

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFICIENCIA DE LAS SEMILLAS DE *Carica papaya* COMO COAGULANTE EN
AGUAS DE LA QUEBRADA “NARANJAL” A ESCALA LABORATORIO**

Tesis

Para optar el grado de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

ZEGARRA SANTOS STEFANY ALEJANDRA

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°144-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 11 de diciembre de 2025, a horas 10:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“EFICIENCIA DE LAS SEMILLAS DE *Carica papaya* COMO COAGULANTE EN AGUAS DE LA QUEBRADA “NARANJAL” A ESCALA LABORATORIO”

Presentado por la Bachiller: **ZEGARRA SANTOS, STEFANY ALEJANDRA** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “MUY BUENA”.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 24 de diciembre de 2025

Ing. MSc. **ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ**
PRESIDENTE

Ing. MSc. **SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO**
MIEMBRO

Ing. MSc. **PATRICIA PILAR ROMERO USHUÑAHUA**
MIEMBRO

Ing. M. Sc. **ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA**
ASESOR



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 051 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
EFICIENCIA DE LAS SEMILLAS DE <i>Carica papaya</i> COMO COAGULANTE EN AGUAS DE LA QUEBRADA "NARANJAL" A ESCALA LABORATORIO	ZEGARRA SANTOS STEFANY ALEJANDRA	09 % Nueve	Menor a 20 %

Tingo María, 16 de febrero de 2026.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFICIENCIA DE LAS SEMILLAS DE *Carica papaya* COMO COAGULANTE EN
AGUAS DE LA QUEBRADA “NARANJAL” A ESCALA LABORATORIO**

Autor	: Zegarra Santos Stefany Alejandra
Asesor	: Ing. M. Sc. Cerna Cueva Alberto Franco
Área de investigación	: Ciencia y Tecnología Ambiental - PIBIOT
Grupo de investigación	: Ciencia y Tecnología Ambiental
Línea de investigación	: Tecnologías para reducir la contaminación
Lugar de ejecución	: Laboratorio de recursos hídricos - UNAS
Duración de trabajo	: 6 meses
Financiamiento	: S/. 1,160.00
FEDU	: No
Propio	: Si
Otros	: No

Tingo María – Perú, 2025

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida, la salud, las fuerzas y la capacidad para perseguir mis objetivos; por ser mi guía en cada paso y mi refugio en los momentos difíciles.

A mis padres, Cesar Luis Zegarra Torres y Domitila Santos Reyes, por su amor incondicional y por ser mi ejemplo de perseverancia. Este logro también les pertenece.

A mis hermanos, Cristina Úrsula Zegarra Santos y Luis Antonio Zegarra Santos, por su cariño incondicional y por acompañarme con generosidad y constancia en cada etapa de mi formación profesional.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por concederme la fortaleza, la claridad y la perseverancia necesaria para culminar esta etapa, y por poner en mi camino a personas idóneas que fueron guía, apoyo y luz en los momentos decisivos.

A mi familia, por su amor incondicional y por creer en mi en cada etapa de mi vida. Gracias por ser mi fuerza silenciosa y mi refugio constante.

A mis amigos de la iglesia, por su respaldo incondicional y por ser mi familia en la fe. A mis amigos de la comunidad bíblica universitaria (CBU-UNAS), por el cariño, amistad y momentos compartidos que convirtieron este trayecto universitario en una experiencia de crecimiento integral.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a mis docentes, por la formación académica brindada y por contribuir de manera significativa a mi desarrollo profesional.

A mi asesor Ing. M. Sc. Cerna Cueva Alberto Franco, por su guía, orientación y dedicación en el desarrollo de esta investigación. Su experiencia, comentarios y acompañamiento fueron fundamentales para dar solidez a este trabajo.

Al Dr. Paredes Salazar José, por su tiempo, conocimiento y constante disposición para resolver mis dudas e inquietudes durante la realización de este estudio, contribuyendo significativamente al fortalecimiento y claridad de este trabajo.

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo general	2
1.1.2.	Objetivos específicos.....	2
II.	REVISIÓN LITERATURA	3
2.1.	Antecedentes.....	3
2.1.1.	Internacionales.....	3
2.1.2.	Nacionales	4
2.1.3.	Locales.....	6
2.2.	Marco teórico.....	7
2.2.1.	Papaya (<i>Carica papaya</i>).....	7
2.2.2.	Semillas de papaya	10
2.2.3.	Tipos de coagulantes	11
2.2.4.	Aguas superficiales.....	12
2.2.5.	Turbidez.....	13
2.2.6.	Coagulación.....	13
2.2.7.	Mecanismos de la coagulación	13
2.2.8.	Etapas de la coagulación.....	15
2.2.9.	Tipos de coagulación.....	16
2.2.10.	Factores que influyen en la coagulación.....	17
2.2.11.	Floculación	18
2.2.12.	Test de jarras.....	19
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1.	Lugar de ejecución.....	20
3.1.1.	Ubicación política.....	20
3.1.2.	Ubicación geográfica.....	21
3.1.3.	Clima	22

3.2.	Materiales y equipos.....	22
3.2.1.	Materiales	22
3.2.2.	Equipos	22
3.2.3.	Insumos.....	22
3.2.4.	Software.....	22
3.3.	Criterio de investigación.....	23
3.3.1.	Nivel de investigación	23
3.3.2.	Tipo de investigación.....	23
3.3.3.	Método de investigación.....	23
3.3.4.	Operacionalización de las variables	24
3.3.5.	Diseño de investigación.....	25
3.3.6.	Población y muestra.....	26
3.3.7.	Repeticiones del experimento.....	26
3.3.8.	Análisis estadísticos.....	27
3.4.	Metodología experimental.....	28
3.4.1.	Obtención del coagulante de semillas de <i>Carica papaya</i>	28
3.4.2.	Recolección y acondicionamiento de las muestras de agua superficial de la quebrada Naranjal	31
3.4.3.	Determinación de la dosis óptima de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación	34
3.4.4.	Determinación de la eficiencia de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación.....	37
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1.	Obtención del coagulante de semillas de <i>Carica papaya</i>	38
4.2.	Dosis óptima de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación	41

4.2.1. Dosis óptima de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en condiciones meteorológicas sin precipitación	42
4.2.2. Dosis óptima de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en condiciones meteorológicas con precipitación	50
4.3. Determinación de la eficiencia de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal en condiciones meteorológicas con y sin precipitación	58
4.3.1. Eficiencia de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en condiciones meteorológicas sin precipitación	58
4.3.2. Eficiencia de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en condiciones meteorológicas con precipitación	60
V. CONCLUSIONES.....	64
VI. PROPUESTAS A FUTURO	65
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
VIII.ANEXOS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas

