificar el blanco, el cual contiene

sólo el reactivo y se visualiza en área y el tiempo de retención, donde se expone con mayor intensidad de señal al minuto 4 y en las regiones aledañas dentro del minuto 19 y 20. Los resultados son mostrados en la Figura 7 (B), se puede observar (además del reactivo), los aminoácidos libres. En este cromatograma se destacan dos picos con gran intensidad de señal entre los minutos 2 y 3. En cuanto a los demás aminoácidos su intensidad es potencialmente baja a comparación de estos dos aminoácidos presentes. La Figura 7 (B), demuestran un alto contenido de 2 aminoácidos presentes en la muestra, para ello la investigación de Fierro et al. (2024), analizaron una muestra similar y determinaron que en la harina del germen de Tara posee picos con un alto contenido proteico. Enfatiza su investigación en la presencia de abundantes bandas de la proteína globulina 11s comparando estudios con las semillas de leguminosas las cuales posee una mejor distribución. En el investigación realizada por Abidin et al. (2017), mencionan que un coagulante natural debe poseer un elevado contenido proteico de arginina y ácido glutámico, siendo estos dos aminoácidos los más caracterizados para el proceso de coagulación-floculación favoreciendo a la formación de puentes iónicos, neutralizando cargas y facilitando la unión de partículas coloidales fue así que en comparación al germen de tara estos pueden ser clave. Colarossi Salinas et al. (2021) mencionan la presencia de estos dos aminoácidos en el germen de tara con mayor presencia.

Figura 7.

Cromatograma típico de una muestra de HPLC semilla de Tara: A Blanco y B corrida de Tara.



- *Z potencial*

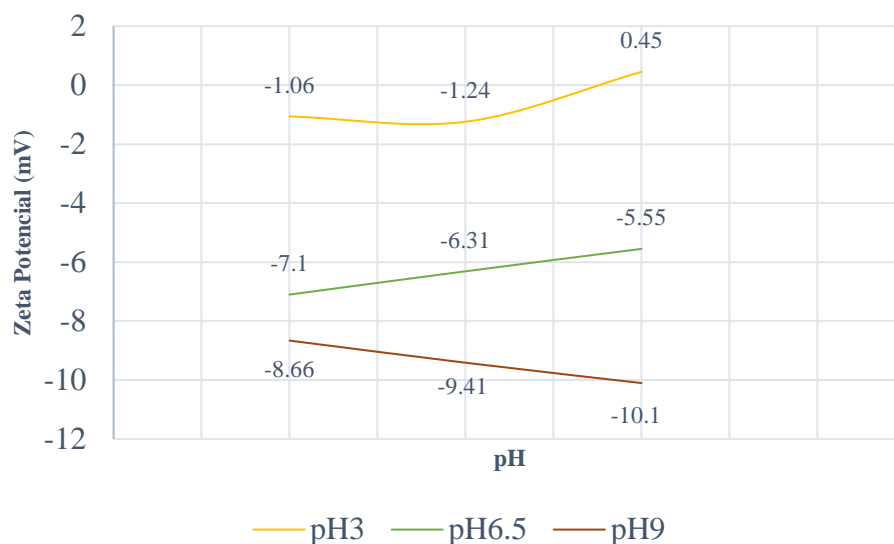
Los valores del análisis del Potencial Zeta (PZ), se pueden identificar en la Figura 8, la cual comprende el coagulante modificado pH neutro (6.5), pH ácido (3) y pH alcalino (9), donde el coagulante en condiciones ácidas se aproxima al 0 inclusive PZ positivo, en cambio el pH neutro y alcalino poseen valores de PZ negativos. Sin embargo, luego de los tratamientos de coagulación-floculación realizados a un pH (ácido y alcalino) demostraron una remoción de turbidez mínima en comparación a pH neutro.

La Figura 8, muestra que en condiciones ácidas el punto isoeléctrico es positivo en comparación al PZ del pH neutro. En el estudio realizado por Eydi Gabrabad et al. (2024), se cuestionan que la dispersión electrostática negativa no determina un mejor proceso de coagulación, debido a la influencia de parámetros adicionales como la conductividad de la solución, la concentración de las partículas, entre otros.

Muchas partículas coloidales alcanzan su punto isoeléctrico de neutralización cercanas a un pH neutro presentando aun con PZ negativo, logrando maximizar las interacciones de puente y minimizando las fuerzas de repulsión (Nie et al., 2022).

Figura 8.

Potencial Zeta del Coagulante de Tara.



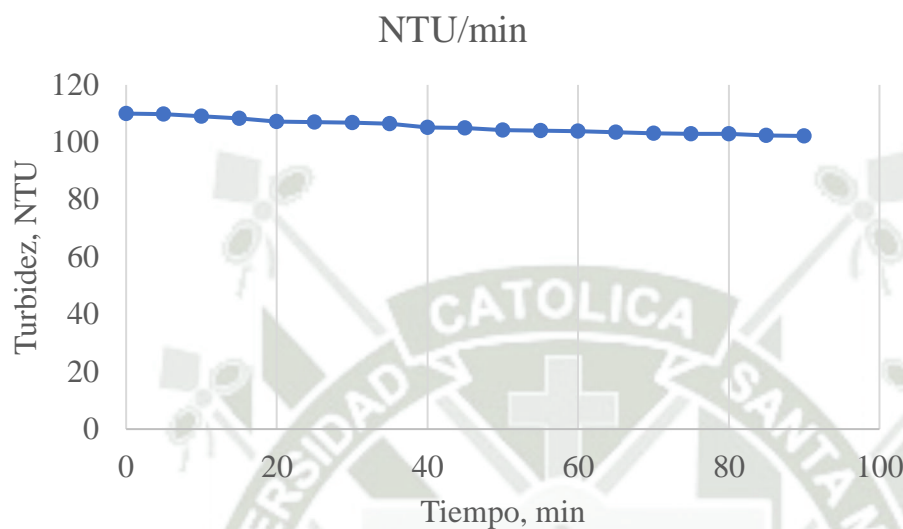
4.1.3. Establecer variables sobre la aplicación del coagulante natural en pruebas de Jarras.

- Análisis de estabilidad de Agua turbia sintética

En la Figura 9, se muestran los resultados obtenidos luego de la preparación del Agua Turbia sintética (ATS), el cual inicio con una turbidez inicial de 110 NTU y finalizó con una turbidez de 102.2 NTU, desde el minuto 0 al 90 respectivamente se realizaron las mediciones en un rango de 5 min cada una, teniendo un promedio de 105.5 ± 2.5 , CV = 2.5 %. Como se visualiza el ATS tiende a sedimentarse ligeramente, lo cual propone un margen de error relativamente bajo para el desarrollo de pruebas sin un grupo de control adicional, la evaluación de turbidez residual no debería mostrarse afectada durante todo el proceso de coagulación. Según Carrasquero et al. (2017), mencionan que el ATS debe presentar una tendencia constante, lo que asegura su grado de confianza, en su investigación se identifica una ligera variación la cual se asemeja a la presente investigación.

Figura 9.

Curva de Sedimentación ATS.



- Determinación de Variables

Con las variables establecidas y experimentaciones preliminares, se creó el diseño experimental, donde se evalúa de forma aleatoria cada factor en diferente nivel de acuerdo con las simétricas del software Design Expert, se analizó como variable de respuesta la remoción dentro de un tiempo de (40 y 60) min, el diseño experimental y resultados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15.

Resultados del diseño factorial fraccionado 2⁵⁻¹.

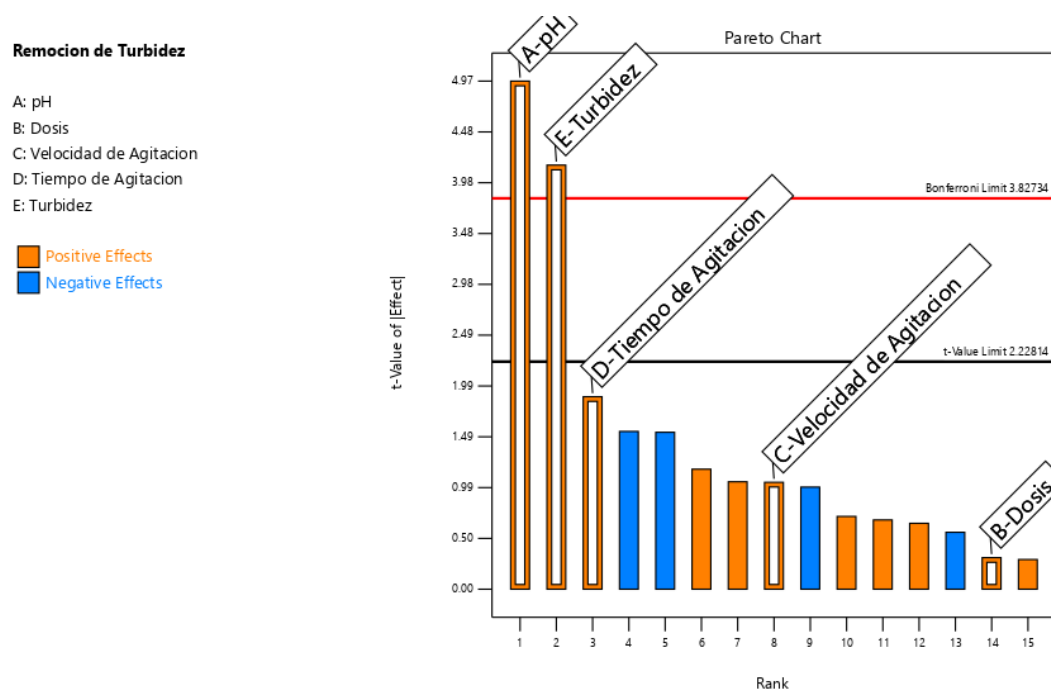
Std	RUN	pH	Dosis Agitación		Tiempo min	Turbidez NTU	Remoción	
			mL	rpm			40 min	60 min
1	7	6	7	40	30	100	68.73	72.77
2	1	8	7	40	30	50	69.92	71.20
3	12	6	10	40	30	50	56.87	57.67
4	11	8	10	40	30	100	86.73	86.17
5	10	6	7	50	30	50	53.21	53.42
6	15	8	7	50	30	100	84.45	84.68
7	5	6	10	50	30	100	79.07	80.27
8	16	8	10	50	30	50	69.60	70.87
9	6	6	7	40	40	50	64.30	64.87
10	13	8	7	40	40	100	91.73	92.18
11	3	6	10	40	40	100	70.93	69.87
12	4	8	10	40	40	50	69.59	69.50
13	14	6	7	50	40	100	67.90	68.20
14	9	8	7	50	40	50	87.56	88.71
15	8	6	10	50	40	50	69.87	72.13
16	2	8	10	50	40	100	92.67	92.80

El diseño factorial fraccionado 2^{5-1} demuestra, que la mejor remoción de turbidez fue de un 92.80 % a la corrida 2 y la remoción más baja fue 53.42 % en la corrida 10. Sin embargo, se resalta que la remoción evaluada diferentes tiempos es casi nula, revelando casos donde la turbidez residual llega a aumentar, por ello se concluyó que dentro del diseño de optimización el tiempo de sedimentación será un parámetro controlado.

Una vez ingresados los valores dentro del diseño el fraccionado, se evaluó el diagrama de Pareto (Figura 10), donde se identificaron de manera visual los factores más relevantes en el proceso de experimentación, mediante un límite estadístico denominado el límite de Bonferroni (Línea Roja); en este caso se han considerado únicamente los efectos individuales, ya que la inclusión de modelos combinados podría afectar su precisión. A partir de la Figura 10, se observa que los factores con mayor significancia son el pH (Factor A) y la Turbidez (Factor E), lo que indica que estos desempeñan un papel predominante en el modelo; lo que nos permite optimizarlos y así mejorar el proceso del diseño experimental.

Figura 10.

Diagrama de Pareto del diseño factorial fraccionado 2⁵⁻¹.



Así mismo, se aprecia el modelo de análisis de varianza (ANOVA), proporciona una validación estadística formal, dividió la variabilidad total de los componentes, factores y combinación de factores en la Tabla 16. Permitted identificar con mayor precisión los factores más influyentes en el estudio a través del valor p-value. Se determinó variables significativas con un valor inferior a 0.05 en el cual el p-value del modelo tiene un valor inferior a este, concluyendo su significancia, en cuanto a los factores evaluados el pH y la turbidez se destacan como factores clave, obteniendo un valor p de 0.0079 y 0.0113 respectivamente validando su impacto dentro del diseño experimental. Sin embargo, los demás factores tales como dosis de coagulante, velocidad de Agitación, tiempo de agitación, demuestran valores por encima del p-value. Este tipo de efectos no significativos en condiciones experimentales no contribuyen a la variación de respuesta, por factores como la baja variabilidad, el nivel no

es lo suficientemente amplio o simplemente sus efectos son moderados o pequeños (Martín et al., 2011).

Tabla 16.

Análisis de varianza (ANOVA) del diseño factorial fraccionado 2^{5-1} .

Fuente	Suma de Cuadrados	df	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Modelo	2095.69	13	161.21	21.96	0.0444	significativo
A-pH	920.67	1	920.67	125.39	0.0079	
B-Dosis de Coagulación	3.54	1	3.54	0.4827	0.5591	
C-Velocidad de Agitación	40.74	1	40.74	5.55	0.1427	
D-Tiempo de Agitación	132.08	1	132.08	17.99	0.0513	
E-Turbidez	641.23	1	641.23	87.33	0.0113	
AB	88.69	1	88.69	12.08	0.0737	
AD	15.46	1	15.46	2.11	0.2838	
AE	17.08	1	17.08	2.33	0.2667	
BD	37.18	1	37.18	5.06	0.1533	
BE	41.12	1	41.12	5.6	0.1416	
DE	87.75	1	87.75	11.95	0.0744	
ABE	18.86	1	18.86	2.57	0.2502	
ADE	51.3	1	51.3	6.99	0.1183	

Residuos	14.68	2	7.34
Corr Total	2110.38	15	

En consecuencia, el modelo demostró precisión a partir de factores elementales en el proceso de optimización y el ajuste estadístico presente en la Tabla 17, permitió observar través del coeficiente de determinación (R^2), la variabilidad de respuesta en función a los factores del diseño; donde el R^2 obtenido fue de 0.9930, con una aproximación al valor 1 indicando que el modelo logra explicar la mayor parte de la variabilidad por los factores. Por otro lado, el coeficiente de variación (CV), obtuvo un valor de 3.66 % y fue inferior al 5 % reflejando una baja dispersión de los datos en torno a la media, lo que denota alta precisión en las mediciones y evidencia la consistencia del diseño asegurando la capacidad del modelo y solidez frente a la estimación del rendimiento predictivo.

Tabla 17.

Ajuste estadístico del diseño factorial fraccionado 2^{5-1} .

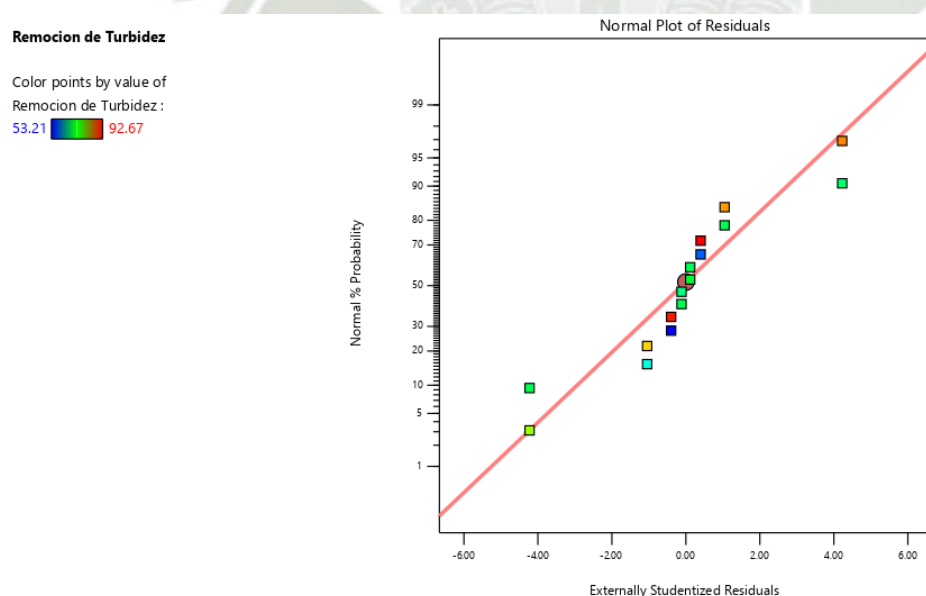
Std. Dev.	2.71	R²	0.993
Mean	73.95	Adjusted R²	0.9478
C.V. %	3.66	Predicted R²	0.5547
		Adeq Precision	15.8886

Por otro lado, los diagramas de diagnóstico fueron analizados para evaluar la validez y adecuación del modelo estadístico, detectar posibles problemas en los supuestos que sustenten el modelo estadístico.

La Figura 11 representa el supuesto de normalidad de residuos, los cuales permitieron evaluar la adecuación del modelo utilizado en el diseño experimental y verificar el cumplimiento estadístico. En este caso, la mayoría de los residuos se distribuyen de manera cercana a cero y alineados con la línea de tendencia, lo que demuestra que los errores siguen una distribución normal; esto indica que el modelo se ajusta correctamente a los datos, validando su precisión en la variable de respuesta.

Figura 11.

Supuestos de Normalidad del diseño factorial fraccionado 2^{5-1} .




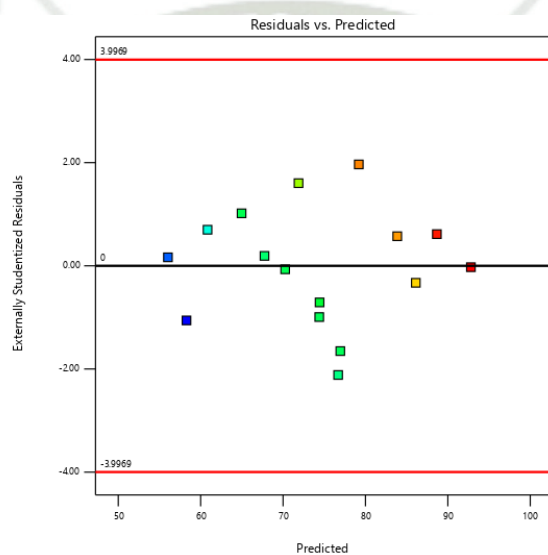
La Figura 12 representa homogeneidad de varianza, esta nos permite garantizar que la dispersión de los residuos y se mantenga constante a lo largo de todos los niveles de los factores ayudando a detectar patrones o abanicos. En este caso, se demuestra una dispersión uniforme de los residuos, indica que el modelo es consistente, por lo que valida su estabilidad y asegura los supuestos del análisis estadístico.

Figura 12.

Homogeneidad de Varianza del diseño factorial fraccionado 2^{5-1} .

Remocion de Turbidez

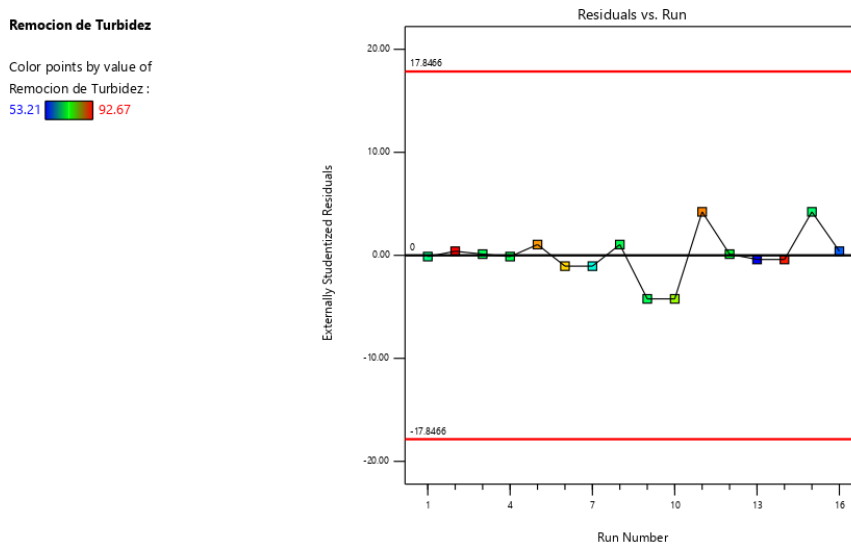
Color points by value of
Remocion de Turbidez :
53.21  92.67



Para comprobar si se cumple con el supuesto de independencia de residuos, es necesario evaluar si estos se distribuyen de manera homogénea o si presentan algún tipo de agrupación a lo largo de las corridas experimentales. Como se observa en la Figura 13, los residuos se dispersan de forma aleatoria alrededor de la línea cero, sin patrones evidentes; lo que indica que no existen efectos sistemáticos no considerados en el modelo que puedan influir en la variable de respuesta, confirmando la fiabilidad del modelo utilizado.

Figura 13.

Independencia de Residuos del diseño factorial fraccionado 2^{5-1} .



El diseño factorial experimental 2^{5-1} permitió identificar los factores claves para la remoción de turbidez, los cuales fueron respaldados por el Análisis Pareto, ANOVA, Ajuste estadístico y Diagramas de Diagnóstico. A pesar de los excelentes resultados de ajuste la capacidad predictiva del modelo es limitada, lo que subraya a hacer uso de un modelo más robusto y generalizable, con niveles ya diagnosticados a partir de estos resultados, idealizando un modelo predictivo. Según Mensah-Akutteh et al. (2022), un modelo experimental debe mejorar su capacidad predictiva simplificando factores y ampliando las réplicas influyentes.

4.1.4. Evaluación la eficiencia de la semilla de Tara como coagulante, optimización y su comparación utilizando sulfato de aluminio

Con los resultados obtenidos a partir del diseño fraccionado, se inició la optimización del proceso, para lo cual se hizo uso de software Design Expert y haciendo

uso del Diseño Central Compuesto (CCD) de manera aleatoria demostrando puntos axiales y medios, para ello se analizó por separado el nivel de Turbidez Media (TM) y Turbidez Alta (TA) identificados en las (Tabla 18 y Tabla 23) respectivamente, evidenciando los resultados obtenidos tanto para el porcentaje de remoción de Turbidez y en porcentaje remoción SST.

- *Turbidez Media (TM)*

Tabla 18.

Respuesta del % de remoción de TM y SST del diseño CCD.

Corrida	Dosis del coagulante	del pH	TURBIDEZ RESIDUAL NTU	REMOCION DE TURBIDEZ %	SST RESIDUAL mg/L	SST RESIDUAL %
1	6	8	4.17	91.66	0.73	89.42
2	6	8	3.74	92.52	0.68	90.14
3	8	7	4.31	91.38	0.79	88.55
4	8	7	4.02	91.96	0.74	89.28
5	8	9	23.5	53	4.35	36.96
6	6	6.5	4	92	0.74	89.28
7	4	9	14.9	70.20	2.76	60.00
8	6	9.5	27.9	44.20	4.2	39.13
9	8	9	24.4	51.20	4.7	31.88
10	6	8	3.2	93.60	0.59	91.45

11	9	8	5.33	89.34	0.99	85.65
12	6	8	3.45	93.10	0.64	90.72
13	9	8	5.28	89.44	0.98	85.80
14	3	8	2.7	94.60	0.5	92.75
15	4	7	2.4	95.44	0.41	94.06
16	6	8	3.29	93.42	0.61	91.16
17	6	9.5	27.8	44.40	4.1	40.58
18	4	9	15	70	2.77	59.86
19	6	8	3.07	93.86	0.57	91.74
20	3	8	2.28	95.20	0.44	93.62
21	4	7	2.6	94.80	0.48	93.04
22	6	6.5	3.83	92.34	0.71	89.71

En la Tabla 18, se presentan dos variables (pH y dosis del coagulante), de manera aleatoria, como sus variables de respuestas, donde el diseño CCD reveló que con una combinación de 4 ml de coagulante y un pH 7 se logró una remoción máxima de turbidez y SST de 95.44 % y 94.06 % respectivamente; así mismo una combinación de 6 ml y un pH de 9.5 obtuvo una remoción de mínima de turbidez y SST de 44.2 % y 39.13 % respectivamente.

- **Variable de respuesta 1 (V1): % de Remoción de Turbidez Media.**

En cuanto a la tabla ANOVA de la V1 (Tabla 19), correspondiente a la turbidez mediana, se logra identificar que el modelo es significativo obtenido un valor por debajo de 0.0001, lo cual también ocurre con las variables analizadas, las interacciones y términos

cuadráticos refuerzan la complejidad del modelo, la falta de ajuste arrojaron un valor no significativo (0.0752) indicando que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos experimentales, en cuanto a la Tabla 20, la cual presenta el ajuste estadístico de la VI, demuestra un R^2 de 0.9989 y un coeficiente de variación de 0.8711 % indicando que el modelo es preciso, con alta capacidad predictiva, su baja variabilidad explica la precisión de la respuesta, asegura su aplicación y su optimización.

Tabla 19.

ANOVA del modelo CCD en la VI.

Fuente	Suma de Cuadrados	df	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Modelo	6813.38	7	973.34	1879.07	< 0.0001	significativo
A-Dosis Coag.	31.7	1	31.7	61.19	< 0.0001	
B-pH	554.36	1	554.36	1070.22	< 0.0001	
AB	107.6	1	107.6	207.73	< 0.0001	
B ²	569.35	1	569.35	1099.15	< 0.0001	
AB ²	50.58	1	50.58	97.65	< 0.0001	
B ³	0.1096	1	0.1096	0.2115	0.6527	
AB ³	0	0				
B ⁴	103.46	1	103.46	199.73	< 0.0001	
Residuos	7.25	14	0.518			

Lack of Fit	1.62	1	1.62	3.74	0.0752	no significativo
Pure Error	5.63	13	0.4332			
Cor Total	6820.63	21				

Tabla 20.

Ajuste estadístico del CCD VI.

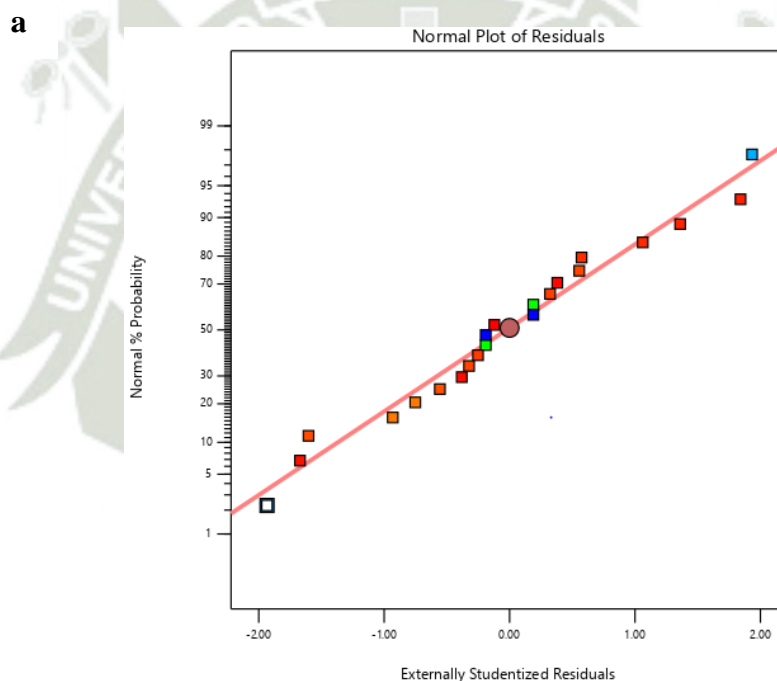
Std. Dev.	0.7197	R²	0.9989
Mean	82.62	Adjusted R²	0.9984
C.V. %	0.8711	Predicted R²	0.9977
		Adeq Precision	118.0011

En la Figura 14 se muestran los Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez media (50 NTU). Figura 14 (a), supuesto de normalidad; indica que los residuos se alinean próximo a la línea diagonal, mostrando una distribución normal y asegurando la validez del modelo. La Figura 14 (b), supuesto de homocedasticidad; demuestra una dispersión aleatoria de los residuos alrededor de la línea cero, lo que confirma la ausencia de sesgos sistemáticos y la homogeneidad de la varianza. Figura 14 (c), supuesto de independencia de residuos; al no manifestar patrones ni agrupaciones a lo largo de la

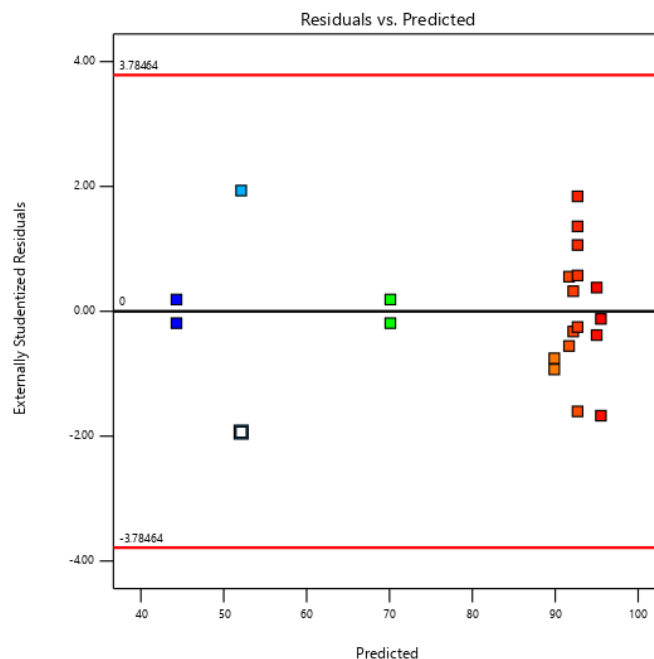
ejecución, indica una aleatorización adecuada y no presenta influencias externas no controladas; estos resultados refuerzan la confiabilidad y ajuste de los modelos estadísticos para su optimización en la variable de respuesta 1 (% de remoción de turbidez).

Figura 14.

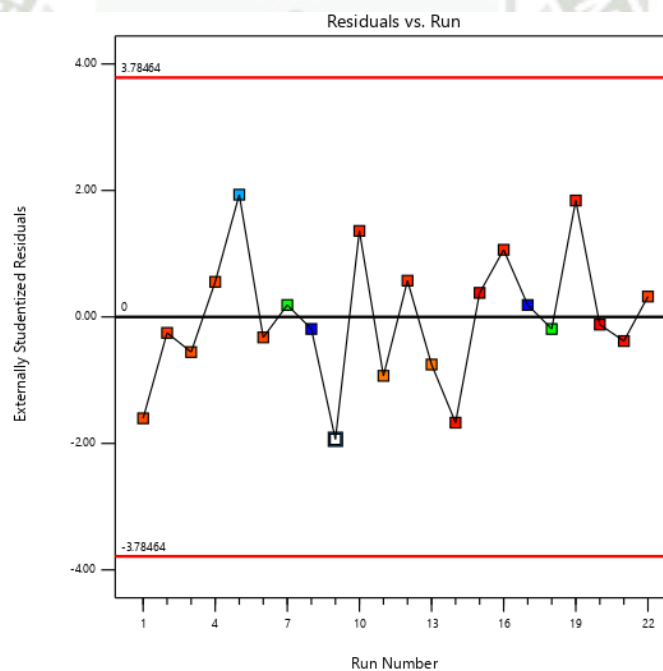
Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez media (50 NTU) - variable de respuesta 1 (% de remoción de turbidez).



b



c

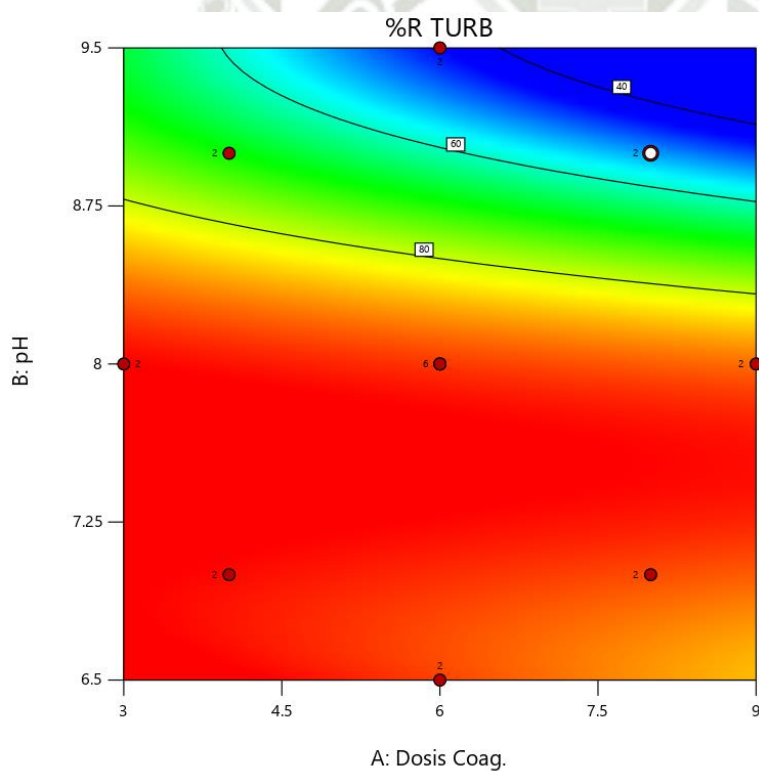


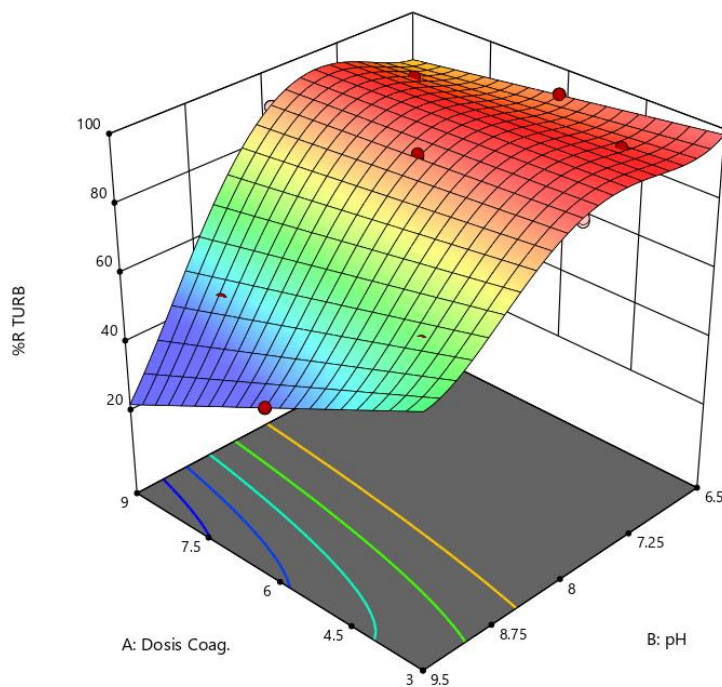
Se realizó el ploteo del contorno y superficie de respuesta 3D, en la Figura 15 en la cual se visualiza la variable de respuesta, sus factores e interacciones, para ello la interacción de los factores pH y dosis del coagulante presenta una mayor remoción en el sector de color

rojo intenso y los de menor remoción un color azul, en ambos casos se observa que mientras la dosis del coagulante disminuye la remoción tiende a subir su %, en caso del pH un valor neutro ligeramente alcalino logra una mejor respuesta, con estos resultados llegamos a entender las condiciones en que se debe trabajar cuando se presentan aguas con turbidez mediana.

Figura 15.

Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de turbidez media.





- **Variable de respuesta 2 (V2): % de Remoción de Solidos Suspendedos Totales - SST**

Para el análisis de varianza de la remoción de SST (Tabla 21), se obtuvo un modelo significativo con respecto a una turbidez mediana, se logra identificar que el modelo obtuvo un valor por debajo de 0.0001, lo cual también ocurre con los factores analizadas, las interacciones y términos cuadráticos refuerzan la complejidad del modelo, el Lack of Fit o falta de ajuste arrojaron un valor no significativo (0.1471), indicando que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos experimentales; así mismo, Tabla 22 la cual presenta el ajuste estadístico de la V2, demuestra un R^2 de 0.9977 y un coeficiente de variación de 1.63 % indicando que el modelo es preciso, con alta capacidad predictiva, su baja variabilidad explica la precisión de la respuesta, asegura su aplicación y su optimización.

Tabla 21.

ANOVA del modelo CCD TM V2.