1. Clasificación Taxonómica	8
2. Composición química proximal de las semillas de <i>Carica papaya</i>	11
3. Coordenadas geográficas del laboratorio de Recursos Hídricos	21
4. Operacionalización de variables.....	24
5. Análisis estadístico inferencial	27
6. Recolección de las muestras de agua superficial.....	32
7. Modificación del pH de las diferentes muestras de agua superficial	33
8. Concentraciones de las diferentes dosis a usar	35
9. Las etapas del proceso de coagulación en el Test de jarras.....	36
10. Pérdida de peso total en gramos de las semillas de <i>Carica papaya</i>	38
11. Porcentaje de pérdida de humedad por hora de las semillas de <i>Carica papaya</i>	38
12. Cronograma de recolección de muestras de agua superficial en la quebrada Naranjal.....	41
13. Resultados del Test de jarras de la Muestra 1 sin precipitación	42
14. Resultados del Test de jarras de la Muestra 2 sin precipitación	43
15. Resultados del Test de jarras de la Muestra 3 sin precipitación	44
16. Resultados del Test de jarras de la Muestra 4 sin precipitación	45
17. Resultados del Test de jarras de la Muestra 5 sin precipitación	46
18. Dosis óptima de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal en condiciones meteorológicas sin precipitación	47
19. Resultados del Test de jarras de la Muestra 1 con precipitación.....	50
20. Resultados del Test de jarras de la Muestra 2 con precipitación.....	51
21. Resultados del Test de jarras de la Muestra 3 con precipitación.....	52
22. Resultados del Test de jarras de la Muestra 4 con precipitación.....	53
23. Resultados del Test de jarras de la Muestra 5 con precipitación.....	54
24. Dosis óptima de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal en condiciones meteorológicas con precipitación.....	56
25. Eficiencia de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en condiciones meteorológicas sin precipitación	58
26. Eficiencia de las semillas de <i>Carica papaya</i> como coagulante en condiciones meteorológicas con precipitación	60
27. Análisis de varianza (ANOVA) Trifactorial: dosis, pH y lluvia	62

28. Prueba T – Student respecto a la hipótesis del 90% de eficiencia.....	63
29. Pérdida de peso por hora de las muestras de semillas de <i>Carica papaya</i> en estufa	72
30. Prueba T - Student: comparación de la eficiencia del coagulante respecto al 90% para las muestras de aguas superficiales sin precipitación.....	73
31. Prueba T - Student: comparación de la eficiencia del coagulante respecto al 90% para las muestras de aguas superficiales con precipitación.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras

1. Árbol de papaya.....	7
2. Fruta de papaya.....	9
3. Semilla de papaya.....	10
4. Ubicación geográfica del laboratorio de Recursos Hídricos – UNAS	20
5. Ubicación geográfica de la quebrada Naranjal – BRUNAS.....	21
6. Esquema del diseño experimental de la investigación	25
7. Esquema de diseño experimental	25
8. Flujograma para la obtención del coagulante natural de semillas de <i>Carica papaya</i>	28
9. Flujograma para la caracterización inicial y acondicionamiento de las muestras de agua superficial.....	31
10. Flujograma para la determinación de la dosis óptima	34
11. Pérdida de humedad por hora de las diez muestras de semillas de <i>Carica papaya</i>	39
12. Remoción de la turbidez en la Muestra 1 sin precipitación a diferentes valores de pH.....	42
13. Remoción de la turbidez en la Muestra 2 sin precipitación a diferentes valores de pH	43
14. Remoción de la turbidez en la Muestra 3 sin precipitación a diferentes valores de pH	44
15. Remoción de la turbidez en la Muestra 4 sin precipitación a diferentes valores de pH	45
16. Remoción de la turbidez en la Muestra 5 sin precipitación a diferentes valores de pH	46
17. Remoción de la turbidez en la Muestra 1 con precipitación a diferentes valores de pH.....	50
18. Remoción de la turbidez en la Muestra 2 con precipitación a diferentes valores de pH.....	51
19. Remoción de la turbidez en la Muestra 3 con precipitación a diferentes valores de pH.....	52
20. Remoción de la turbidez en la Muestra 4 con precipitación a diferentes valores de pH.....	53
21. Remoción de la turbidez en la Muestra 5 con precipitación a diferentes valores de pH.....	54
22. Recolección de la muestra de agua sin lluvia	75
23. Fruta de <i>Carica papaya</i>	75
24. Extracción y selección de las semillas.....	76
25. Acondicionamiento de las semillas	76
26. Pesado de las semillas de <i>Carica papaya</i> antes de ir a estufa	77
27. Secado en estufa de las semillas de <i>Carica papaya</i>	77
28. Trituración manual de las semillas secas de <i>Carica papaya</i>	78
29. Almacenamiento del polvo de semillas de <i>Carica papaya</i>	78
30. Acondicionamiento del pH en las diferentes muestras de agua superficial	79

31. Equipo de Test de jarras con un espacio de 6 vasos precipitados	79
32. Test de jarra con el coagulante natural	80
33. Hidróxido de sodio para ajustar el valor del pH del medio acuoso	80
34. Medición de la turbidez inicial de las diferentes muestras de agua.....	81
35. Medición del sobrenadante de las diferentes muestras de agua	81
36. Medición de los parámetros finales de las diferentes muestras de agua	82
37. Mediciones de la turbidez en las muestras de agua con lluvia	82

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del coagulante obtenido a partir de las semillas de *Carica papaya* en la remoción de turbidez de las aguas superficiales de la quebrada Naranjal, ubicada en el sector BRUNAS. La metodología empleada fue de tipo aplicada y nivel explicativo, utilizando un diseño experimental trifactorial que consideró tres variables independientes: condición meteorológica (con y sin precipitación), pH inicial (6, 7 y 9) y dosis del coagulante (seis niveles entre 250 mg/L y 875 mg/L).

El coagulante se obtuvo mediante el secado de las semillas a 50°C, trituración y tamizado a 0.25 mm, logrando un polvo integral sin desengrasado químico. Las pruebas se realizaron mediante el equipo de Test de Jarras. Los resultados evidenciaron que el pH influye significativamente en el proceso, obteniéndose el máximo rendimiento en medios neutros (pH 7.0). Para la condición meteorológica sin precipitación (turbidez baja: 9.00 - 19.00 NTU), la dosis óptima fue de 0.5 g (625 mg/L), alcanzando una eficiencia media de remoción del 61.64%. Por otro lado, para la condición con precipitación (turbidez media: 27.00 - 36.00 NTU), la dosis óptima fue de 0.6 g (750 mg/L), con una eficiencia media del 60.23%.

Se concluye que las semillas de *Carica papaya* poseen propiedades de doble acción (coagulante-floculante) efectivas para la clarificación del agua; sin embargo, las pruebas estadísticas demostraron que la eficiencia real no supera el 90% planteado en la hipótesis. A pesar de ello, se presenta como una alternativa sostenible, biodegradable y de bajo costo para tratamientos primarios en zonas rurales.