Fuente	Suma de Cuadrados	de df	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Model	9903.24	7	1414.75	875.14	< 0.0001	significativo
A-Dosis Coag.	58.98	1	58.98	36.49	< 0.0001	
B-pH	1454.49	1	1454.49	899.72	< 0.0001	
AB	222.5	1	222.5	137.63	< 0.0001	
B ²	1298.46	1	1298.46	803.2	< 0.0001	
AB ²	102.57	1	102.57	63.45	< 0.0001	
B ³	124.74	1	124.74	77.16	< 0.0001	
AB ³	0	0				
B ⁴	463.76	1	463.76	286.87	< 0.0001	
Residual	22.63	14	1.62			
Lack of Fit	3.49	1	3.49	2.37	0.1474	no significativo
Pure Error	19.14	13	1.47			
Cor Total	9925.87	21				

Tabla 22.

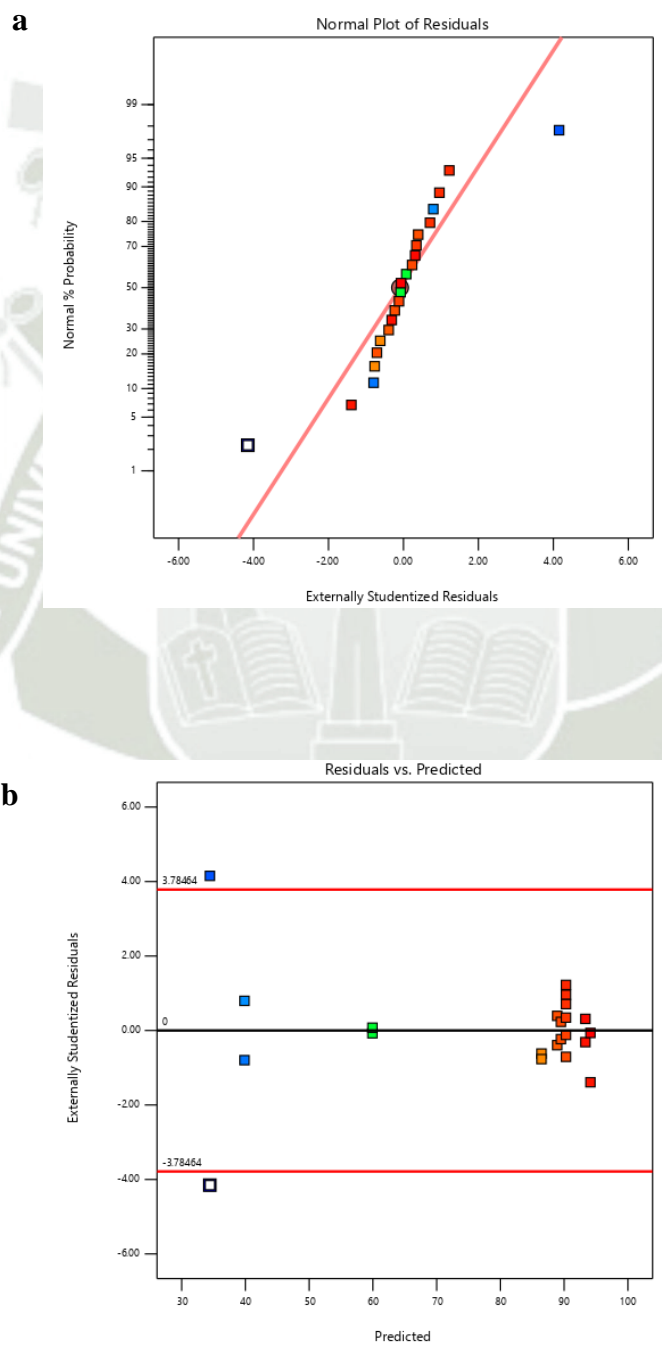
Ajuste estadístico del CCD V2.

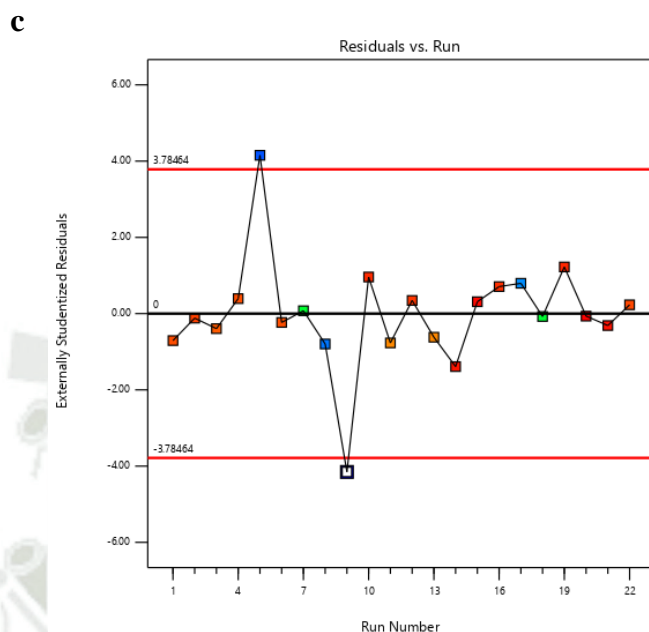
Std.	1.27	R²	0.9977
Dev.			
Mean	77.94	Adjusted R²	0.9966
C.V. %	1.63	Predicted R²	0.9928
		Adeq Precision	77.8762

En la Figura 16 se muestran los Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez media (50 NTU). Figura 16 (a), Normal Plot of Residuals; se observa que la mayoría de los residuos se alinean cerca de la línea diagonal, demostrando una distribución normal y asegurando su validez del modelo. Figura 16 (b), Residuals vs. Predicted; se obtiene una dispersión mayoritariamente aleatoria de los residuos alrededor de la línea cero, afirmando la ausencia de sesgos sistemáticos y la homogeneidad de la varianza. Figura 16 (c), Residuals vs. Run; no muestra tendencias a lo largo de la ejecución, lo que indica una aleatorización adecuada y que no hay influencias externas no controladas; estos resultados refuerzan la viabilidad del modelo estadístico para su optimización dentro de la variable de respuesta 2 (% de remoción de sólidos suspendidos totales - SST).

Figura 16.

Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez media (50 NTU) - variable de respuesta 2: % de remoción de solidos suspendidos totales.

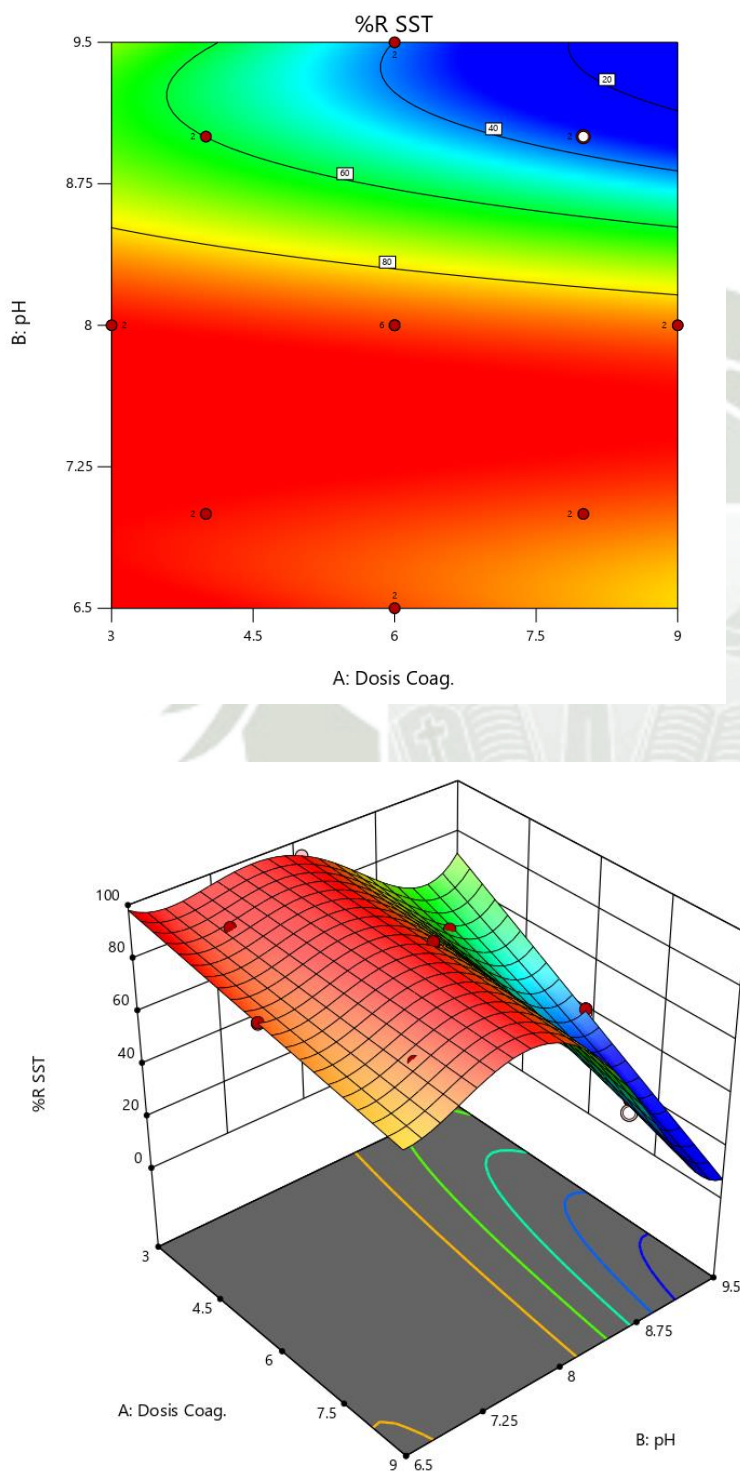




Los resultados del Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de SST, se visualiza en la Figura 17., donde tanto en el contorno como la superficie se identifican la zona de pH y Dosis de coagulante se optimizan mejorando la eficiencia de remoción, para ello un pH más alcalino y una dosis muy baja logran un tratamiento eficaz favorable para el sistema.

Figura 17.

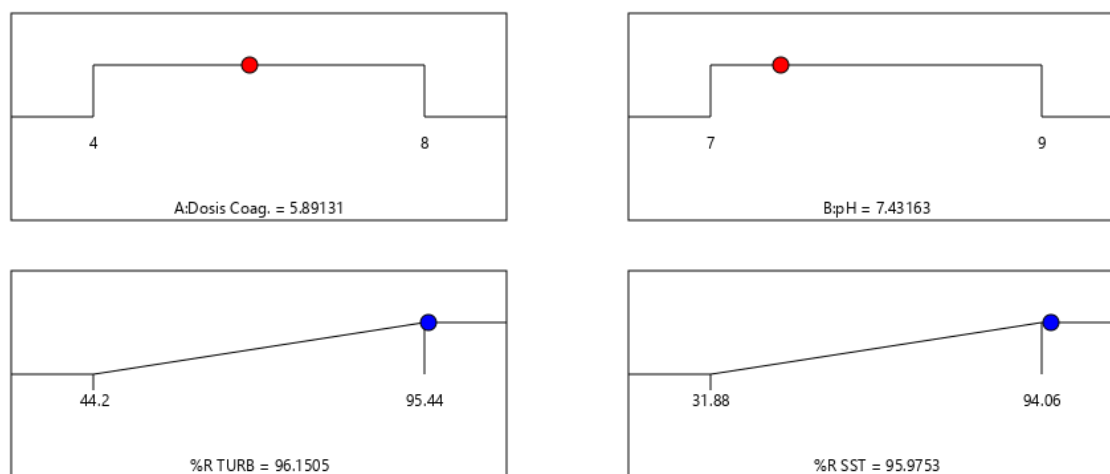
Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de SST.



Finalmente, el proceso de optimización numérica fue desarrollado por el software Design Expert para lo cual se colocó el pH y Dosis de coagulante en rango y se máximo el % de remoción tanto para la Turbidez y SST, Figura 18, los resultados obtenidos demostraron que luego de 5.98 ml Dosis de Coagulante a un pH 7.4 se logrará remover hasta un 96.15 % de turbidez y un 95.97 % de SST en ATS media.

Figura 18.

Optimización del CCD en Turbidez Media.



- **Turbidez Alta (TA)**

En cuanto a los resultados del análisis de la turbidez alta se aprecia la Tabla 23, muestra de manera aleatoria los factores y sus respectivos niveles distribuidos de manera aleatoria por el diseño experimental CCD, valores residuales y los % de remoción en ambas de ambas variables de respuesta.

Tabla 23.

Respuesta del % de remoción de TA y SST del diseño CCD.

Corrida	Dosis del coagulante	pH	REMOCION			
			TURBIDEZ RESIDUAL (NTU)	DE TURBIDEZ %	SST RESIDUAL (NTU)	REMOCION DE SST %
6	6	9.5	30.8	69.20	2.3	82.93
19	6	9.5	30.1	69.90	2.26	83.22
17	8	9	16.8	83.20	1.27	90.57
2	8	9	16.3	83.70	1.12	91.69
13	4	9	13.1	86.90	1.01	92.50
22	4	9	12.5	87.50	0.9	93.32
10	6	8	5.81	94.19	0.52	96.14
18	6	8	5.78	94.22	0.49	96.36
20	6	8	5.5	94.50	0.43	96.81
8	6	8	5.48	94.52	0.41	96.96
11	6	8	5.42	94.58	0.4	97.03
21	6	8	5.33	94.67	0.36	97.33
4	8	7	4.9	95.10	0.32	97.62
5	9	8	4.46	95.54	0.31	97.70
3	8	7	4.32	95.68	0.29	97.85
7	9	8	4.01	95.99	0.21	98.44

15	6	6.5	2.7	97.30	0.2	98.52
14	6	6.5	2.58	97.42	0.18	98.66
1	3	8	2.52	97.48	0.17	98.74
16	4	7	2.3	97.70	0.17	98.74
12	3	8	2.27	97.73	0.16	98.81
9	4	7	2.24	97.76	0.15	98.89

En la Tabla 23, se evidencia las dos variables (pH y dosis del coagulante), con sus variables de respuestas, donde el diseño CCD reveló una combinación de 4 ml de coagulante y un pH 7, de se logró una remoción máxima de 97.76 % de remoción de turbidez y 97.03 % de remoción de SST; así mismo una combinación de 6 ml y un pH de 9.5 obtuvo una remoción de mínima de 69.2 % y 82.92 % respectivamente.

- **Variable de respuesta 1 (V1): % de Remoción de Turbidez**

Realizado el ingreso de variables de respuesta se inició con el análisis de varianza (ANOVA) significativo con un p-value inferior a 0.0001, donde se identificó factor por factor, interacciones, modelos cuadráticos y cúbicos demostró un modelo sólido, donde tanto los dos factores A y B, demuestran su significancia con valores ≤ 0.0001 , sin embargo la interacción AB demuestra un efecto no significativo en el modelo, con un p value de 0.0128, lo que sugiere que hay un efecto combinado entre ambos factores pero no es relativamente fuerte como los demás, esto incidente puede demostrar que la dosis de coagulante influye menos que el pH en la variable de respuesta, no es estrictamente lineal, sino un tanto más compleja. En la Tabla 25, se realizó el análisis del modelo mediante el ajuste estadístico en

demuestra un R^2 de 0.9988 y un R^2 predicho de 0.9966 confirmando la confiabilidad del modelo y su optimación de esta. El CV indica 0.382, la baja dispersión, resalta la alta precisión de las mediciones.

Tabla 24.

ANOVA del modelo CCD TA VI.

Fuente	Suma de Cuadrados	de df	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Model	1468.97	7	209.85	1714.77	< 0.0001	significativo
A-Dosis Coag.	3.39	1	3.39	27.66	0.0001	
B-pH	773.4	1	773.4	6319.63	< 0.0001	
AB	0.994	1	0.994	8.12	0.0128	
A ²	15.17	1	15.17	123.94	< 0.0001	
B ²	309.9	1	309.9	2532.3	< 0.0001	
A ² B	56.5	1	56.5	461.69	< 0.0001	
AB ²	3.5	1	3.5	28.61	0.0001	
A ³	0	0				
B ³	0	0				
Residual	1.71	14	0.1224			
Lack of Fit	0.6605	1	0.6605	8.16	0.3272	no significativo
Pure Error	1.05	13	0.081			

Cor Total 1470.69 21

Tabla 25.

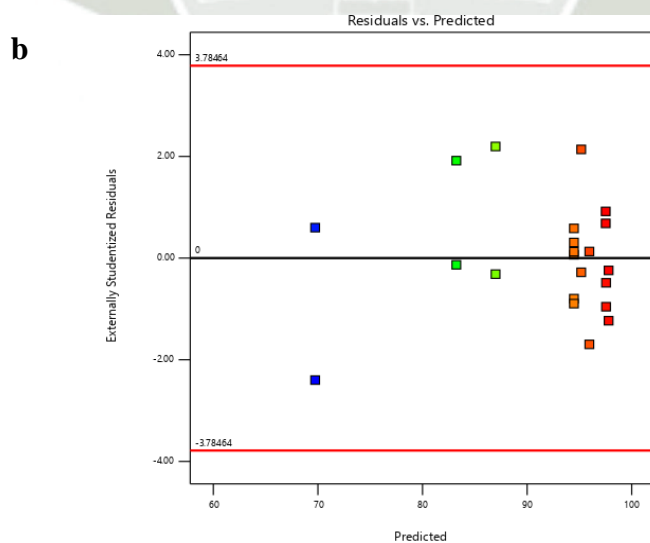
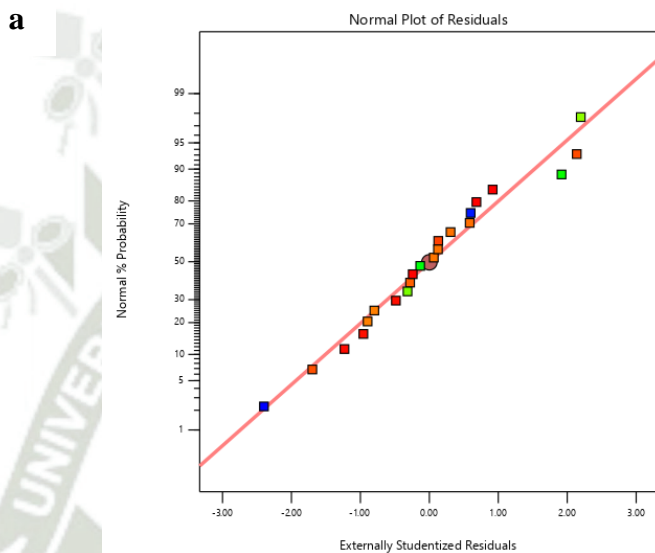
Ajuste estadístico del CCD TA VI.