Palabras claves: *Carica papaya*, coagulante natural, turbidez, pH inicial, condición meteorológica

ABSTRACT

The objective of the present research was to evaluate the efficiency of a coagulant obtained from the seeds of *Carica papaya* on the removal of turbidity from the surface water in the Naranjal watershed, located in the BRUNAS (acronym in Spanish) sector [of Peru]. The methodology that was used was an applied type and at an explanatory level, using a trifactorial experimental design that considered three independent variables: the meteorological condition (with and without precipitation), the initial pH (6, 7 and 9) and the coagulant dose (six levels between 250 mg/L and 875 mg/L).

The coagulant was obtained using the seed dryer at 50°C, ground and shifted at 0.25 mm, achieving an integral powder without chemical degreasing. The tests were carried out using jar test equipment. The results evidenced that the pH significantly influenced the process, where a maximum yield was obtained in neutral mediums (pH 7.0). For the meteorological condition without precipitation (low turbidity: 9.00 - 19.00 NTU), the optimal dose was 0.5 g (625 mg/L), reaching an average removal efficiency of 61.64%. On the other hand, for the precipitation condition (average turbidity: 27.00 - 36.00 NTU), the optimal dose was 0.6 g (750 mg/L), with an average efficiency of 60.23%.

It was concluded that the *Carica papaya* seeds possess effective double action properties (coagulant-flocculant) for water clarification; however, the statistical tests demonstrated that the real efficiency did not surpass the 90% that was proposed in the hypothesis. In spite of this, it is a sustainable, biodegradable and low-cost alternative for primary treatments in rural zones.

Keywords: *Carica papaya*, natural coagulant, turbidity, initial pH, meteorological condition

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural esencial para el ser humano, este recurso renovable brindado por la naturaleza satisface muchas de nuestras necesidades. Sin embargo, en los últimos años, las actividades antropogénicas y los efectos del cambio climático vienen perturbando y deteriorando de manera progresiva la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos en todo el mundo.

Las aguas superficiales, como ríos, lagos y quebradas son una de las principales fuentes hídricas de abastecimiento para consumo humano; no obstante, el acceso a un agua de calidad se ha convertido en uno de los principales desafíos ambientales y de salud pública en diversos países de América Latina, debido a que estas fuentes superficiales de agua están expuestas a procesos de contaminación natural y antrópica. Entre los parámetros que limitan la calidad del agua, la turbidez ocupa un papel fundamental ya que esta no solo afecta su apariencia estética, sino que también reduce la eficiencia de los procesos posteriores dentro de las plantas de tratamiento, especialmente la desinfección, ya que las partículas suspendidas pueden proteger a los microorganismos patógenos e interferir en la acción de los desinfectantes.

Tradicionalmente, este proceso se ha llevado a cabo mediante el uso de coagulantes químicos o también conocidos como sintéticos, siendo el sulfato de aluminio y las sales férricas los más empleados. Si bien estos compuestos presentan una alta eficiencia en la remoción de la turbidez, su uso está asociado a desventajas, como la generación de grandes volúmenes de lodos, presencia de residuos metálicos en el agua tratada y efectos ambientales negativos vinculados a su disposición final por lo que se aconseja eliminarlos adecuadamente. Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y compatibles con la salud y el ambiente

En este contexto, los coagulantes de origen natural han despertado un creciente interés debido a su disponibilidad local, biodegradabilidad, baja toxicidad y menor impacto ambiental. Entre estas alternativas podemos encontrar a las semillas de *Carica papaya*, una materia prima abundante en las zonas tropicales y generalmente considerada como un desecho agroindustrial, pero las cuales se caracterizan por poseer proteínas y compuestos bioactivos capaces de neutralizar las cargas superficiales de las partículas coloidales, favoreciendo su desestabilización y posterior aglomeración.

No obstante, la eficiencia de este coagulante natural puede variar según las características del agua, el pH y la dosis aplicada, lo que hace necesario desarrollar investigaciones específicas que evalúen su desempeño en diferentes muestras de agua. En tal sentido la presente investigación se plantea el siguiente problema ¿Cuál es la eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación? Asumiendo como hipótesis que, la eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal es superior al 90.00% en condiciones meteorológicas con y sin precipitación

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación

1.1.2. Objetivos específicos

Obtener un coagulante de semillas de *Carica papaya*

Determinar la dosis óptima de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación

Determinar la eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación

II. REVISIÓN LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Amran et al. (2021), en su artículo científico “Potencial del biocoagulante derivado de las semillas de *Carica papaya* para eliminar la turbidez del agua contaminada evaluada mediante estudio experimental y basado en modelos” evaluaron el potencial de las semillas descascaradas de la *Carica papaya* como biocoagulante en el tratamiento del agua turbia contaminada. En su proceso metodológico las semillas fueron acondicionadas y descascaradas para su posterior secado en estufa por 24 horas a 50°C. Las semillas secas se trituraron y tamizaron con el objeto de obtener un polvo fino y uniforme. El proceso de la coagulación consistió en mezclar 500 mg de polvo de semillas en 500 ml de agua destilada

Sains (2021), en su artículo científico “Semillas descascaradas de *Carica papaya* como coagulante para mejorar la calidad de agua del río”, desarrolló ensayos de coagulación y floculación en diferentes muestras de agua, variando tanto las dosis del coagulante como los valores de pH con el propósito de encontrar la dosis óptima en las diferentes condiciones meteorológicas. Asimismo, caracterizó al coagulante natural mediante diversos análisis fisicoquímicos, en donde se determinó que la carga superficial era de +0.4meq/g y el contenido proteico de 363mg/g. En cuanto a la remoción de la turbidez, se observó que la mayor remoción se alcanzó en una muestra de agua con pH=4 a una dosis de 196mg/L en donde eliminó hasta un 87.6% la turbidez, un 82.3% en nitratos y un 62.1% coliformes totales.

Gómez & Medina (2021), desarrollaron un trabajo de investigación titulado “Determinación de la capacidad coagulante de las semillas de papaya para la remoción de turbidez en el tratamiento de aguas superficiales”. Los autores señalaron que, las semillas de papaya poseían efectos coagulantes, ya que, al analizar sus muestras iniciales, estas se caracterizaban por presentar un color amarillo negruzco, una turbidez de 170NTU, solidos suspendidos totales (SST) de 138mg/L y 550 Pt/Co de color, después del uso del coagulante natural, se observó que todas las muestras se clarificaron. Además, mencionaron que la dosis óptima del coagulante natural en la remoción de la turbidez del agua fue de 0.5gr en una

solución de 800ml, ya que esta dosis logró la remoción del 100% de la turbidez, el 99.28% de SST y 99.27% de color.