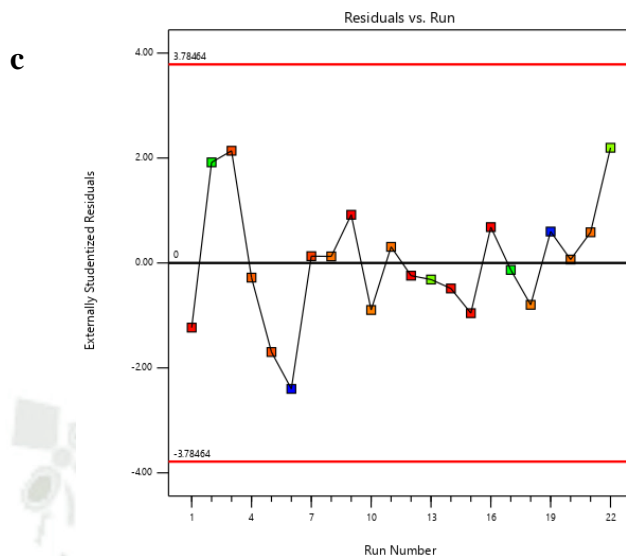
Std. Dev.	0.3498	R²	0.9988
Mean	91.58	Adjusted R²	0.9983
C.V. %	0.382	Predicted R²	0.9966
		Adeq Precision	132.9907

En la Figura 19 se muestran los Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez alta (100 NTU). Figura 19 (a), Normal Plot of Residuals; se observa que los residuos siguen una distribución normal, debido a su alineación con la línea diagonal; lo que indica que si cumple con el supuesto de normalidad. Figura 19 (b), Residuals vs. Predicted; demuestra una mayoría de los residuos distribuidos en torno a la línea central cero, explicando que no existen sesgos sistemáticos en los datos y una varianza homogénea. Figura 19 (c), Residuals vs. Run; muestra que los residuos no presentan tendencias definidas en la ejecución del experimento, lo que manifiesta una adecuada aleatorización en la recolección de datos y la ausencia de influencias externas; estos resultados confirman un adecuado ajuste del modelo y la validez de los supuestos estadísticos para la variable de respuesta 1 (% de remoción de turbidez).

Figura 19.

Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez alta (100 NTU) - variable de respuesta 1 (% de remoción de turbidez).

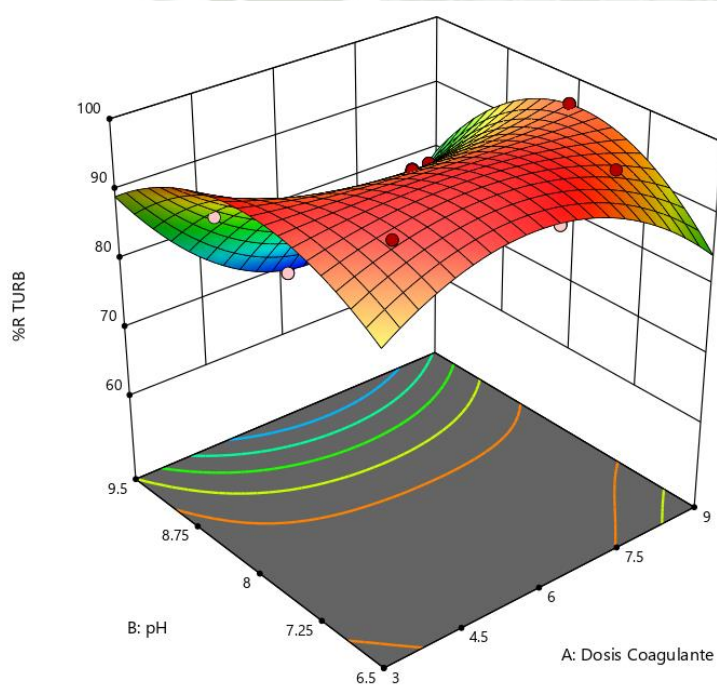
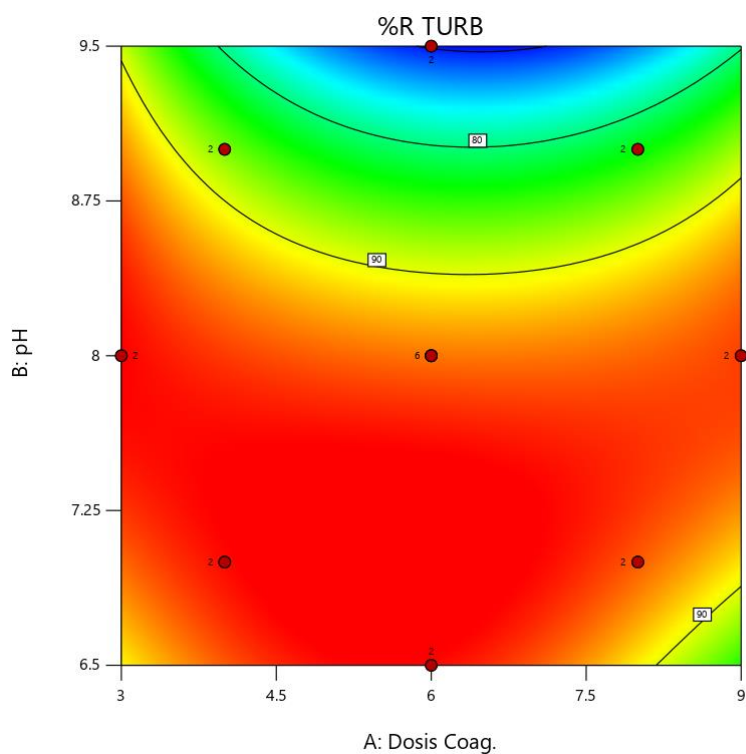




Los resultados de la Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de turbidez en TA V1, se visualiza en la Figura 20, en la cual se observa que la mayor eficiencia se encuentra en niveles de tanto altos como bajos; sin embargo, un nivel medio del coagulante reduce la remoción. En caso del pH este demuestra mayor eficiencia en rangos neutros, a mitad que el pH disminuye y la dosis del coagulante baja la efectividad retoma potencia, indicando optimización entre ambas variables

Figura 20.

Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de TA VI.



- **Variable de respuesta 2 (V2): % de Remoción de Sólidos Suspendedos Totales – SST**

En la Tabla 26, se presenta el ANOVA con respecto a la turbidez alta con variable de respuesta 2 (SST), el modelo es altamente significativo el p value fue inferior a 0.0001, indicando que los factores e interacciones explican su variabilidad de respuesta, en caso del pH es un factor de gran impacto con un valor igual que el modelo; sin embargo, la dosis de coagulante muestra un valor p de 0.095, no significativo, a pesar de que el modelo cuadrático si, este da intuición de que la efectividad es sólida sin embargo su efecto no es tan determinante como el pH. El Lack of fit es no significativo p 0.3272, indica que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos y no requieren términos adicionales. Así mismo, la Tabla 27 , demuestra el ajuste estadístico con un R² de 0.9897, un R² predictivo de 0.9798 y un CV de 0.6088 lo que significa que alta capacidad predictiva.

Tabla 26.

ANOVA del modelo CCD TA V2.

Fuente	Suma de Cuadrados	de df	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Model	453.18	7	64.74	191.91	< 0.0001	significativo
A-Dosis Coag.	1.08	1	1.08	3.21	0.095	
B-pH	240.72	1	240.72	713.57	< 0.0001	
AB	0.1152	1	0.1152	0.3415	0.5683	

A ²	5.28	1	5.28	15.64	0.0014	
B ²	95.35	1	95.35	282.65	< 0.0001	
A ² B	18.66	1	18.66	55.32	< 0.0001	
AB ²	0.759	1	0.759	2.25	0.1558	
A ³	0	0				
B ³	0	0				
Residual	4.72	14	0.3373			
Lack of Fit	0.3488	1	0.3488	1.04	0.3272	no significativo
Pure Error	4.37	13	0.3365			
Cor Total	457.9	21				

Tabla 27.

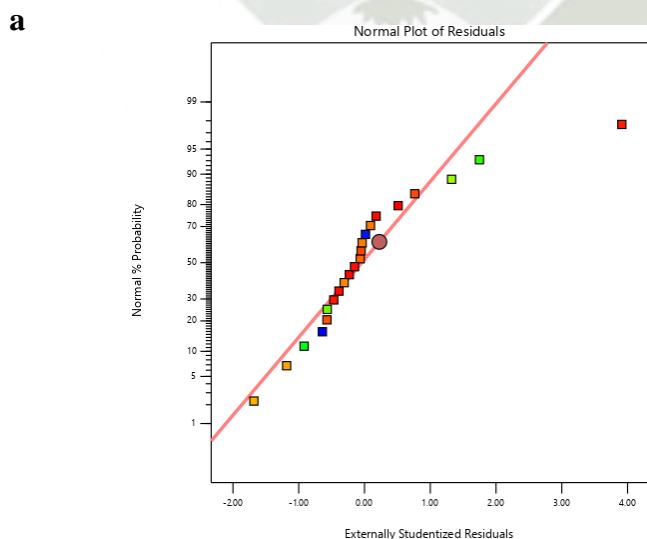
Ajuste estadístico del CCD TA V2.

Std. Dev.	0.5808	R²	0.9897
Mean	95.4	Adjusted R²	0.9845
C.V. %	0.6088	Predicted R²	0.9798
		Adeq	44.8262
		Precision	

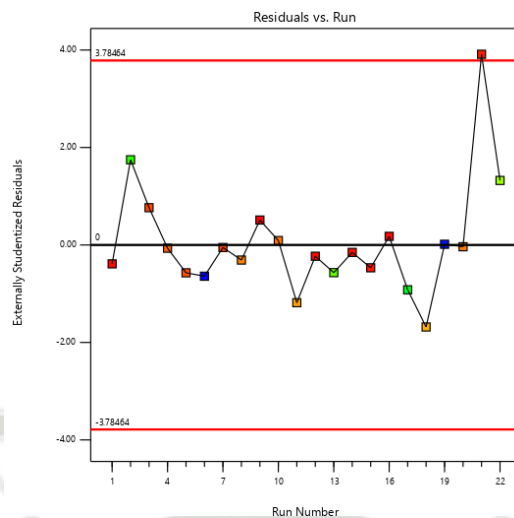
En la Figura 21, se observa los Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez alta (100 NTU). Figura 21 (a), Normal Plot of Residuals; se obtiene que la mayoría de los residuos siguen en su mayoría una distribución normal, debido a su cercanía con la línea diagonal; lo que indica que si cumple con el supuesto de normalidad. Figura 21 (b), Residuals vs. Predicted; se aprecia una dispersión mayoritaria aleatoria de los residuos en torno a la línea central cero, lo que no existe sesgos sistemáticos en los datos y una varianza homogénea. Figura 21 (c), Residuals vs. Run; muestran que los residuos no presentan patrones definidos en la ejecución del experimento, obteniendo una adecuada aleatorización en la recolección de datos y la ausencia de influencias externas; estos resultados confirman un adecuado ajuste del modelo y la validez de los supuestos estadísticos para la variable de respuesta 2 (% de remoción de sólidos suspendidos totales – SST).

Figura 21.

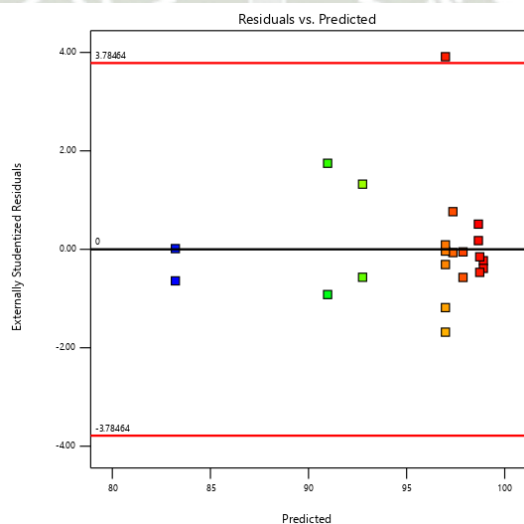
Diagramas de Diagnóstico para el proceso con turbidez alta (100 NTU-sst).



b



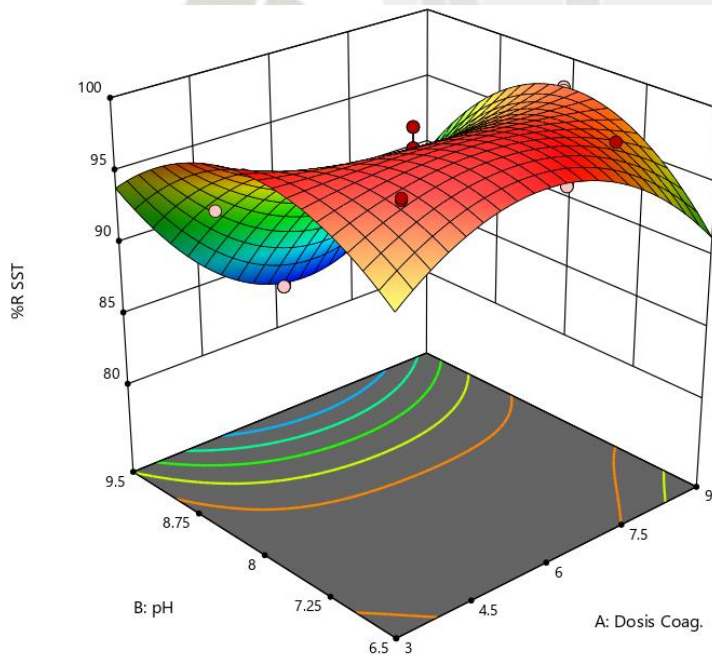
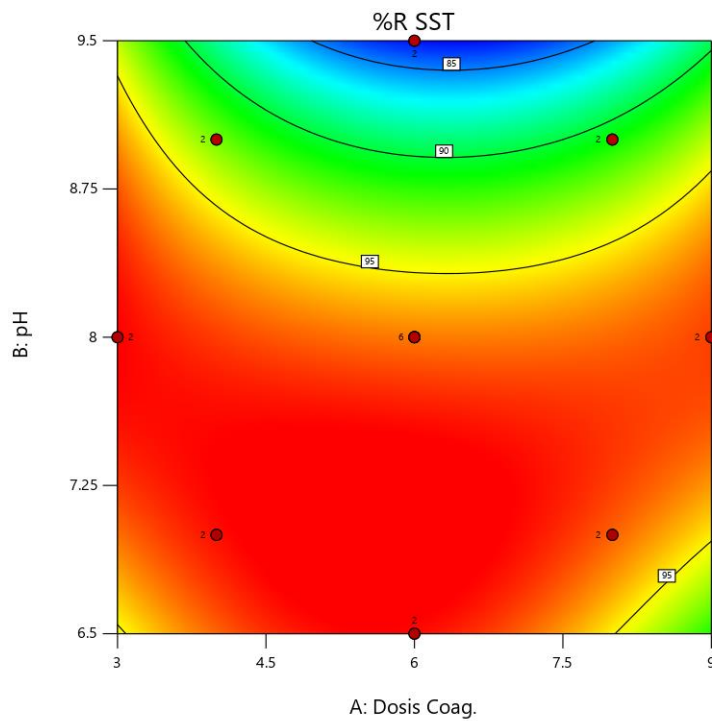
c



Los resultados del Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de TA SST V2, se visualiza en la Figura 22, se identifica que a dosis ligeramente elevadas la remoción se maximiza, lo mismo ocurre con el pH más alcalino presten mejor rendimiento; sin embargo, las variaciones de extremas de pH parecen ser menos sensibles en la remoción de SST ya que el rango es mucho más amplio.

Figura 22.

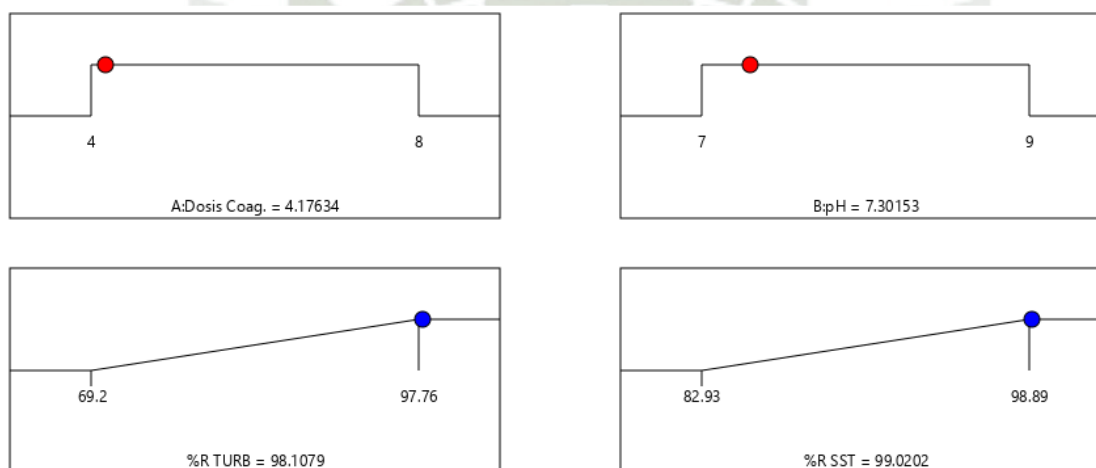
Contorno y Superficie de respuesta 3D del % de remoción de SST en TA V2.



Finalmente, el proceso de optimización numérica en turbidez alta fue desarrollado por el software Design Expert para lo cual se colocó el pH y Dosis de coagulante en rango y se máximo el % de remoción tanto para la Turbidez y SST, Figura 23, los resultados obtenidos demostraron que una combinación de 4.17 ml Dosis de Coagulante a un pH 7.30 se logrará remover hasta un 98.11 % de turbidez y un 99.02 % de SST en ATS media.

Figura 23.

Optimización del CCD en Turbidez Alta.