García (2019), en su estudio titulado “Evaluación de la actividad coagulante de la semilla de Papaya (*Carica papaya*) en muestras de agua recolectadas en la cuenca alta del Río Bogotá”; señaló que, la muestra de agua recolectadas en la cuenca obtuvo una reducción del 66.44% de la turbidez al usar la semilla de *Carica papaya* como coagulante.

Limongi & Mendoza (2022), en su artículo científico llamado “Aplicación de coagulantes obtenidos de las semillas de habas (*Vicia faba*) y durazno (*Prunus persica*) en la potabilización del agua”; los autores señalaron que, el durazno (*Prunus persica*) poseía una óptima coagulación en un pH de 4.74, con una dosis 16 mg/L y a una concentración del 10%, por otro lado, en el caso del haba (*Vicia faba*) presentó una óptima coagulación en un pH de 9, con una dosis de 5mg/L y a una concentración del 5%. Bajo las condiciones mencionadas, los resultados obtenidos en la remoción de la turbidez del agua respecto al durazno (*Prunus persica*) fue de 89.07% mientras que la semilla de haba (*Vicia faba*) su porcentaje de remoción fue de 93.91%. De esta manera concluyeron que ambas semillas eran eficaces en la remoción de partículas, considerándolas alternativas viables por su alta eficacia, su bajo costo en la aplicación y por su baja producción de lodos inocuos para el medio ambiente

2.1.2. Nacionales

Lopez & Bejar (2024), en su artículo científico denominado “Remoción de turbidez mediante aplicación de coagulantes de papaya y pitahaya en aguas residuales”, tuvieron como objetivo determinar y comparar la eficiencia de dos coagulantes: las semillas de papaya (*Carica papaya*) y la cascara de pitahaya amarilla (*Persea americana*) en la remoción de turbidez presente en aguas residuales provenientes de los pozos de Arunta, en la región de Tacna. Asimismo, se examinó la influencia sobre el pH del agua. En el proceso metodológico las semillas de *Carica papaya* fueron lavadas, acondicionadas, deshidratadas en una estufa a 70°C durante 1 hora, trituradas en un mortero, tamizados y finalmente almacenadas para su uso posterior. Los resultados de la coagulación indicaron que a una concentración de 15 g/L se redujo la turbidez inicial de 137.9 NTU a 15.83 NTU y respecto a los valores del pH no se mostró una diferencia significativa, obteniendo un rango de 7.2 a 7.8

Arenas & Mamani (2023) en su tesis titulada “Evaluación de la eficiencia de biofloculantes obtenidos a partir de *Opuntia Ficus Indica*, *Hylocereus Undatus*, *Solanum Tuberosum* y mezcla de ellos en la mejora de la calidad de aguas destinadas para consumo humano en el distrito de Samegua-Moquegua”; tuvieron como objetivo poder determinar la eficiencia de los biofloculantes respecto al sulfato de aluminio. Evaluando la turbidez, sólidos totales disueltos (STD) y conductividad eléctrica (CE). La muestra de agua inicial presentó una turbidez de 25 NTU, 134 mg/L de STD y una CE de 268 uS/cm. El sulfato de aluminio a una dosis de 30mg/L removió el 98.08 de la turbidez. Por su parte los biofloculantes como la *Opuntia ficus indica* a una dosis de 50 mg/L, el *Hylocereus undatus* a una dosis de 300mg/L y el *Solanum tuberosum* a una dosis de 10 mg/L lograron una remoción de la turbidez del 97.37%, 85.04% y 97.87% respectivamente. La mezcla de *Opuntia ficus indica* y *Solanum tuberosum* a dosis de 50 mg/L y 10 mg/L respectivamente logró una remoción del 91.63%.

Carpio (2019), en su tesis titulada “Evaluación del Uso de Semillas de *Mangifera Indica L* (Mango) como coagulante para el tratamiento de Aguas Residuales de la PTAR Munives de VES-Lima” en la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, tuvo como objetivo poder evaluar el uso de las semillas de *Mangifera Indica L* como coagulante, en el presente estudio al aplicar el biofloculante a una dosis de 50 mg/L en una muestra de agua con una turbidez de 19.9 NTU, se obtuvo un porcentaje de remoción de la turbidez al 80.3%. Asimismo, en una muestra de agua con una turbidez de 209 NTU, la dosis óptima identificada fue de 250mg/L, el cual produjo una remoción de la turbidez al 74.4%, obteniendo así una turbidez del agua de 53.5 NTU. Y respecto al pH de las muestras no se generaron variaciones significativas en sus valores después del uso del coagulante orgánico.

2.1.3. Locales

El estudio de Espírtu-León (2023) tuvo como objetivo principal investigar la eficacia del mucílago de la planta *Trimfetta rhomboidea* Jacq. como floculante en la remoción de turbiedad del agua de consumo en la UNAS. El estudio se llevó a cabo mediante experimentos con aplicación de distintas dosis de este polvo en diferentes muestras de agua. Los resultados indicaron que a una dosis óptima de 0.6 mg/l y con una turbiedad inicial de 15,5 NTU, la eficiencia de remoción fue del 73,17% y con una turbiedad final de 3,65 NTU; para 56,1 NTU, la eficiencia fue del 87,71% con una turbiedad final de 2,81 NTU; para 92,4 NTU, la eficiencia fue de 95,35% con una turbiedad final de 1,27 NTU. Además, para una turbiedad inicial extremadamente alta de 266 NTU, la eficiencia fue del 95,85% utilizando una dosis de 1 mg/l, resultando en una turbiedad final de 2,41 NTU. De esta manera se concluyó que el presente floculante fue altamente eficaz para la remoción de turbiedad en agua, con eficiencias que oscilan entre el 73,17% y el 95,85%

Por su parte, el estudio de Ruiz-Ortega (2022) se centró en desarrollar un modelo matemático basado en la superficie de respuesta para optimizar la remoción de turbidez en el agua utilizando *Aloe vera* (L.) (sábila) como agente floculante. La metodología incluyó la determinación de la concentración óptima de alúmina y un 1% de sábila bajo diferentes valores de pH y turbidez inicial. A partir de los datos obtenidos, se optimizaron las dosis de los coagulantes utilizando el modelo matemático de superficie de respuesta. La validación del modelo se realizó a través de métodos gráficos y la aplicación de índices matemáticos para evaluar su eficacia. Los resultados demostraron que la turbidez, el pH y la dosis del coagulante fueron factores determinantes en la eficiencia de la remoción de turbidez del agua. Según el modelo de superficie de respuesta, el volumen óptimo de sábila al 1% para alcanzar la mayor eficiencia fue de 0,1 mL y 0,4 mL por cada 500 mL de agua. El modelo matemático indicó que el uso de *Aloe vera* como floculante fue una alternativa viable y efectiva para el tratamiento del agua en áreas rurales.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Papaya (*Carica papaya*)