Ambos escenarios presentan retos distintos (Turbidez media y Turbidez alta), los modelos numéricos optimizados demuestran que ambos factores juegan un rol importante, crucial para maximizar su rendimiento; en cuanto a turbidez media una combinación de (5.98 ml) y pH (7.4) se destaca por un consumo distinto a diferencia de la Turbidez alta. Lo que indica que la necesidad de desestabilizar las partículas coloidales están ligadas potencialmente en la neutralización de cargas y formación de flóculos este proceso es crítico en el desarrollo del proceso coagulación-floculación Benalia et al. (2024), en cuando la

concentración de partículas es menor sus características requieren un estímulo químico mayor para lograr una remoción más efectiva. Caso contrario sucede lo contrario las concentraciones de partículas coloidales elevadas o turbidez alta esta favorecen en la formación de flóculos permitiendo obtener una remoción efectiva con una dosis de coagulante menor (4.18 ml), la abundancia de partículas favorece su contacto y aglomeración; así mismo se evidencia que el pH (7.3) disminuye ligeramente a diferencia del coagulante esto podría reflejar que el coagulante se diluye en el volumen total de agua afectando ligeramente el pH su efecto es moderado y se ve contrarrestado por la solución.

- *Z potencial*

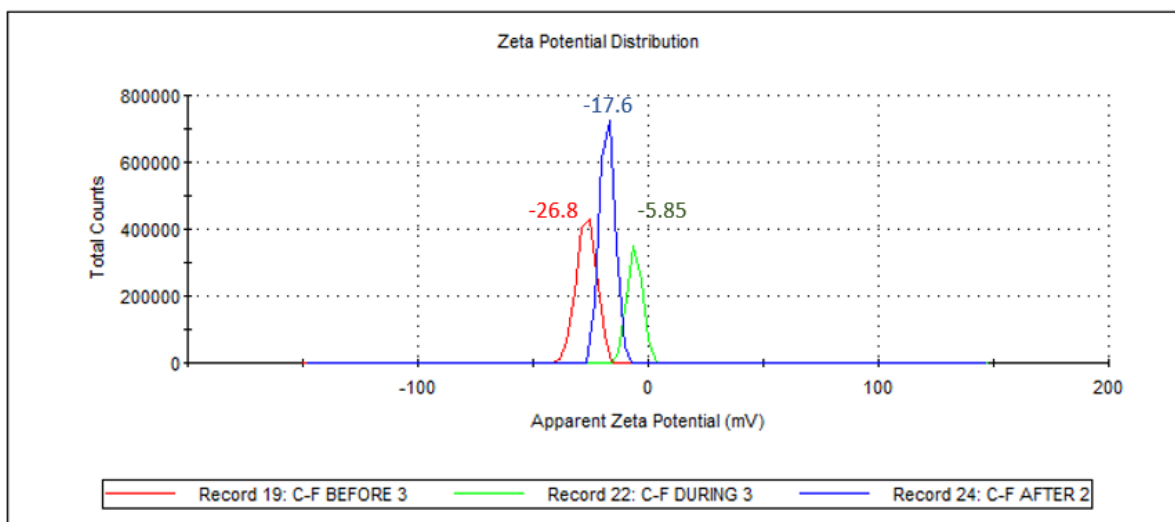
En análisis de Z potencial para verificar que tipo mecanismo de coagulación floculación que genera nuestro coagulante dentro del ATS, se realizó mediante las mediciones del Z potencial antes, durante y después del proceso de coagulación – floculación, para ello se tomaron muestra en cada etapa del proceso y con los siguientes resultados

Figura 24. Se describe en el eje X el z potencial (mV) y en el eje Y la frecuencia o número de partículas, el z potencial inicial del ATS fue de -26.8 mV, durante el proceso se observó la neutralización de cargas obteniendo un valor de -5.85 mV y finalmente después del proceso se obtuvo un valor de -17.6 mV, resolviendo las dudas sobre el mecanismo que promueve el coagulante de Tara. En la investigación de Tomasi et al. (2025), al igual que esta se evalúa el tipo de mecanismos de coagulación que realiza su coagulante natural; aunque el proceso de obtención sea diferente se menciona una neutralización de cargas y evidencia la disminución significativa del z potencial como en la

Figura 24, antes y durante del proceso; sin embargo, ellos no evalúan el proceso finalizado. A pesar de ello en la investigación de Kristianto (2021), menciona que la neutralización de carga debe considerarse el comportamiento químico de la muestra, donde las combinaciones al finalizar el proceso reorganizan las cargas por diferentes motivos como el exceso o redistribución del coagulante inclusive la capacidad tampón del medio, es por lo que el z potencial final no lleva a bajar más, en cambio esta encuentra un equilibrio electrostático final.

Figura 24.

Distribución Z potencial en el proceso de Coagulación- Floculación.



- *Comparación con el Sulfato de Aluminio*

Para iniciar la comparación entre el sulfato de Aluminio (SA) y el coagulante de Tara (CT), se disolvió 5 g de SA en 100 ml de agua destilada, con el fin obtener la misma

concentración que el coagulante de Tara, además se realizaron pruebas en ATS con mediana y alta turbidez, los resultados pueden ser visualizados en la

Tabla 28, así mismo se utilizó los parámetros iniciales y resultado del optimizado obtenida a partir de cada nivel de turbidez estudiada.

Tabla 28.

Cuadro Comparativo SA/CT.

Nivel de turbidez (NTU)	Coagulante	R1	R2	R3	$\bar{x} \pm DS$
		NTU	NTU	NTU	
50	SA	2.73	2.42	2.65	2.6±0.16
	CT	2.54	2.69	2.67	2.63±0.08
100	SA	5	6.1	5.5	5.53±0.55
	CT	2.41	2.5	2.31	2.4±0.1

Tabla 28, muestra la turbidez residual a partir del nivel de turbidez inicial, donde se aprecia que, con una turbidez mediana se obtuvo un rendimiento a la par del coagulante del germen de Tara, con valores obtenidos de 2.6 y 2.63 NTU de turbidez residual respectivamente, demostrando su eficiencia y solidez del producto. En cambio, con una turbidez alta, el coagulante de Tara presenta mejores resultados a comparación que el sulfato de aluminio, donde de obtuvo 5.53 y 2.51 NTU de turbidez residual respectivamente, sobrepasando el potencial del sulfato de aluminio e incitando a un mejor producto en busca de un cambio sostenible.

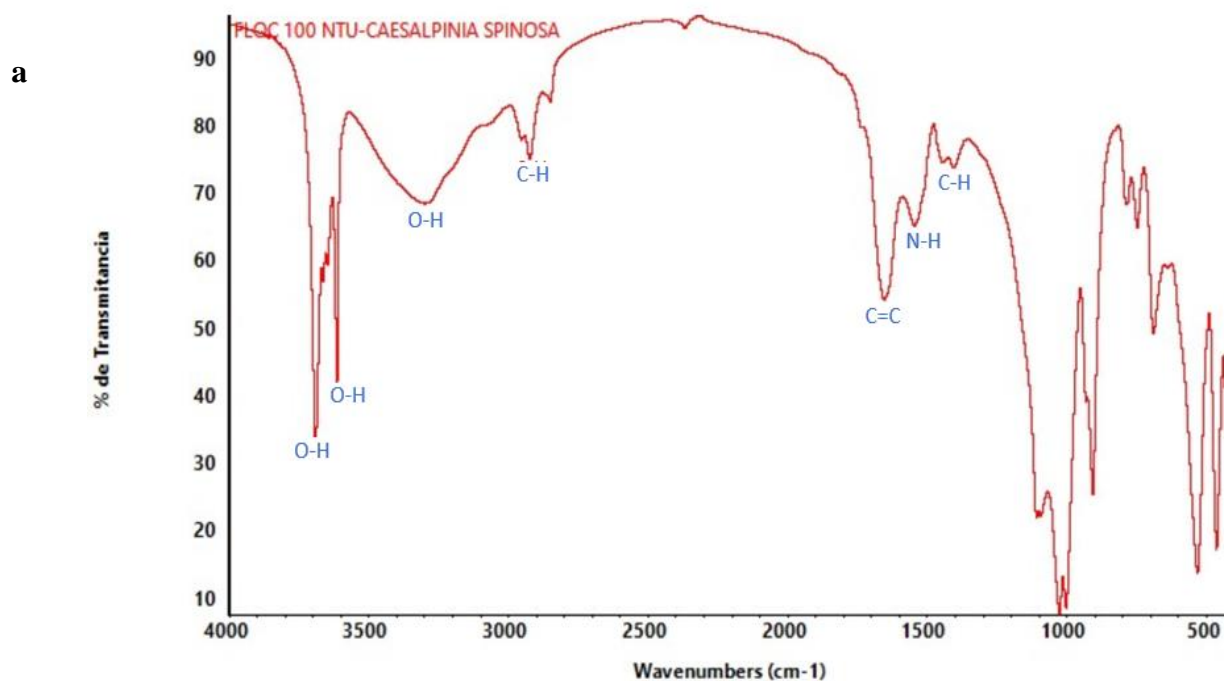
- *Análisis FTIR de flóculos secos formados por el Coagulante natural y Sulfato de Aluminio*

En la Figura 25 se observan los espectros FTIR de los flóculos formados con el CT, y el sulfato de aluminio (SA). Dentro de los grupos funcionales descritos anteriormente partir del polvo del germen de Tara (Tabla 12), se observa una variación significativa específicamente en el grupo funcional de los ésteres (Figura 25 a), la cual desaparece su banda y grupo funcional; así mismo, según Kurniawan et al. (2022), este cambio puede deberse a una posible interacción o transformación en el mecanismo rompiendo parcialmente o complemente, recordando la vulnerabilidad de este grupo estos y convirtiéndose en ácidos carboxilos o alcoholes, sugiriendo que el proceso modifico su química original. En contraste el análisis del sulfato de aluminio (Figura 25 b) y los flóculos formados (Figura 25 c), se evidencia un nuevo grupo funcional identificado como amidas de tipo I, lo que puede atribuirse a la degradación de parcial de algún compuesto dentro de su grupo funcional y favoreciendo a la formación de compuestos poliméricos o la interacción con materia orgánica como es el agua, conduce a la formación de grupos amida modificando el perfil espectral del resultado final. Ambas figuras (a) y (c), corresponde a los flóculos formadas, claro está que su naturaleza es muy distinta, una es orgánica comprende una serie diversos de grupos funcionales mientras que la otra de naturaleza química comprende un solo grupo funcional clave para la formación de flóculos estables en el tratamiento.

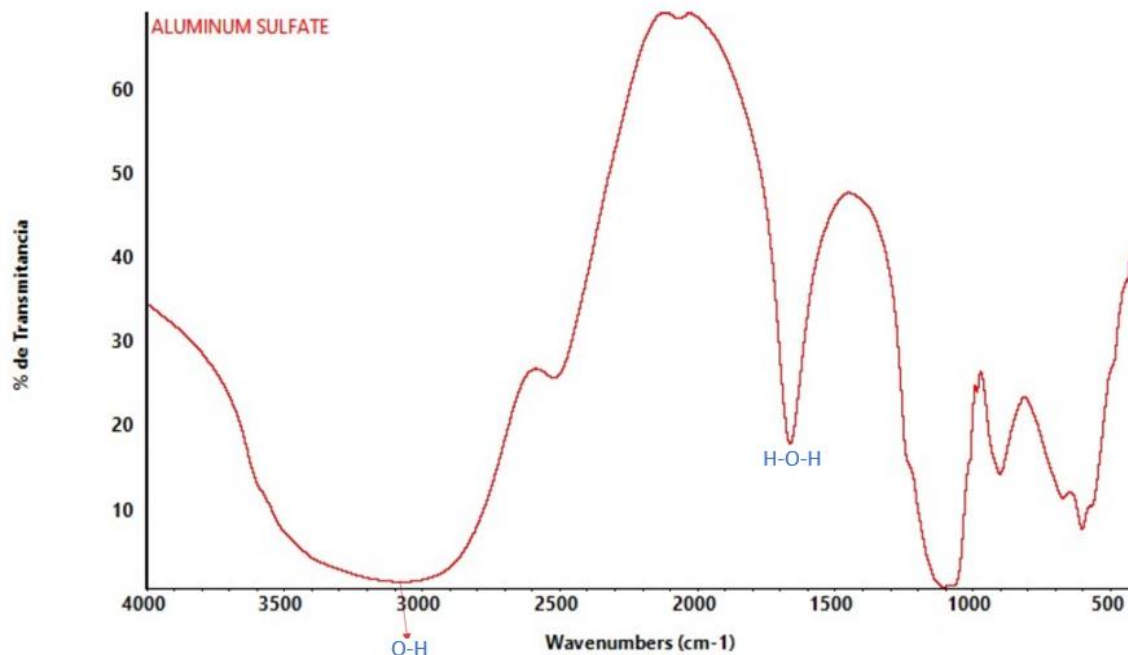
Dentro de los grupos funcionales descritos anteriormente, se observa una variación significativa en los ensayos con *Caesalpinia spinosa*, específicamente en el grupo funcional de los ésteres, el cual desaparece en los espectros FTIR cuando la concentración de turbidez es de 100 y 50 NTU; este cambio se puede deber a una posible interacción o transformación química debido al mecanismo de coagulación. En contraste, en los ensayos con sulfato de aluminio, se evidencia la aparición de un nuevo grupo funcional en las muestras con 50 y 100 NTU, identificado como Amidas I; lo que podría indicar la formación de nuevas interacciones químicas entre el coagulante y los compuestos presentes en la solución.

Figura 25.

Espectro FTIR de flóculos formados por CT y SA.



b



c

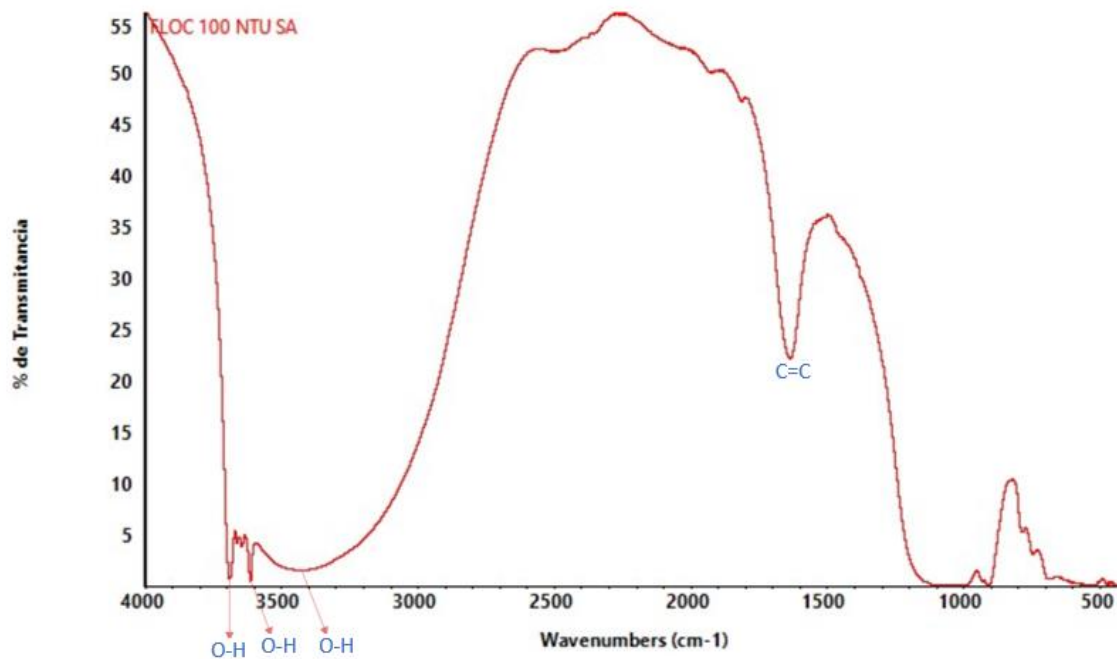


Tabla 29.

Bandas IR característica de flóculos de CT.

Banda Infrarroja (cm⁻¹)	Intervalo de Frecuencia de Banda Infrarroja (cm⁻¹)	Enlace	Grupo funcional	Tipo de compuesto
3696	3650 - 3600	O-H	Hidroxilos	Alcoholes, fenoles
3620				libres
3305	3500 - 3200			Alcoholes, enlaces H
2928	3000 - 2850	C-H	Alifáticos	Alcanos (tensión)
1658	1670 - 1640	C=C	Amidas I	Amidas
1550	1640 - 1550	N-H	Amidas II	Aminas y amidas primarias y secundarias (flexión)
1410	1450 - 1400	C-H	Alifáticos	-CH ₃ - (flexión), -CH ₂ - (flexión)

Tabla 30.

Bandas IR característica del SA.

Banda Infrarroja (cm⁻¹)	Intervalo de Frecuencia de Banda Infrarroja (cm⁻¹)	Enlace	Grupo funcional	Tipo de compuesto
---	--	---------------	------------------------	--------------------------

3073	3600 – 3000	O-H	Hidroxiolos
1667	1700 – 1600	H-O-H	

Tabla 31.

Bandas IR característica de flóculos de SA.

Banda Infrarroja (cm⁻¹)	Intervalo de Frecuencia Banda Infrarroja (cm⁻¹)	de Enlace	Grupo funcional	Tipo de compuesto
3696	3650 – 3600	O-H	Hidroxiolos	Alcoholes, fenoles
3620				libres
3424	3500 – 3200			Alcoholes, enlaces H
1644	1670 – 1640	C=C	Amidas I	Amidas

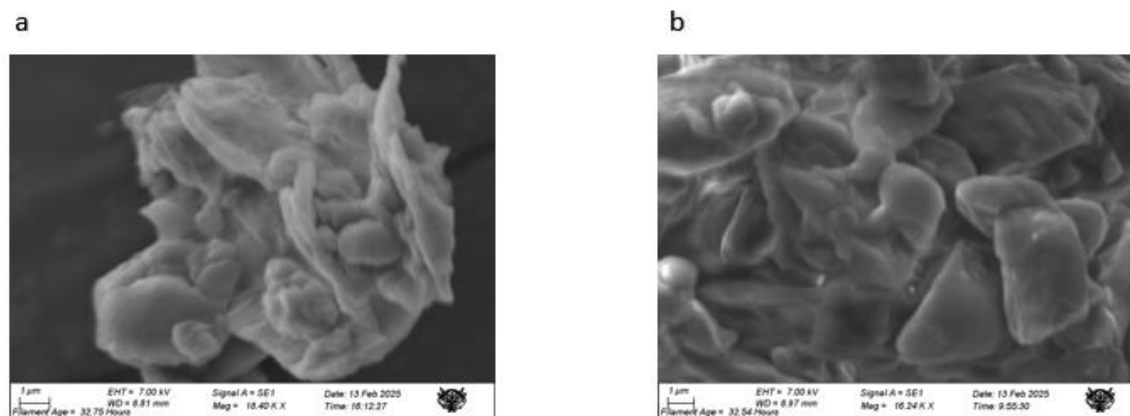
- Caracterización Morfológica microscópica de los flóculos formados por el coagulante de Tara y sulfato de aluminio

El análisis de los flóculos formados tanto por el coagulante natural y el sulfato de aluminio se evidencia en la Figura 26, ambos flóculos se encuentran en la escala micrométrica (1µm), se aprecian en ambos una morfología irregular y robusta típica de un proceso de coagulación; sin embargo, en la Figura 26 (a) se observa una morfología ligeramente laminar y porosa, recordemos que en la Figura 6, donde se describió la morfología del polvo se apreciaba una estructura de aglomeraciones esféricas, esto sugiere

una sobreposición laminar producto de la adsorción de las partículas coloidales, teniendo como resultado una estructura más abierta, típica de biopolímeros las cuales generan puentes entre partículas formando capas con abundantes sitios de interacción Darshan et al. (2020). En cambio, los flóculos a base de sulfato de aluminio (Figura 26 (b)) se observa un aspecto más compacto y granular, con menor porosidad visible y superficies más densas, lo que sugiere una superposición más compacta a diferencia de los flóculos de origen natural, formando sedimentos cristalinos o menos laminares.