El cultivo de papaya (*Carica papaya*) se cultiva en terrenos con abundante humedad y que sean ricos en materia orgánica. Las condiciones climáticas ideales para su buen desarrollo incluyen una precipitación anual de 1500 a 2000 mm distribuida entre 6 y 8. Una temperatura que oscila entre los 22 y 26°C, con vientos ligeros; suelos de textura franca con un buen drenaje y con un contenido de materia orgánica cercano al 3% y un pH de 6 a 7. Esta planta genera frutos a lo largo de todo el año y es ampliamente cultivada en zonas tropicales del mundo (Annegowda y col. 2014). Los vientos fuertes representan un peligro para la planta, ya que podrían romper su tallo debido al peso significativo de sus frutos, sin embargo, los vientos suaves resultan ser beneficiosos para la planta debido a que promueven la polinización y aireación. Se conoce que todas las partes de la planta (frutos, raíces, corteza, cascara, semillas y pulpa) poseen efectos beneficiosos para la salud. Estos beneficios se atribuyen principalmente a su alto contenido de vitaminas A, B y C, así como a la presencia de enzimas proteolíticas como la papaína y la quimopapaína, que poseen propiedades antivirales, antifúngicas y antibacterianas (Elgadir, Salama y Adam, 2014)



Figura 1. Árbol de papaya
Fuente: (González, 2018)

2.2.1.1. Taxonomía

Según Córdova (2010), señala que, el género *Carica* comprende alrededor de 21 especies de plantas, entre las cuales *Carica papaya* destaca principalmente por su relevancia en la alimentación humana. A continuación, se presenta su clasificación taxonómica:

Tabla 1. Clasificación Taxonómica

Reino	Vegetal
División	Antophyta
Clase	Dicotiledónea
Orden	Parietales
Familia	Caricácea
Genero	<i>Carica</i>
Especie	<i>Papaya</i>

Fuente: Elaboración propia

Según una síntesis taxonómica presentada en el estudio de biodiversidad en el Perú, titulado “Línea de base de la diversidad de la papaya peruana con fines de bioseguridad”, señala que el género *Carica* es actualmente considerado “monoespecífico”, ya que solo incluye a *Carica papaya*, pues otras especies fueron reclasificadas a géneros distintos (MIMAN, 2023)

2.2.1.2. Características de la papaya

La papaya es una planta herbácea de tallo único, succulento y hueco, excepto en los nudos. No presenta ramificaciones y puede llegar a medir entre 1.80 a 5.50 metros de altura y presentar un diámetro de 10 a 30 centímetros (Franco, 2015). Posee una raíz principal pivotante que puede extenderse hasta un metro de profundidad, lo que le permite soportar tanto el peso de los frutos como las condiciones adversas del entorno. Las raíces secundarias se expanden en un radio de 80 cm., y la mayor cantidad de raíces absorbentes se localizan en los primeros 20 cm. del suelo. En cuanto a sus hojas, las hojas del cultivo poseen un limbo que puede medir entre 25 a 75 centímetros y presentar entre 7 a 10 lóbulos. Sus flores de color blanco, posee 5 pétalos y 5 sépalos. Según su morfología floral, las plantas pueden ser femeninas, masculinas o hermafroditas (Córdova, 2010).

2.2.1.3. Características del fruto

En cuanto a su fruto, la papaya produce un fruto que se clasifica como baya, de forma cilíndrica y alargada. La forma de los frutos depende de la variedad y del tipo de flor del cual se ha formado. Dependiendo de las variedades, los frutos pueden tener dimensiones que van desde los 15 a 50 centímetros de longitud, de 12 a 25 centímetros de diámetro y un peso que oscila entre 0.5 a 25 libras o más. Está compuesto por 3 partes: exocarpio o cascara, mesocarpio o pulpa y el endocarpio que contiene las semillas y el mucilago (Córdova, 2010). En el interior de la fruta se encuentran aproximadamente 500 semillas negras de unos 5 mm de longitud (Propaya, 2011).



Figura 2. Fruta de papaya.

Fuente: (González, 2018)

La pulpa del fruto está compuesta por agua, vitaminas, azúcares, minerales, papaína y sustancias colorantes. Su color puede variar desde un tono amarillo pálido hasta un matiz rojizo. Su consumo está ampliamente extendido a nivel mundial, se le utiliza en diversas preparaciones como jugos, postres, platos gourmet, entre otros (Córdova, 2010).

2.2.2. Semillas de papaya

Las semillas de papaya se encuentran en la cavidad central del fruto, son de forma ovoide y de color marrón oscuro cuando está madura y su tamaño varía entre 4 a 6 milímetros. Cada semilla está compuesta por un pequeño embrión, que se encuentra aplanado lateralmente, y está rodeado por el endospermo y una cubierta formada por 2 capas: una interna dura y rugosa denominado endotesta, y una capa externa llamada sarcotesta, la cual es un fluido delgado y mucilaginoso (Gil & Miranda, 2005)



Figura 3. Semilla de papaya.

Fuente: (González, 2018)

Las semillas representan entre el 12 al 22% del fruto, las cuales están cubiertas por una capa gelatinosa (Navarro, Rojas, Lazcano & Vera, 2016). Cada fruto puede generar de 300 a 800 semillas, las cuales poseen un sabor picante y contiene una cantidad considerable de grasa amarilla (Córdova, 2010).

Las semillas tienen una composición en base seca aproximadamente de un 33% de aceite y un 29% de proteína. Este aceite contiene vitamina C, lo que le da un aroma similar al del chocolate tostado cuando se convierte en polvo. Su color es ligeramente verde, con un índice de yodo de 74.80, indicando un bajo contenido de ácidos grasos. Los ácidos grasos más predominantes en su composición son el linoleico, palmítico, oleico y esteárico (Parni & Verma, 2014).

Según Hernández (2015); señala que, investigaciones realizadas en Italia y Somalia revelaron que las semillas de papaya contienen 18 aminoácidos y que entre los principales encontramos al ácido aspártico, arginina, ácido glutámico, prolina, lisina y tirosina

Tabla 2. Composición química proximal de las semillas de *Carica papaya*

Proteína	Contenido aprox.	Perfil
Ácidos grasos (lipídico)	33%	Linoleico
		Palmítico
		Oleico
		Esteárico
Proteínas (Aminoácidos)	29%	Ácido aspártico
		Arginina
		Acido glutámico
		Prolina
		Lisina
		Tirosina

Fuente: Elaboración propia

2.2.3. Tipos de coagulantes

Los coagulantes empleados para el tratamiento del agua potable se clasifican en 2 categorías principales según su origen: coagulantes inorgánicos o sintéticos y coagulantes naturales

2.2.3.1. Coagulantes inorgánicos o sintéticos

Los coagulantes inorgánicos o también llamados químicos se utilizan ampliamente en los tratamientos de agua potable y residuales. Poseen la capacidad de actuar tanto como coagulantes y floculantes. A menudo se caracterizan por llegar a ser nocivos para la salud humana y al medio ambiente debido a la generación de lodos residuales y subproductos químicos (Cedeño & Sacoto, 2019).

2.2.3.2. Coagulantes naturales

Los coagulantes orgánicos o también llamados naturales son sustancias hidrosolubles derivados de materiales biodegradables, tales como de fuentes vegetales y animales. Estos se caracterizan por funcionar de manera análoga a los coagulantes inorgánicos y sobre todo por no causar impactos significativos en el ambiente, y en la salud humana debido a su alta biodegradabilidad y a su nula toxicidad, convirtiéndose así en una alternativa viable (Cedeño & Sacoto, 2019).

- Semillas de *Carica papaya*:

Las semillas de *Carica papaya* contienen proteínas y compuestos bioactivos, tales como las proteasas y grupos funcionales cargados positivamente, los cuales actúan como agentes coagulantes, neutralizando las cargas negativas de las partículas coloidales. La carga superficial registrada del coagulante derivado de la semilla de papaya fue de +0.4 meq/g y un contenido de proteínas de 363 mg/g, la cual es una carga positiva y aunque el valor es bajo (Sains, 2021)

2.2.4. Aguas superficiales

Las aguas superficiales comprenden todos los cuerpos de agua que se encuentran sobre la superficie del terreno, como ríos, lagos, embalses, y arroyos, entre otros. Estas son esenciales tanto para los ecosistemas como para las actividades humanas, ya que abastecen de agua para el consumo humano, la agricultura, la industria y la recreación. Sin embargo, su calidad y disponibilidad pueden verse afectadas por diversos factores antropogénicos, como la descarga de aguas residuales y la contaminación agrícola e industrial.

La turbidez es uno de los principales problemas que afectan a las aguas superficiales. Este parámetro mide la claridad del agua y está influenciado por la presencia de partículas en suspensión que pueden ser de origen orgánico, como restos de plantas y microorganismos, o inorgánico, como sedimentos y minerales.

2.2.5. Turbidez

La turbidez es una medida de la claridad del agua y refleja la cantidad de partículas suspendidas que contiene, las cuales pueden ser de origen orgánico o inorgánico. Esta característica es crucial porque impacta directamente en la calidad del agua, afectando procesos como la fotosíntesis acuática y la eficacia de los tratamientos de potabilización. La turbidez elevada puede ocultar microorganismos patógenos, reduciendo la efectividad de la desinfección y comprometiendo la seguridad del agua para el consumo humano. Su control es fundamental en la gestión de recursos hídricos y en el tratamiento de aguas superficiales.

La turbidez no solo afecta la estética del agua, sino que también tiene impactos negativos sobre la vida acuática y complica el tratamiento para el consumo humano, ya que puede proteger a patógenos de los procesos de desinfección y reducir la eficacia de los filtros.

2.2.6. Coagulación

La coagulación es un proceso que se caracteriza por alterar la estabilidad de las partículas coloidales finas suspendidas presentes en el agua. Este proceso consiste en la adición de coagulantes de origen orgánico o sintético al agua, los cuales dan origen a diversas reacciones tanto físicas y químicas, su principal función es la neutralización de las cargas electrostáticas negativas de las partículas coloidales, produciendo así que se aglutinen en pequeñas masas llamadas microfloculos, los cuales se caracterizan por poseer un peso específico superior a la del agua (Ojeda, 2012).

En el ámbito del tratamiento del agua, el proceso de la coagulación es utilizado ampliamente para disminuir la turbidez, reducir parcialmente el color y erradicar las bacterias patógenas presentes en el agua. Además, una coagulación efectiva, asegura una alta eficiencia de las siguientes etapas: floculación y sedimentación (Mrad, 2021).

2.2.7. Mecanismos de la coagulación

La coagulación es el resultado de una combinación de interacciones físicas y químicas, donde se pueden identificar al menos cuatro mecanismos distintos basados en las dos teorías de estabilización, tanto del modelo físico como del químico (Pérez, et al; 1977).

2.2.7.1. Doble capa

Las partículas coloidales cargadas electrostáticamente están rodeadas por una doble capa, la cual está compuesta por iones de agua próximos a la superficie del coloide y por iones negativos provenientes de la propia partícula. Cuando dos de estas partículas se acercan, sus capas difusas generan una fuerza de repulsión que las aleja. Sin embargo, al adicionar un coagulante al agua, este reduce la intensidad de estas fuerzas repulsivas y disminuye la distancia entre ellas, debido a que dicho coagulante posee iones con cargas opuestas a las partículas coloidales (López, 2018).

2.2.7.2. Absorción y neutralización de cargas

Este mecanismo de coagulación ocurre cuando las superficies de los coloides, que posee iones negativos, atraen a los iones positivos del coagulante añadido al agua, formando así la primera capa adherida al coloide. Dicha atracción es denominada como la potencial electrocinética (Medina, 2018). En muchos casos dicha atracción que genera un desplazamiento de los coloides y la interacción mutua entre ellos, puede ser insuficiente, por lo que requiere de una energía adicional, como la agitación mecánica (López, 2018).

2.2.7.3. Atrapamiento de partículas en un precipitado

La formación de un atrapamiento de partículas ocurre cuando las partículas coloidales previamente neutralizadas por coagulantes son agrupadas dentro de un floc. Durante su formación se establece una relación entre el volumen del coagulante a añadir y la turbidez del agua, donde a concentraciones altas de turbidez se requiere menor cantidad de coagulante a emplear (Andía, 2000)

2.2.7.4. Adsorción y formación de puentes

Este mecanismo de coagulación es la opción más económica para tratar a las partículas coloidales negativas, utilizando un polímero sintético aniónico (López, 2018). Para explicar este fenómeno, se ha propuesto la teoría del “puente”, que indica que los polímeros con moléculas muy largas contienen grupos químicos que interactúan con la superficie de las partículas coloidales, adsorbiéndolas.

Cuando la molécula del polímero adsorbe una partícula coloidal en uno de sus extremos, los otros sitios de la molécula son libres para adsorber otras partículas. Es por lo que se considera que el polímero actúa como un puente o unión entre las partículas. Sin embargo, cuando hay un exceso de carga de polímeros, estos no pueden funcionar como puentes, lo que resulta en una reestabilización de las partículas (Barrenechea, 2004)

2.2.8. Etapas de la coagulación

Las etapas de la coagulación en el tratamiento del agua incluyen varios pasos clave diseñados para mejorar la calidad del agua al reducir la turbidez, eliminar contaminantes y preparar el agua para la desinfección. Las principales etapas son:

2.2.8.1. Mezclado Rápido

En esta etapa inicial, el coagulante se añade al agua en un proceso de mezcla rápida para distribuir el coagulante de manera uniforme. Esto ayuda a desestabilizar las partículas suspendidas al neutralizar sus cargas y promover la agregación. El mezclado rápido típicamente dura entre 1 y 3 minutos y se lleva a cabo a altas velocidades de agitación.