Figura 26.

Representación Morfológica de los flóculos del CT y SA



Nota. (a) Flóculos formados por CT y (b) Flóculos formados por SA. Obtenidas de MEB proveniente de la UCSM.

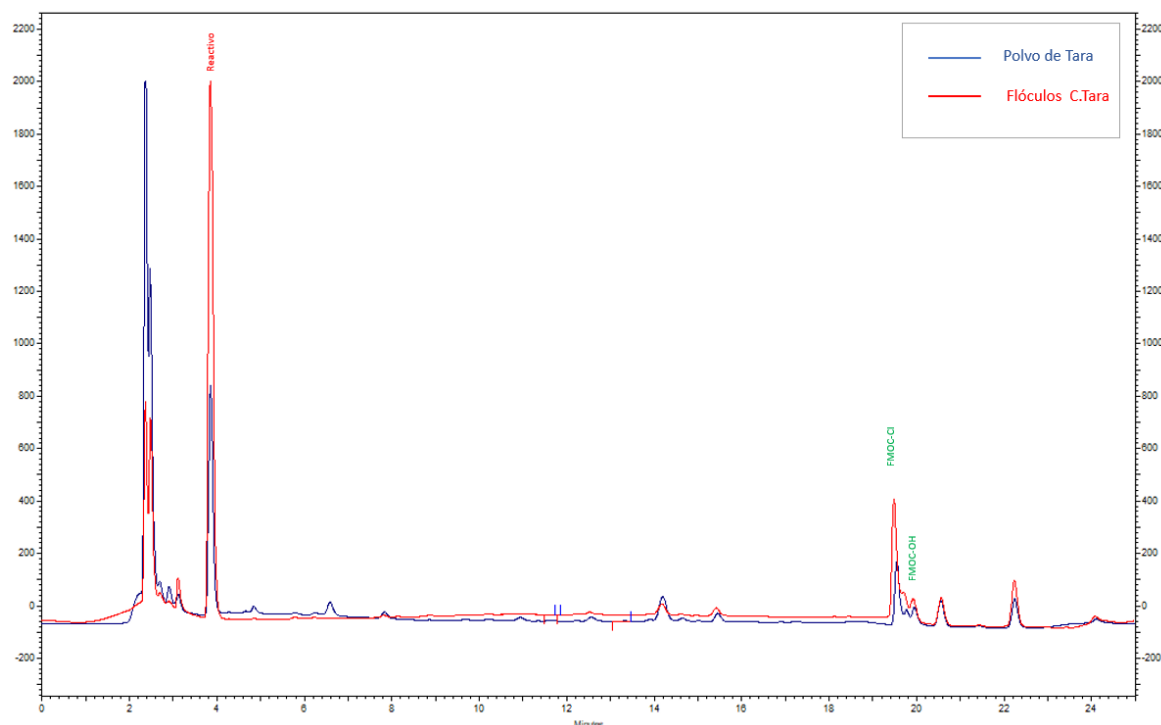
- **Análisis de HPLC de flóculos formados por el Coagulante de Tara**

En este cromatograma HPLC se comparan dos perfiles el antes y después del uso del coagulante, en los picos formados de color azul corresponden a la materia prima del coagulante mencionado con anterioridad en la Figura 7 y los picos de color rojo corresponden

a los flóculos posterior al proceso de coagulación – floculación. Se observa inicialmente picos muy determinados, intensos durante el tiempo de retención; sin embargo luego del proceso de coagulación floculación los picos se ven atenuados o incluso ausentes en algunos casos, lo que sugiere que parte del compuesto fue consumido o adherido a la fracción soluble, Según la investigación de Dotson & Westerhoff (2009), sugiere que el consumo de aminoácidos es frecuente en procesos que conlleven el tratamiento de aguas, las cuales pueden ser beneficiosas en procesos de desinfección en escalas aún más grandes, este concepto respaldando que los componentes activos del coagulante de Tara tales como la arginina y ácido glutámico participan en el proceso de coagulación floculación reduciendo su presencia en la fase soluble y removiendo parámetros como turbidez, SST y color el agua para el consumo humano.

Figura 27.

Cromatograma comparativo del Polvo de Tara y flóculos formados.



- ***Comparación del Producto Optimizado en muestras de Agua de Río y su desempeño funcional***

Se realizó la última serie de tratamientos con agua de río captada de la bocatoma de la PTAP, la cual presentó una turbidez inicial alta de 215 NTU y un pH de 7.24 para ello se tomó en cuenta los parámetros iniciales y el producto optimado referente a la turbidez alta, mediante un triplicado se obtuvo los siguientes valores que se muestran en la Tabla 32, donde se evidencia que la turbidez final cumple con los requisitos del DS 031-2010, con una remoción de 98.51 % de turbidez (turbidez residual de 3.2 NTU) por debajo de la LMP de 5 NTU establecidos para el consumo humano, este producto cumple con el reglamento y su finalidad. En caso del SST a pesar de que este no sea un parámetro analizado dentro del

reglamento este es responsable en parte de la turbidez y el color del agua, su exceso puede ser nocivo para la salud generando presencia de microorganismo y contaminantes, además pueden generar obstrucciones en los tratamientos de agua causando el deterioro de filtros y un mal aspecto en el consumo, el CT logró una remoción de hasta un 98.90 % con un SST residual de 2.8 mg/L, incluyendo su efectividad dentro de este parámetro.

Tabla 32.

Evaluación de CT en muestras de Río.

Muestra	Parámetros	Inicial	Final	Remoción, %
	pH, unidades	7.24	7.02	-
Agua de Río	Turbidez, NTU	215 ±2.4	3.2 ±1.2	98.51 %
	SST, mg/L	254 ±0.2	2.8 ±0.5	98.90 %

- ***Aspectos Ambientales y su potencial Aplicación en Cuerpos de Agua Natural***

El rendimiento del coagulante natural optimizado justifica su aplicabilidad dentro de sistemas de tratamiento de agua para el consumo humano. Sin embargo la duda de considerarlo tóxico es relativamente nula, al igual que muchos coagulantes naturales, estudios previos los consideran no nocivos por el origen natural, Según Mohamed Noor & Ngadi (2024), el cual realizaron la revisión sistemática de publicaciones relacionadas a la evaluación de ecotoxicidad a partir coagulantes naturales y metálicos, considera menos

nocivos en comparación a los coagulantes metálicos, la presencia mayoritaria del activo proteico dentro del coagulante y principal agente, se caracteriza por la degradación o desnaturalización constante, la descomposición de este no presenta un riesgo o impacto ecotoxicológico, donde las propiedades ya analizadas del coagulante en frente a diferentes niveles de turbidez y pH demostraron un buen grado de eficacia, la carga como también tanto como demás procesos consecutivos logran mejorar aún más el producto final.

Las concentraciones utilizadas son muy bajas para una posible reacción negativa. Así mismo se mencionan los posibles beneficios que este produce en la investigación de Benalia et al. (2024), donde la mayoría de coagulantes naturales no afecta significativamente el pH, siendo un factor sólido favorable para el coagulante de tara, debido a su propiedades químicas en comparación a los coagulantes químicos, reduciendo el consumo de soda caustica para su modificación. El coagulante de Tara genera un producto final libre de sales metálicas, beneficiosos para los demás procesos llevados a cabo en la potabilización, no daña ni corroe los sistemas de distribución. Kalibbala et al. (2023) mencionan que el volumen de lodos residuales provenientes de un coagulante orgánico genera hasta un 50 % menos que un coagulante químico, reduce la huella de carbono provenientes del transporte de estos y un manejo más seguro para los operarios.

Para finalizar su aplicación o ingreso al cuerpos de agua locales con finalidad de consumo humano, se debe analizar desde una perspectiva de disponibilidad y sostenibilidad, se evaluó la presencia de este material en el Sur del Perú, siendo este pionero el máximo exportador de la materia prima, además de ofrecer un cambio o alternativa sostenible y ecológica, minimizando la producción de residuos, como el cumplimiento estricto de las

normativas ambientales, como la incursión en el mercado de plantas de tratamientos de aguas residuales, una idea tentativa, que países europeos ya ponen en uso estas medidas donde la posibilidad de implementar circuitos de producción y uso del coagulante se alineen a una economía circular, un claro ejemplo es la empresa Veolia Environnement, (multinacional francesa), la cual realiza actividades en áreas de tratamientos, servicios y administración en gestión de agua para entidades gubernamentales, esta presenta una visión sostenible, hace uso de coagulantes naturales y realiza los lodos orgánicos para la producción de biocompost al sector agrícola de su localidad. En la investigación de Koul et al. (2022), mencionan que muchos de estos lodos generados a partir de coagulantes naturales ayudan en la fertilidad de suelos, crecimiento y producción de cultivos.

- ***Comparación con otros coagulantes naturales.***

En esta investigación se destaca por la obtención resultados entre el 96 % y el 98 % de remoción de turbidez en dosis muy bajas y un pH casi neutro superando o igualando la eficacia de otros coagulantes naturales que requieren dosis más altas o ajustes extremos de pH Tabla 33. A diferencia de la moringa u otros extractos que funcionan mejor a pH ácido o alcalino, la tara funciona en condiciones típicas de agua cruda sin correcciones previas, lo que reduce costos y facilita su aplicación. Además, su alta actividad genera un menor volumen de lodos y aprovecha un recurso abundante en la región andina, posicionándola como una alternativa sostenible y económicamente competitiva para el tratamiento de agua potable.

Tabla 33.

Comparación con otras investigaciones de coagulantes naturales

Coagulante Natural	Parte usada	Dosis Optima	pH Optimo	Valor Inicial, NTU	Eficiencia de eliminación, %	Referencia
<i>Moringa Oliefera</i>	Semilla	60 mg/L	7.95	47	78.09	(Deswal et al., 2023)
Okra	Semilla	80 mg/L	7.95	47	75.96	(Deswal et al., 2023)
Papaya	Semilla	20 mL/L	6	115.49	96.19	(Yimer & Dame, 2021)
Lens culinaris	Semilla	26.3 mg/L	4	800	98.87	(Chua et al., 2019)
Pez diablo	Pulpa	800 mg/L	8.17	>1000	74	(Aguilera Flores et al., 2022)
<i>Moringa Oliefera</i>	Semilla	400 mg/L	6.5	648	65.6	(Deepa et al., 2022)
Frijol verde	Semilla	10 g/L	7-11	250	95.57	(Owodunni et al., 2024)
Nuez	Semilla	3 mL/L	8-11	20-202	91-98	(Zedan et al., 2022)
<i>Artocarpus heterophyllus</i>	Casacara	2.13 g/L	3.98	200	94.78	(Mardarveran & Mokhtar, 2020)
<i>Caesalpinia spinosa</i>	Semilla	5.4 mL/L	7.6	50	96	En este estudio
<i>Caesalpinia spinosa</i>	Semilla	4.3mL/L	7.2	100	98	En este estudio

- *Desafíos.*

A pesar de los resultados positivos, se identificaron algunas limitaciones en el método y en su aplicación a escala real, como la variabilidad en la calidad de las semillas de tara puede afectar la reproducibilidad de la dosis óptima. En ensayos a escala piloto, el manejo y la deshidratación de lodos aún no están completamente optimizados, lo que podría incrementar el costo del proceso. Por último, la adaptación a los sistemas de coagulación industriales requiere pruebas adicionales para confirmar que los resultados obtenidos en el laboratorio se mantienen en volúmenes mayores.

-*Escalabilidad del tratamiento.*

Los resultados de laboratorio y los experimentos piloto indican que la semilla de tara es un coagulante natural viable para plantas de tratamiento de agua a gran escala. Su implementación requiere una logística adecuada de recolección y procesamiento, un análisis económico riguroso y un diseño de planta adaptado a sus características específicas. Sin embargo, los beneficios ambientales, sociales y de salud pública, junto con la posible reducción de lodos tóxicos, convierten a esta tecnología en una alternativa sostenible a los coagulantes sintéticos convencionales. La propuesta propone un sistema escalable que integra la extracción continua asistida por ultrasonidos de coagulantes de semilla de Tara, logrando hasta un 30% más de rendimiento y reduciendo la dosificación de materia prima, con un reactor de coagulación-floculación modular de flujo continuo que facilita la expansión añadiendo módulos sin rediseñar toda la planta, y un aprovechamiento de los lodos generados como compost agrícola, cerrando el ciclo del recurso y mejorando la viabilidad económica y ambiental en el tratamiento de decenas de miles de metros cúbicos por día.



CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Las conclusiones a las que se llegó después de los resultados obtenidos son las siguientes.

PRIMERO: La caracterización de las muestras provenientes de la bocatoma de la PTAP, reveló que la mayoría de los parámetros se encuentran dentro de los LMP permitidos por el DS 031-2010; sin embargo, la turbidez excede significativamente en las dos tomas realizadas a los valores establecidos, este exceso conlleva un riesgo para la calidad de agua para el consumo humano y favorece a la proliferación de microorganismos, dificultando la eficiencia en los procesos posteriores de la planta de tratamiento.

SEGUNDO: El análisis integral de la semilla de Tara y el coagulante demostraron factores como el contenido de humedad bajo, grupos funcionales esenciales, parámetros fisicoquímicos neutros, estructura morfológica irregular, contenido de aminoácidos adecuados y un potencial Z eficiente para el proceso de coagulación floculación. En conjunto todos estos resultados respaldan la viabilidad y sostenibilidad del coagulante natural de Tara en las aplicaciones de tratamiento de agua.

TERCERO: El análisis del ATS demuestra confianza en la serie de experimentación presentando una sedimentación ligera. El diseño fraccionado 2^{5-1} aplicado tuvo contundentes resultados a pesar de las variables evaluadas, solo los factores críticos fueron el pH y el nivel de turbidez, todo esto fue válido a través del ANOVA, diagrama de Pareto y los diagramas

de diagnóstico, donde el modelo explica casi el 99 % de variabilidad y un CV de 3.66 %, respaldando operatividad para su optimización.

CUARTO: La evaluación integral del coagulante natural optimizado mediante el CCD es altamente eficiente para la remoción tanto de turbidez como SST, alcanzando la remoción de hasta 96-98 % de eliminación en ATS mediana y alta, los modelos estadísticos presentados son robustos en la mayoría de los casos con un R^2 de 99 % y un $CV \leq 1$ %, los diagramas de diagnóstico comprueban su consistencia y precisión de resultados. En comparación con el sulfato de aluminio, el coagulante presenta mejores resultados especialmente en ATS alta. Los análisis complementarios (SEM, PZ, HPLC, FTIR) revelan cambios significativos en sus propiedades químicas y morfológicas a partir de los flóculos formados en el proceso neutralización de cargas. La formación de compuestos estables, sin la necesidad de afectar significativamente el pH de sistema. Su origen natural presenta una propuesta sostenible concluyendo un producto viable para el tratamiento de aguas para el consumo humano cumpliendo las normativas de calidad y ofreciendo beneficios ambientales y operativos.

5.2. Recomendaciones

- Implementar ensayos pilotos en PTAP, para confirmar la operatividad del coagulante en condiciones de flujo continuo y variabilidad de calidad de agua.
- Implementar nuevos rangos experimentales dentro de la optimización, añadir nuevos factores dentro proceso de obtención del coagulante, como el aislamiento de su agente principal y evaluar su efectividad.
- Realizar un estudio de la variabilidad estacional y geográfica de la materia prima (semilla de Tara) para establecer un protocolo de control de calidad.
- Muestreo de semillas en diferentes épocas del año y localidades, caracterizando su perfil de compuestos activos y definiendo límites de aceptación, logrando escalar la producción de extracto y asegurar que cada lote tenga la misma capacidad de coagulación sin depender únicamente de pruebas de turbidez de laboratorio.
- Establecer un estudio enfocado en agua de río en baja turbidez y evaluar la eficiencia del coagulante.
- Evaluar la vida útil del coagulante en distintas fases, sometidos a análisis fisicoquímicos y sus efectos en la capacidad de coagulación.
- Profundizar los estudios de ecotoxicidad del coagulante natural, para confirmar el impacto ambiental y garantizar su distribución.
- Evaluar el desempeño del coagulante como coadyuvante o combinación de ambos en distintas fases.
- Realizar un análisis de mercado riguroso, donde se incluyan costos de operación en comparativa del sulfato de Aluminio.

CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abderrezzaq, B., Kerroum, D., Amrouci, Z., Baatache, O., Amel, K., & Pizzi, A. P. (2024). Application of Plant-Based Coagulants and Their Mechanisms in Water Treatment: A Review. *Journal of Renewable Materials*, 12, 1-10. <https://doi.org/10.32604/jrm.2024.048306>
- Abidin, Z. Z., Madehi, N., & Yunus, R. (2017). Coagulative Behaviour of *Jatropha curcas* and its Performance in Wastewater Treatment. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(6), 1709-1718. <https://doi.org/10.1002/ep.12635>
- Aguilera Flores, M. M., Medellín Castillo, N. A., Ávila Vázquez, V., González García, R., Cardona Benavides, A., & Carranza Álvarez, C. (2022). Evaluation of a biocoagulant from devilfish invasive species for the removal of contaminants in ceramic industry wastewater. *Scientific Reports*, 12, 9917. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14242-6>
- Akyuz, S., Akyuz, T., Celik, O., & Atak, C. (2018). FTIR Spectroscopy of Protein Isolates of Salt-Tolerant Soybean Mutants. *Journal of Applied Spectroscopy*, 84(6), 1019-1023. <https://doi.org/10.1007/s10812-018-0580-1>
- Alcamo, J. (2019). Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.11.005>
- Alvarado Ojeda, A., Baldini Urrutia, A., & Guajardo Becchi, F. (2012). *Árboles urbanos de Chile: Guía de reconocimiento*. CONAF. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29450>

- Amran, A. H., Zaidi, N. S., Syafiuddin, A., Zhan, L. Z., Bahrodin, M. B., Mehmood, M. A., & Boopathy, R. (2021). Potential of Carica papaya Seed-Derived Bio-Coagulant to Remove Turbidity from Polluted Water Assessed through Experimental and Modeling-Based Study. *Applied Sciences*, *11*(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/app11125715>
- Ang, W. L., & Mohammad, A. W. (2020). State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, *262*, 121267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>
- Araya, M., García, S., Rengel, J., Pizarro, S., & Álvarez, G. (2021). Determination of free and protein amino acid content in microalgae by HPLC-DAD with pre-column derivatization and pressure hydrolysis. *Marine Chemistry*, *234*, 103999. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2021.103999>
- Azizi, Z., Barzegarian, R., & Behvandi, M. (2022). Design-expert aided thermohydraulic assessment of a nanofluid-cooled cylindrical microchannel heat sink: Possible application for thermal management of electric vehicle batteries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *50*, 101876. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101876>
- Baquerizo-Crespo, R. J., Nuñez, Y., Albite, J., Macías-Alcívar, J. A., Cedeño-Zambrano, N., Dueñas-Rivadeneira, A. A., Gómez-Salcedo, Y., & Rodríguez-Díaz, J. M. (2021). Biocoagulants as an Alternative for Water Treatment. En N. R. Maddela, L. C. García Cruzatty, & S. Chakraborty (Eds.), *Advances in the Domain of Environmental Biotechnology: Microbiological Developments in Industries, Wastewater Treatment and Agriculture* (pp. 313-334). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8999-7_12

- Benalia, A., Atime, L., Baatache, O., Khalfaoui, A., Ghomrani, A. F., Derbal, K., Pizzi, A., Panico, A., Bouchareb, E. M., Bouchareb, R., & Amirou, S. (2024). Removal of lead in water by coagulation flocculation process using Cactus-based natural coagulant: Optimization and modeling by response surface methodology (RSM). *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(3), 244. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12412-9>
- Benalia, A., Baatache, O., Derbal, K., Khalfaoui, A., Amrouci, Z., Pizzi, A., & Panico, A. (2024). The use of central composite design (CCD) to optimize and model the coagulation-flocculation process using a natural coagulant: Application in jar test and semi-industrial scale. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104704. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104704>
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
- Callohuari, R., Sandoval Vegas, M., & Huamán Gutiérrez, O. (2017). Efecto gastroprotector y capacidad antioxidante del extracto acuoso de las vainas de *Caesalpinia spinosa* ‘tara’, en animales de experimentación. *Anales de la Facultad de Medicina*, 78(1), 61-66. <https://doi.org/10.15381/anales.v78i1.13023>
- Campos, N. F., Barbosa, C. M., Rodríguez-Díaz, J. M., & Duarte, M. M. (2018). Removal of naphthenic acids using activated charcoal: Kinetic and equilibrium studies. *Adsorption Science & Technology*, 36(7-8), 1405-1421. <https://doi.org/10.1177/0263617418773844>
- Cardenas, M. (1989). Manual de Plantas Económicas de Bolivia. En *Manual de Plantas Económicas de Bolivia* (pp. 333-333). <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1331772>

- Carrasquero, S. J., Flores, S. M., Perche, E. D. F., Ferrer, P. M. P., Leal, J. C. M., & Montiel, A. R. D. (2017). Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Sonalum tuberosum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en la clarificación de aguas. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 13(2), Article 2. <https://doi.org/10.18359/rfcb.1941>
- Chambi, F., Chirinos, R., Pedreschi, R., Betalleluz-Pallardel, I., Debaste, F., & Campos, D. (2013). Potencial antioxidante de extractos polifenólicos hidrolizados de vainas de tara (*Caesalpinia spinosa*). *Industrial Crops and Products*, 47, 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.03.009>
- Choudhary, M., Ray, M. B., & Neogi, S. (2019). Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water. *Separation and Purification Technology*, 209, 714-724. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.033>
- Chua, S.-C., Malek, M. A., Chong, F.-K., Sujarwo, W., & Ho, Y.-C. (2019). Red Lentil (*Lens culinaris*) Extract as a Novel Natural Coagulant for Turbidity Reduction: An Evaluation, Characterization and Performance Optimization Study. *Water*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w11081686>
- Cojbasic, S., Turk Sekulic, M., Pap, S., Taggart, M. A., & Prodanovic, J. (2024). Nature-based solutions for wastewater treatment: Biodegradable freeze-dried powdered bio-flocculant. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105863. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105863>
- Colarossi Salinas, A., Ambulay Briceño, J. P., & Vargas Huamancayo, B. (2021). *Purificación y concentración aminoacídica de germen de tara*. <https://www.industriaalimentaria.org/blog/contenido/purificacion-y-concentracion-aminoacidica-de-germen-de-tara>

- Cui, W., Liu, J., You, W., & Yu, W. (2024). Mechanical reinforcement by bridging chains in polymer nanocomposites. *Polymer*, 306, 127208. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127208>
- Darshan, C. M., Bharadwaj, K. R., Tejash, S. M., Negi, P. S., Haware, D. J., & Radha, C. (2020). Moringa oleifera seed protein isolate as an alternative for purifying turbid water. *Desalination and Water Treatment*, 203, 129-136. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26188>
- Deepa, D., Keerthana, R., Pratheep Kumar, R., & Suryaprakash, R. (2022). Primary treatment of dairy wastewater using bio based natural coagulants. *Materials Today: Proceedings*, 60, 616-621. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.125>
- Deswal, S., Rawat, S., Kumar, S., & Sangwan, V. (2023). Potential of Moringa oleifera and Okra as Coagulants in Sustainable Treatment of Water and Wastewater. *Ecological Questions*, 34(4), Article 4. <https://doi.org/10.12775/EQ.2023.045>
- dos Santos, T. R. T., Silva, M. F., de Andrade, M. B., Vieira, M. F., & Bergamasco, R. (2018). Magnetic coagulant based on *Moringa oleifera* seeds extract and super paramagnetic nanoparticles: Optimization of operational conditions and reuse evaluation. *Desalination and Water Treatment*, 106, 226-237. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22065>
- Dostert, N., Roque, J., Brokamp, G., Cano, A., La Torre, M. I., Weigend, M., & Luebert, F. (2009). *Factsheet: Datos botánicos de Tara. Caesalpinia spinosa (Molina) Kuntze*. <http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/191>
- Dotson, A., & Westerhoff, P. (2009). Occurrence and removal of amino acids during drinking water treatment. *Journal AWWA*, 101(9), 101-115. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2009.tb09963.x>

- Duan, J., & Gregory, J. (2003). Coagulation by Hydrolysing Metal Salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100, 475-502. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(02\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00067-2)
- Duan, J., Niu, A., Shi, D., Wilson, F., & Graham, N. (2009). Factors affecting the coagulation of seawater by ferric chloride. *Desalination and Water Treatment - DESALIN WATER TREAT*, 11, 173-183. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.795>
- Espinoza-Guillen, J. A., Alderete-Malpartida, M. B., Gallegos-Huamán, R. L., Paz-Rosales, Y. M., Domínguez-Vivar, R. M., & Bujaico-León, C. (2024). Ecological risk assessment and identification of sources of heavy metals contamination in sewage sludge from municipal wastewater treatment plants in the Metropolitan Area of Lima-Callao, Peru. *Environment, Development and Sustainability*, 26(1), 1559-1590. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02774-w>
- Espinoza-Quñones, F. R., Romani, M., Borba, C. E., Módenes, A. N., Utzig, C. F., & Dall'Oglio, I. C. (2020). A mathematical approach based on the Nernst-Planck equation for the total electric voltage demanded by the electrocoagulation process: Effects of a time-dependent electrical conductivity. *Chemical Engineering Science*, 220, 115626. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115626>
- Eydi Gabrabad, M., Yari, M., & Bonyadi, Z. (2024). Using *Spirulina platensis* as a natural biocoagulant for polystyrene removal from aqueous medium: Performance, optimization, and modeling. *Scientific Reports*, 14(1), 2506. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53123-y>
- Farkhondeh, T., Naseri, K., Esform, A., Aramjoo, H., & Naghizadeh, A. (2021). Drinking water heavy metal toxicity and chronic kidney diseases: A systematic review.

Reviews on Environmental Health, 36(3), 359-366. <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0110>

Fernandes, R. M., Corrêa, M. G., Aragão, W. A. B., Nascimento, P. C., Cartágenes, S. C., Rodrigues, C. A., Sarmiento, L. F., Monteiro, M. C., Maia, C. do S. F., Crespo-López, M. E., & Lima, R. R. (2020). Preclinical evidences of aluminum-induced neurotoxicity in hippocampus and pre-frontal cortex of rats exposed to low doses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 111139. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111139>

Fierro, O., Siano, F., Bianco, M., Vasca, E., & Picariello, G. (2024). *La caracterización integral a nivel molecular de la harina de germen de semilla de tara (Caesalpinia spinosa)*, rica en proteínas y polifenoles, sugiere una nueva hipótesis sobre posibles riesgos accidentales. *Food Research International*, 181, 114119. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114119>

Flory, K., Rasheed, M. A., Priti, P., Rao, P. L. S., & Zaheer, H. S. (2024). Maximizing Lipid Extraction from *Chlorella pyrenoidosa*: A Study on the Effectiveness of Cell Disruption Techniques. *Research Journal of Biotechnology*, 19(7), 64-68. <https://doi.org/10.25303/1907rjbt064068>

Gandiwa, B. I., Moyo, L. B., Ncube, S., Mamvura, T. A., Mguni, L. L., & Hlabangana, N. (2020). Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (Moringa Oleifera-Cactus Opuntia-alum blend). *South African Journal of Chemical Engineering*, 34, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.07.005>

Getahun, M., Befekadu, A., & Alemayehu, E. (2024). Coagulation process for the removal of color and turbidity from wet coffee processing industry wastewater using bio-

- coagulant: Optimization through central composite design. *Heliyon*, 10(7).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27584>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw Hill España.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008>
- Hernández-Vasquez, A., Rojas-Roque, C., Marques Sales, D., Santero, M., Bendezu-Quispe, G., Barrientos-Gutiérrez, T., & Miranda, J. J. (2021). Inequalities in access to safe drinking water in Peruvian households according to city size: An analysis from 2008 to 2018. *International Journal for Equity in Health*, 20(1), 133.
<https://doi.org/10.1186/s12939-021-01466-7>
- Hernández-Vásquez, A., Visconti-Lopez, F. J., & Vargas-Fernández, R. (2023). Escherichia coli Contamination of Water for Human Consumption and Its Associated Factors in Peru: A Cross-Sectional Study. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 108(1), 187-194. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.22-0240>
- Kalibbala, H. M., Olupot, P. W., & Ambani, O. M. (2023). Synthesis and efficacy of cactus-banana peels composite as a natural coagulant for water treatment. *Results in Engineering*, 17, 100945. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100945>
- Kashlak, A. B., Myroshnychenko, S., & Spektor, S. (2023). Analytic Permutation Testing for Functional Data ANOVA. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 32(1), 294-303. <https://doi.org/10.1080/10618600.2022.2069780>
- Koul, B., Bhat, N., Abubakar, M., Mishra, M., Arukha, A. P., & Yadav, D. (2022). Application of Natural Coagulants in Water Treatment: A Sustainable Alternative to Chemicals. *Water*, 14(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/w14223751>

- Kristianto, H. (2021). Recent advances on magnetic natural coagulant: A mini review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 255-270. <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1986576>
- Lapa, P. D. la C. (2004). Aprovechamiento integral y racional de la tara *Caesalpinia spinosa*—*Caesalpinia tinctoria*. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 7(14), Article 14. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v7i14.733>
- Lazo, O. R., Pérez, N. R., & Chuquiruna, G. D. (2010). Forestación piloto con tara en Cajamarca. *Industrial Data*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.15381/idata.v13i1.6160>
- Lebovka, N. I. (2014). Aggregation of Charged Colloidal Particles. En M. Müller (Ed.), *Polyelectrolyte Complexes in the Dispersed and Solid State I: Principles and Theory* (pp. 57-96). Springer. https://doi.org/10.1007/12_2012_171
- Li, Z., Xiang, F., Huang, X., Liang, M., Ma, S., Gafurov, K., Gu, F., Guo, Q., & Wang, Q. (2024). Properties and Characterization of Sunflower Seeds from Different Varieties of Edible and Oil Sunflower Seeds. *Foods*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/foods13081188>
- Loor-Moreira, C. L., Fernández-Andrade, K. J., Cedeño-Solórzano, G. S., Manzaba-Salazar, G. M., Gómez-Salcedo, Y., Rodríguez-Díaz, J. M., & Baquerizo-Crespo, R. J. (2021). Generalities of the Coagulation-Flocculation Process: A Perspective on Biocoagulants. En N. R. Maddela & L. C. García (Eds.), *Innovations in Biotechnology for a Sustainable Future* (pp. 333-352). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80108-3_16

- López-Maldonado, E. A., Oropeza-Guzman, M. T., Jurado-Baizaval, J. L., & Ochoa-Terán, A. (2014). Coagulation–flocculation mechanisms in wastewater treatment plants through zeta potential measurements. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.025>
- Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 47-50.
- Lucio, N. Q. (2021). *Metodología de la Investigación*. Marcombo. <https://scholar.google.com/scholar?cluster=4001162873981595506&hl=en&oi=scholar>
- Mardarveran, P., & Mokhtar, N. M. (2020). ANALYSIS OF ARTOCARPUS HETEROPHYLLUS PEEL AS A NATURAL COAGULANT USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM). *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 82(4), Article 4. <https://doi.org/10.11113/jt.v82.14451>
- Martel, C., Rojas, N., Marín, M., Avilés, R., Neira, E., & Santiago, J. (2014). *Caesalpinia spinosa* (Caesalpinaceae) leaves: Anatomy, histochemistry, and secondary metabolites. *Brazilian Journal of Botany*, 37(2), 167-174. <https://doi.org/10.1007/s40415-014-0059-0>
- Martín, M. A., González, I., Berrios, M., Siles, J. A., & Martín, A. (2011). Optimization of coagulation–flocculation process for wastewater derived from sauce manufacturing using factorial design of experiments. *Chemical Engineering Journal*, 172(2), 771-782. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.06.060>
- Megersa, M., Gach, W., Beyene, A., Ambelu, A., & Triest, L. (2019). Efecto de las soluciones salinas sobre el rendimiento de la coagulación de *Moringa stenopetala* y

- Maerua subcordata* para el tratamiento de aguas turbias. *Separation and Purification Technology*, 221, 319-324. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.013>
- Melo Ferrari, M., Glorio Paulet, P., & Tarazona Reyes, G. (2013). Efecto de la madurez en los componentes de valor comercial (taninos y goma) de tara *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 79(3), 218-228.
- Mensah-Akutteh, H., Buamah, R., Wiafe, S., & Nyarko, K. B. (2022). Optimizing coagulation–flocculation processes with aluminium coagulation using response surface methods. *Applied Water Science*, 12(8), 188. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01708-1>
- Michelon, W., Viancelli, A., Breda, M., Nonnenmacher, J. L., Roman, S. S., & Matthiensen, A. (2021). Mouse Bioassay Acute and Subchronic Safety Assessment of Biomass from Swine Wastewater Phycoremediation. *Waste and Biomass Valorization*, 12(12), 6811-6822. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01470-6>
- Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive Statistics and Normality Tests for Statistical Data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), 67. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18
- Miyashiro, C. S., Mateus, G. A. P., dos Santos, T. R. T., Paludo, M. P., Bergamasco, R., & Fagundes-Klen, M. R. (2021). Synthesis and performance evaluation of a magnetic biocoagulant in the removal of reactive black 5 dye in aqueous medium. *Materials Science and Engineering: C*, 119, 111523. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111523>
- Mohamed Noor, M. H., Mohd Azli, M. F. Z., Ngadi, N., Mohammed Inuwa, I., Anako Opotu, L., & Mohamed, M. (2022). Optimización de la síntesis asistida por sonicación de *Moringa oleifera* magnética como coagulante eficiente para el tratamiento de aguas

- residuales de aceite de palma. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102191.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102191>
- Mohamed Noor, M. H., & Ngadi, N. (2024). Ecotoxicological risk assessment on coagulation-flocculation in water/wastewater treatment: A systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(40), 52631-52657.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-34700-0>
- Mohd-Asharuddin, S., Othman, N., Zin, N. S. M., & Tajarudin, H. A. (2017). A Chemical and Morphological Study of Cassava Peel: A Potential Waste as Coagulant Aid. *MATEC Web of Conferences*, 103, 06012.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201710306012>
- Mortadi, A., Chahid, E. G., Elmelouky, A., Chahbi, M., EL Ghyati, N., Zaim, S., Cherkaoui, O., & El Moznine, R. (2020). Complex electrical conductivity as a new technique to monitor the coagulation-flocculation processes in the wastewater treatment of the textile Industry. *Water Resources and Industry*, 24, 100130.
<https://doi.org/10.1016/j.wri.2020.100130>
- Naceradska, J., Pivokonska, L., & Pivokonsky, M. (2019). On the importance of pH value in coagulation. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 68(3), 222-230. <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.155>
- Napper, D. H. (2002, mayo 1). *Colloid Stability* (world). ACS Publications; American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/i360036a005>
- Nath, A., Mishra, A., & Pande, P. P. (2021). A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6113-6117.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.551>

- Nie, Y., Wang, Z., Wang, W., Zhou, Z., Kong, Y., & Ma, J. (2022). Biofloculación de *Microcystis aeruginosa* mediante pellets fúngicos de *Aspergillus oryzae*: Rendimiento y mecanismo. *Journal of Hazardous Materials*, 439, 129606. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129606>
- Nikolić, Z., Đorđević, V., Torbica, A., & Mikić, A. (2012). Legumes seed storage proteins characterization by SDS-PAGE and Lab-on-a-Chip electrophoresis. *Journal of Food Composition and Analysis*, 28(2), 75-80. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2012.08.005>
- Obiora-Okafo, I. A., Onukwuli, O. D., Igwegbe, C. A., Onu, C. E., & Omotioma, M. (2022). Enhanced Performance of Natural Polymer Coagulants for Dye Removal from Wastewater: Coagulation Kinetics, and Mathematical Modelling Approach. *Environmental Processes*, 9(2), 20. <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00561-3>
- Onu, U. P., Xie, Q., & Xu, L. (2017). A Fuzzy TOPSIS model Framework for Ranking Sustainable Water Supply Alternatives. *Water Resources Management*, 31(9), 2579-2593. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1636-3>
- Ouyang, S., Li, Y., Zheng, T., Wu, K., Wang, X., & Zhou, Q. (2022). Ecotoxicity of Natural Nanocolloids in Aquatic Environment. *Water*, 14(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/w14192971>
- Owodunni, A. A., Ismail, S., & Seng, O. B. (2024). Green bean seed coagulant for turbidity removal: Parameter optimization and modelling. *Water Practice and Technology*, 19(5), 1968-1985. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.105>
- Oyegbile, B., Ay, P., & Narra, S. (2016). Flocculation kinetics and hydrodynamic interactions in natural and engineered flow systems: A review. *Environmental Engineering Research*, 21(1), 1-14. <https://doi.org/10.4491/eer.2015.086>

- Pagés-Díaz, J., Pereda-Reyes, I., Sanz, J. L., Lundin, M., Taherzadeh, M. J., & Horváth, I. S. (2018). A comparison of process performance during the anaerobic mono- and co-digestion of slaughterhouse waste through different operational modes. *Journal of Environmental Sciences*, *64*, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.06.004>
- Razvi, S. Z. A., Kamm, I., Nguyen, T., Pellett, J. D., & Kumar, A. (2021). Loss on Drying Using Halogen Moisture Analyzer: An Orthogonal Technique for Monitoring Volatile Content for In-Process Control Samples during Pharmaceutical Manufacturing. *Organic Process Research & Development*, *25*(2), 300-307. <https://doi.org/10.1021/acs.oprd.0c00512>
- Riego, M. de A. y. (2019). Producción y Comercio de la TARA en el Perú. *Ministerio de Agricultura y Riego*. <http://repositorio.midagri.gob.pe:80/jspui/handle/20.500.13036/113>
- Rodriguez, A. Z., Wang, H., Hu, L., Zhang, Y., & Xu, P. (2020). Treatment of Produced Water in the Permian Basin for Hydraulic Fracturing: Comparison of Different Coagulation Processes and Innovative Filter Media. *Water*, *12*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/w12030770>
- Rosenbaum, R. K. (2015). Ecotoxicity. En M. Z. Hauschild & M. A. J. Huijbregts (Eds.), *Life Cycle Impact Assessment* (pp. 139-162). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3_8
- Saleem, A., Hussain, A., Chaudhary, A., Ahmad, Q.-A., Iqtedar, M., Javid, A., & Akram, A. M. (2022). Acid hydrolysis optimization of pomegranate peels waste using response surface methodology for ethanol production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *12*(5), 1513-1524. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01117-x>

- Saleem, M., & Bachmann, R. T. (2019). A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 72, 281-297. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.12.029>
- Salvioli, M. L., Colli, G. A., Cipponeri, M., & Calvo, G. H. (2012). *Gestión de cuencas: Análisis comparativo en función de la calidad del agua superficial y usos del suelo de dos pequeñas cuencas urbanas*. VII Congreso de Medio Ambiente. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26689>
- Sanajou, S., Erkekoğlu, P., Şahin, G., & Baydar, T. (2023). Role of aluminum exposure on Alzheimer's disease and related glycogen synthase kinase pathway. *Drug and Chemical Toxicology*, 46(3), 510-522. <https://doi.org/10.1080/01480545.2022.2065291>
- Shah, A., Arjunan, A., Manning, G., Zakharova, J., Andraulaki, I., & Batool, M. (2024). Efecto de la dosis, el tiempo de asentamiento, la vida útil, la temperatura de almacenamiento y el extractante en la eficiencia de coagulación de la proteína de *Moringa oleifera* Lam. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 21, 100919. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100919>
- Shammas, N. K. (2005). Coagulation and Flocculation. En L. K. Wang, Y.-T. Hung, & N. K. Shammas (Eds.), *Physicochemical Treatment Processes* (pp. 103-139). Humana Press. <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:103>
- Silvestre, S. N. F. y de F. (2020). Anuario Forestal y de Fauna Silvestre 2019. *Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre*. <https://repositorio.serfor.gob.pe/handle/SERFOR/894>

- Sousa, V. S., & Ribau Teixeira, M. (2020). Removal of a mixture of metal nanoparticles from natural surface waters using traditional coagulation process. *Journal of Water Process Engineering*, *36*, 101285. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101285>
- Souza Dos Santos, B., Eyng, E., Baraldi, I. J., Frare, L. M., Affonso Pisano Mateus, G., Bergamasco, R., Fagundes-Klen, M. R., & Ferreira Da Costa, P. (2021). Life performance evaluation of lyophilized Moringa biocoagulant: An alternative for prolonging the biocoagulant efficiency. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *40*(3), e13538. <https://doi.org/10.1002/ep.13538>
- Sugumaran, V., Prakash, S., Ramu, E., Arora, A. K., Bansal, V., Kagdiyal, V., & Saxena, D. (2017). Detailed characterization of bio-oil from pyrolysis of non-edible seed-cakes by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) techniques. *Journal of Chromatography B*, *1058*, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2017.05.014>
- Thermo Fisher Scientific. (2020). Nicolet Summit: Guía del usuario. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Product-Information/Summit-UG-ES.pdf>
- Tinterri, R., Civa, A., Laporta, M., & Piazza, A. (2020). Chapter 17—Turbidities and turbidity currents. En N. Scarselli, J. Adam, D. Chiarella, D. G. Roberts, & A. W. Bally (Eds.), *Regional Geology and Tectonics (Second Edition)* (pp. 441-479). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64134-2.00016-X>
- Tomasi, I. T., Santos, S. C. R., Ribeiro, A., Homem, V., Boaventura, R. A. R., & Botelho, C. M. S. (2025). Coagulants from chestnut shell tannins—Synthesis, characterization and performance on water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, *69*, 106818. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106818>

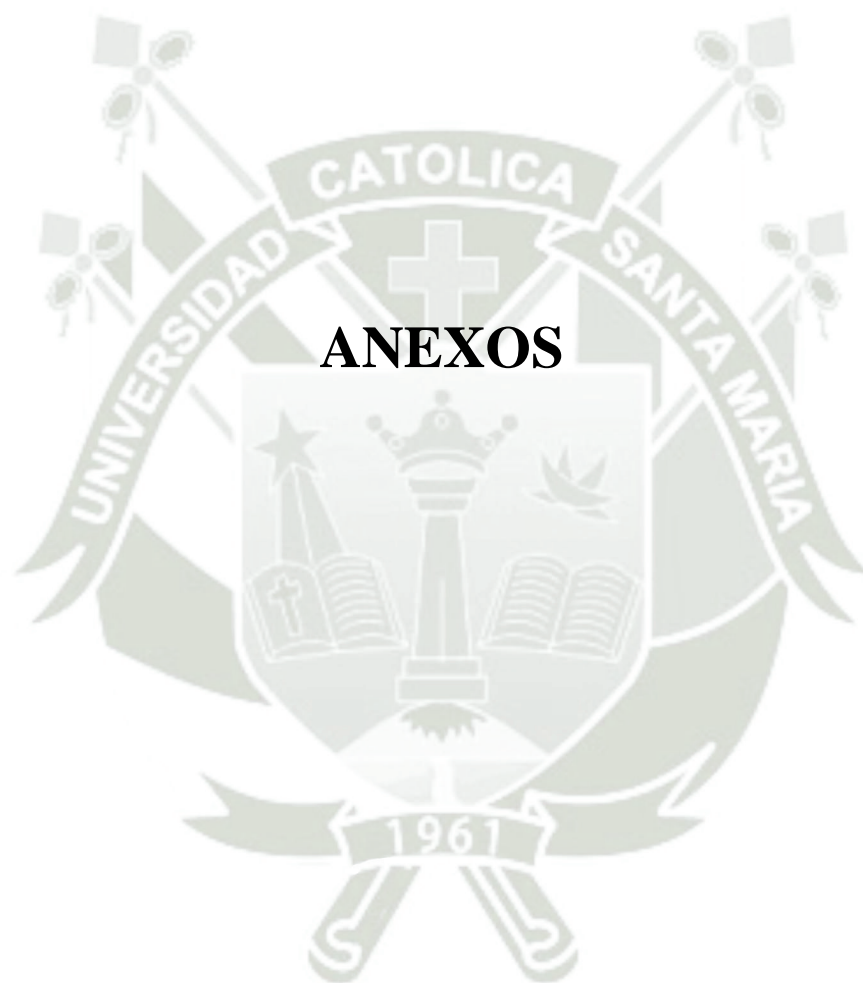
- Ulibarri, E. A. (2008). Los géneros de Caesalpinioideae (Leguminosae) presentes en Sudamérica. *Darwiniana, nueva serie*, 46(1), 69-163.
- Urbaniak, M., Baran, A., Lee, S., & Kannan, K. (2020). Utilization of PCB-contaminated Hudson River sediment by thermal processing and phytoremediation. *Science of The Total Environment*, 738, 139841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139841>
- Valeriano-Mamani, J. J., Matos-Chamorro, R. A., Valeriano-Mamani, J. J., & Matos-Chamorro, R. A. (2019). Influencia de la Goma de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como Ayudante en el Proceso de Coagulación-Floculación para la Remoción de Turbidez de una Suspensión Artificial de Bentonita. *Información tecnológica*, 30(5), 299-308. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500299>
- Varenne, F., Coty, J.-B., Botton, J., Legrand, F.-X., Hillaireau, H., Barratt, G., & Vauthier, C. (2019). Evaluation of zeta potential of nanomaterials by electrophoretic light scattering: Fast field reversal *versus* Slow field reversal modes. *Talanta*, 205, 120062. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.06.062>
- Vargas Oviedo, J. E. (2016). Análisis de la rentabilidad de la tara (*Caesalpinia spinosa*) en la Región Apurímac. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2825>
- Velásquez, J. J. V., & Seminario, J. F. (2021a). Origen y domesticación de Tara spinosa (Leguminosae, Caesalpinioideae). *Lilloa*, 131-159. <https://doi.org/10.30550/j.lil/2021.58.2/2021.11.14>
- Velásquez, J. J. V., & Seminario, J. F. (2021b). Origen y domesticación de Tara spinosa (Leguminosae, Caesalpinioideae). *Lilloa*, 131-159. <https://doi.org/10.30550/j.lil/2021.58.2/2021.11.14>

- Villena Velásquez, J. J., Seminario Cunya, J. F., & Valderrama Cabrera, M. A. (2019). Variabilidad morfológica de la «tara» *Caesalpinia spinosa* (Molina.) Kuntze (Fabaceae), en poblaciones naturales de Cajamarca: Descriptores de fruto y semilla. *Arnaldoa*, 26(2), 555-574. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26203>
- Yimer, A., & Dame, B. (2021). Papaya seed extract as coagulant for potable water treatment in the case of Tulte River for the community of Yekuset district, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 4, 100198. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100198>
- Zedan, T., Mossad, M., Fouad, M., & Mahanna, H. (2022). Potential application of natural coagulant extraction from walnut seeds for water turbidity removal. *Water Practice and Technology*, 17(3), 684-698. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.019>
- Zhang, Y., & Dee, D. R. (2023). Morphology, Formation Kinetics and Core Composition of Pea and Soy 7S and 11S Globulin Amyloid Fibrils. *JOURNAL OF AGRICULTURAL AND FOOD CHEMISTRY*, 71(11), 4755-4765. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c08704>
- Zhang, Z., Guo, X., Cao, L., Lv, X., Zhang, X., Yang, L., Zhang, H., Xi, X., & Fang, Y. (2024). Multi-Scale Variation in Surface Water Area in the Yellow River Basin (1991–2023) Based on Suspended Particulate Matter Concentration and Water Indexes. *Water*, 16(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/w16182704>
- Zimoch, I., & Paciej, J. (2020). Use of water turbidity as an identifier of microbiological contamination in the risk assessment of water consumer health. *Desalination and Water Treatment*, 199, 499-511. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26426>
- Zumstein, M., Battagliarin, G., Kuenkel, A., & Sander, M. (2022). Environmental Biodegradation of Water-Soluble Polymers: Key Considerations and Ways Forward.

Accounts of Chemical Research, 55(16), 2163-2167.

<https://doi.org/10.1021/acs.accounts.2c00232>





ANEXO I

PANEL FOTOGRÁFICO

Imagen N°1. Punto de muestra en la bocatoma dentro de la EPS la Tomilla.



Imagen N°2. Muestra de Agua de Río.



Imagen N°3. Vainas de la Semilla de Tara Ayacuchana



Imagen N°4. Extracción del polvo tara.

A. Lavado.



B. Secado.



C. Semillas limpias

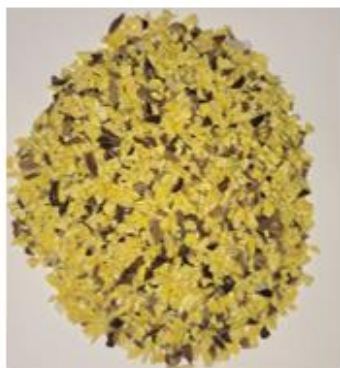


D. Triturado.



Imagen 5. Análisis de Humedad

A. Germen de Tara.



B. Polvo de Tara.



C. Analizador de humedad.



D. Análisis Obtenido.



Imagen 6. FTIR Thermo Scientific.



Imagen 7. Cálculo de Parámetros fisicoquímicos.

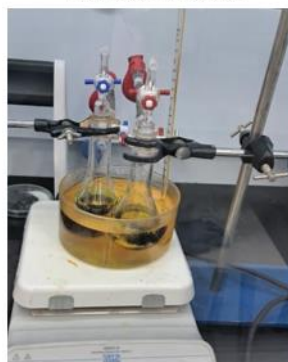


Imagen 8. Equipo SOXHELT.



Imagen 9. Análisis en HPLC.

A. Hidrolisis Acida.



B. Cromatógrafo HITACHI



Imagen N°10. Fases para la obtención del coagulante.

A. Obtención del polvo.



C. Polvo fino



E. Hotplate y Agitador magnético.



B. Polvo tamizado.



D. NaCl (Merck)



F. Equipo de Filtración al vacío.



G. Coagulante natural de Tara.

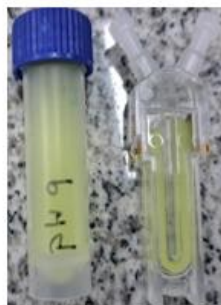


Imagen N°11. Potencial

Zetasizer.



Celdas-Coagulante modificado pH 9.



Celdas-Coagulante modificado pH 3.



Imagen N°12. Preparación de Agua Turbia Sintética.

A. Solución tampón ATS.



B. Agitación constante del ATS.



C. Dilución de ATS.



Imagen N°13. Etapas del Proceso C-F.

A. Uso del Test de Jarras.



B. Proceso de Coagulación – Floculación



C. Proceso Finalizado.



Imagen N°14. Determinación de SST.

Filtros de membrana 0.45um.



Comparación (Antes y Después).



Sistema de Filtración al vacío por membrana.



Imagen N°15. Análisis en Agua de Rio.

A. Prueba en Agua de Rio.



B. Proceso optimizado



ANEXO II INFORMES

Informes de ensayo del Laboratorio de Microscopia Electrónica



INFORME DE ENSAYO

N° DE INFORME: ANA07B25.000034E

Nombre del Cliente	: Gilberto Colina
Dirección del Cliente	: No consigna
RUC	: No consigna
Condición del Muestreado	: POR EL CLIENTE
Descripción	: Cassalpinia Spinosa
Tamaño de muestra	: 0.5g
Fecha de Recepción	: 07/02/2025
Fecha de Inicio del Ensayo	: 07/02/2025
Fecha de Emisión de Informe	: 07/02/2025
Página	: 1 de 1

I. PARÁMETROS DE ANÁLISIS:

PARÁMETROS	
Software	SmartSEM ZEISS
Voltaje	8 Kv
Detector	Electrones secundarios
Modo	Alto vacío
Recubierta	Oro-paladio
Modelo del equipo	EVO 10MA CARL ZEISS

OBSERVACIONES:

- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Microscopia Electrónica.

QF. Tiffany L. Vincent Lozano
Asistente de Laboratorio
Laboratorio de Microscopia Electrónica



INFORME DE ENSAYO

N° DE INFORME: ANA07B25.000034C

Nombre del Cliente	: Gilberto Colina
Dirección del Cliente	: No consigna
RUC	: No consigna
Condición del Muestreado	: POR EL CLIENTE
Descripción	: FLOC 100 NTU- Cassalpina Spinosa
Tamaño de muestra	: 0.5g
Fecha de Recepción	: 07/02/2025
Fecha de Inicio del Ensayo	: 07/02/2025
Fecha de Emisión de Informe	: 07/02/2025
Página	: 1 de 1

I. PARÁMETROS DE ANÁLISIS:

PARÁMETROS	
Software	SmartSEM ZEISS
Voltaje	8 Kv
Detector	Electrones secundarios
Modo	Alto vacío
Recubierta	Oro-paladio
Modelo del equipo	EVO 10MA CARL ZEISS

OBSERVACIONES:

- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Microscopía Electrónica.



INFORME DE ENSAYO

N° DE INFORME: ANA07B25.000034A


Nombre del Cliente	: Gilberto Colina
Dirección del Cliente	: No consigna
RUC	: No consigna
Condición del Muestreado	: POR EL CLIENTE
Descripción	: FLOC 100 NTU- Aluminio sulfato
Tamaño de muestra	: 0.5g
Fecha de Recepción	: 07/02/2025
Fecha de Inicio del Ensayo	: 07/02/2025
Fecha de Emisión de Informe	: 07/02/2025
Página	: 1 de 1

I. PARÁMETROS DE ANÁLISIS:

PARÁMETROS	
Software	SmartSEM ZEISS
Voltaje	8 Kv
Detector	Electrones secundarios
Modo	Alto vacío
Recubierta	Oro-paladio
Modelo del equipo	EVO 10MA CARL ZEISS

OBSERVACIONES:

- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Microscopía Electrónica.



QF. Tiffany L. Vincent Lozano
 Asistente de Laboratorio
 Laboratorio de Microscopía Electrónica