2.2.8.2. Formación de Floc o Floculación

Tras el mezclado rápido, la velocidad de agitación se reduce para permitir la formación de floc. En esta etapa, las partículas desestabilizadas empiezan a aglutinarse en flóculos más grandes, facilitando su posterior eliminación. La floculación se realiza típicamente a una velocidad más lenta para promover la colisión suave entre los flocos, y puede durar de 10 a 30 minutos.

2.2.8.3. Sedimentación

Los flóculos formados, que son más pesados, se asientan en el fondo del tanque de sedimentación debido a la gravedad. Este proceso puede durar entre 30 minutos y 2 horas, dependiendo del diseño del sistema y del tipo de coagulante utilizado.

2.2.8.4. Separación

Los flóculos asentados se separan del agua clara. El agua clarificada continúa hacia las siguientes etapas de tratamiento, como la filtración y la desinfección, mientras que los lodos de coagulación se recogen y se tratan o eliminan según los requerimientos ambientales.

2.2.9. Tipos de coagulación

Andia, 2000; señala que, existen dos tipos básicos de coagulación: por adsorción y por barrido.

2.2.9.1. Coagulación por adsorción

Este proceso ocurre cuando el agua a trabajar contiene una alta concentración de partículas coloidales, y que en el agregar el coagulante, los compuestos solubles de este son adsorbidos por los coloides, lo que resulta en la formación casi instantánea de los flóculos. Al agregar al agua dosis adecuadas de coagulantes, se forman especies solubles

2.2.9.2. Coagulación por barrido

La coagulación por barrido es un mecanismo de tratamiento de agua en el que se utilizan dosis elevadas de coagulantes para formar precipitados que literalmente "barran" las partículas suspendidas presentes en el agua. Este proceso es efectivo para aguas con alta turbidez donde hay abundancia de partículas coloidales y suspendidas. A continuación, se describen los aspectos clave de la coagulación por barrido:

Adición de Coagulante: Se añade una cantidad considerable de coagulante al agua, generalmente más alta que en otros métodos de coagulación. Esto promueve la formación rápida de precipitados de hidróxido, que son los agentes principales en este proceso.

Formación de Precipitados: Los coagulantes reaccionan en el agua y forman precipitados de hidróxido. Estos precipitados son esencialmente flocs grandes y pesados que pueden capturar y enredar partículas suspendidas a medida que se forman y se asientan.

Barrido de Partículas: A diferencia de la coagulación por adsorción, donde los flóculos crecen por agregación de partículas desestabilizadas, en la coagulación por barrido, los precipitados formados arrastran las partículas suspendidas hacia el fondo del tanque. Las partículas son "barridas" o encapsuladas dentro de los flocs, en lugar de agregarse a través de la neutralización de cargas.

Sedimentación: Los flóculos grandes y densos se asientan rápidamente al fondo del tanque de sedimentación. Este proceso es eficiente en la remoción de turbidez y otros sólidos suspendidos.

Este tipo de coagulación es particularmente útil en aguas altamente turbias y es eficaz en la reducción de la carga de partículas, aunque puede requerir un manejo cuidadoso de los lodos generados, dado que la cantidad de precipitado formado es significativamente mayor en comparación con otros métodos de coagulación.

2.2.10. Factores que influyen en la coagulación

2.2.10.1. Temperatura

La temperatura afecta la velocidad de las reacciones químicas involucradas en la coagulación y la velocidad de sedimentación de los flóculos. En general, temperaturas más altas aceleran estas reacciones, lo que puede mejorar la formación de flóculos y su asentamiento. Sin embargo, temperaturas extremadamente altas o bajas pueden afectar negativamente la eficiencia del proceso, alterando la viscosidad del agua y la solubilidad de los coagulantes.

2.2.10.2. Dosis óptima del polímero sintético

La determinación de la dosis óptima de un polímero sintético es vital para maximizar la eficiencia de la coagulación. Una dosis insuficiente puede no permitir una adecuada agregación de partículas, mientras que una dosis excesiva puede causar la estabilización de las partículas por sobrecarga de coagulante, resultando en una menor remoción de turbidez. La dosis óptima depende de la calidad del agua de entrada y del tipo de polímero utilizado.

2.2.10.3. pH óptimo

El pH del agua influye significativamente en la carga y estabilidad de las partículas coloidales, así como en la hidrólisis y funcionamiento de los coagulantes. Cada coagulante tiene un rango de pH en el cual es más efectivo. Por ejemplo, el sulfato de aluminio es más eficiente en un rango de pH entre 5.5 y 6.5. Ajustar el pH dentro de este rango puede mejorar significativamente la formación de flóculos y la eficacia de la coagulación.

2.2.10.4. Concentración óptima

La concentración de las partículas en el agua también es un factor crítico. Una concentración muy baja puede no proporcionar suficientes puntos de contacto para la efectiva agregación de partículas, mientras que una concentración muy alta puede llevar a una competencia excesiva por los sitios de adsorción en los coagulantes, reduciendo la eficacia del proceso.

2.2.10.5. Mezcla

La mezcla adecuada durante la coagulación es esencial para distribuir uniformemente el coagulante y para fomentar el contacto entre las partículas que deben ser aglutinadas. Un mezclado insuficiente puede resultar en la formación de flóculos débiles o en una coagulación ineficaz, mientras que un mezclado excesivo puede romper los flóculos formados y disminuir la eficiencia de la coagulación.

2.2.11. Floculación

La floculación consiste en la agrupación de los coloides que perdieron su estabilidad durante el proceso de la coagulación. Una agitación lenta es indispensable para este proceso ya que favorece a la adhesión entre las partículas coaguladas, las bacterias y la materia suspendida. Los cuales proceden a denominarse macro flóculos y se caracterizan por poseer un grande diámetro y un peso superior a la del agua (Carpio, 2019). Existen 2 tipos de floculación. Una de ellas es la orto cinética la cual se genera por fuerzas externas cuya procedencia puede ser mecánico o hidráulico (paletas giratorias); mientras que la pericinetica se produce por el movimiento de agitación de las partículas (movimiento browniano) o debido al efecto del peso (Pérez, et al; 1977)

2.2.12. Test de jarras

El test de jarras es un procedimiento de laboratorio utilizado en el tratamiento de agua para determinar la eficacia de los coagulantes y optimizar las dosis de estos químicos necesarias para la coagulación y floculación en un proceso de tratamiento de aguas. Este método es esencial para diseñar y controlar las plantas de tratamiento de agua, permitiendo simular y ajustar las condiciones del proceso a pequeña escala antes de aplicarlas a escala real. A continuación, se describe cómo se lleva a cabo el Test de jarras:

a) Preparación de las Muestras: Se llenan varios recipientes, generalmente de un litro, con la misma cantidad de agua a tratar. Estos recipientes se conocen como "jarras".

b) Adición de Coagulantes: Se añaden diferentes dosis de coagulante a cada jarra para evaluar cuál es la más efectiva. Puede incluirse también el ajuste del pH y otros tratamientos químicos preliminares.

c) Mezclado Rápido: Inmediatamente después de añadir los coagulantes, se mezcla cada muestra con rapidez, generalmente a velocidades altas (aproximadamente 100-200 rpm) durante un corto periodo (1-2 minutos) para dispersar uniformemente el coagulante.

d) Mezclado Lento: Después del mezclado rápido, se reduce la velocidad de mezcla (generalmente a 20-40 rpm) durante un período más largo (unos 10-30 minutos) para permitir la formación de flóculos.

e) Sedimentación: Tras finalizar el mezclado lento, se deja reposar las jarras sin agitar para que los flóculos se asienten, usualmente durante 30 minutos a 1 hora.

f) Evaluación de Resultados: Se evalúa la calidad del sobrenadante en cada jarra, generalmente midiendo la turbidez del agua clarificada. El objetivo es determinar cuál dosis de coagulante y condiciones de mezclado producen el agua más clara.

g) Optimización: Los resultados obtenidos ayudan a determinar la dosis óptima de coagulantes y las condiciones operativas para aplicar en el proceso de coagulación y floculación a escala de planta.

Este Test es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y eficacia para predecir cómo reaccionará el agua a diferentes tratamientos antes de realizar cambios a gran escala, asegurando así la efectividad y eficiencia del tratamiento del agua.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La presente investigación se desarrolló en dos espacios complementarios. El trabajo de laboratorio, correspondiente a los análisis científicos de las muestras, se efectuó en el Laboratorio de Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Paralelamente, la recolección de muestras de agua superficial se llevó a cabo en la quebrada Naranjal – BRUNAS, también ubicada dentro de las instalaciones de dicha universidad

3.1.1. Ubicación política

Departamento : Huánuco
Provincia : Leoncio Prado
Distrito : Rupa Rupa
Ciudad : Tingo María



Figura 4. Ubicación geográfica del laboratorio de Recursos Hídricos – UNAS



Figura 5. Ubicación geográfica de la quebrada Naranjal – BRUNAS

3.1.2. Ubicación geográfica

Geográficamente el Laboratorio de Recursos Hídricos se encuentra ubicado a una altura de 660 m.s.n.m. cuyas coordenadas geográficas se detallan a continuación, junto con las correspondientes al punto de muestreo de la quebrada Naranjal.

Tabla 3. Coordenadas geográficas del laboratorio de Recursos Hídricos

Lugar	Coordenadas UTM 18L	
	Este (X)	Norte (Y)
Laboratorio de Recursos Hídricos – Universidad Nacional Agraria de la Selva	390272.965	8970839.593
Quebrada Naranjal – BRUNAS	390852.010	8969834.005

Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Clima

La estación meteorológica de Tingo María registró una temperatura promedio mensual de 23.9°C, con valores máximo de hasta 29.7°C y mínimas de 19.6°C. La precipitación anual media asciende a 3,429.0 mm, con una acumulación mensual promedio de 285.8mm (SENAMHI, 2018). Y según la Clasificación Climática de Warren Thornthwaite y el Sistema de Zonas de Vida de Holdrige, la ciudad de Tingo María, situada a 660 metros sobre el nivel del mar, presenta un clima cálido muy lluvioso de bosques muy húmedos premontanos, caracterizado por precipitaciones constantes durante todas las estaciones y una humedad relativa que oscila entre el 85% y el 100% (SENAMHI, 2018)

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

Recipientes de plástico, cajas petri, tamiz 0.25 mm (250 micras), mortero, piseta, vasos precipitados, fiola, pipetas, tamizador, baldes, cinta, bolsas herméticas, etiquetas adhesivas, cooler, guardapolvo y libreta de campo

3.2.2. Equipos

Balanza digital gramera, estufa, Test de jarras, turbidímetro, pHmetro digital, celular Samsung A50, laptop Lenovo, cronometro

3.2.3. Insumos

Semillas de *Carica papaya*, hidróxido de sodio ($NaOH$), ácido sulfúrico (H_2SO_4), soluciones tampón (pH 4, 7, 9), agua destilada y muestras de agua superficial con y sin precipitación.

3.2.4. Software

Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft power point, IBM SPSS Statistics (version 27)

3.3. Criterio de investigación

3.3.1. Nivel de investigación

La presente investigación corresponde al nivel explicativo. Esto se debe a que el estudio no se limita únicamente a describir el fenómeno de clarificación del agua, sino que tiene como propósito fundamental determinar y demostrar la relación causa – efecto entre las variables estudiadas. (Hernández et al, 2014). Específicamente, el estudio busca explicar la influencia de la dosis del coagulante, el pH inicial de medio y la condición meteorológica (causas) sobre la eficiencia en la remoción de turbidez (efecto) en aguas superficiales, permitiendo así comprender el comportamiento fisicoquímico del coagulante natural bajo diferentes condiciones operativas

3.3.2. Tipo de investigación

La presente investigación es tipo aplicada (Carrasco, 2005). Dado a que utiliza bases teóricas y científicas para resolver una problemática práctica específica: la dependencia de coagulantes químicos sintéticos en la potabilización del agua y la gestión de residuos agroindustriales. El estudio se orienta a validar la aplicación tecnológica de las semillas de *Carica papaya*, transformando un subproducto abundante en la región en un insumo de valor agregado. De esta manera, se propone una alternativa alineada con ecoeficiencia, que permite reducir el impacto ambiental de los lodos químicos. Asimismo, la investigación aporta criterios técnicos para la optimización del proceso de la clarificación del agua, al establecer las condiciones operativas precisas

3.3.3. Método de investigación

El presente estudio se desarrolló bajo el enfoque cuantitativo (Hernández Sampieri et al, 2018). Dado que se fundamenta en la recolección de datos numéricos orientados a la verificación de la hipótesis planteada y a la evaluación de los objetivos propuestos.

3.3.4. Operacionalización de las variables

Tabla 4. Operacionalización de variables.

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Tipo de escala
X: Eficiencia del coagulante de semillas de <i>Carica papaya</i>	Dosis del coagulante	0.0 gramos	mg/L	Racional
		0.2 gramos		
		0.3 gramos		
		0.4 gramos		
		0.5 gramos		
		0.6 gramos		
		0.7 gramos		
pH inicial del agua superficial	Alcalino (pH=9.00)	Unidades de pH	Racional	
		Neutro (pH=7.00)		
		Acido (pH=6.00)		
Y: Remoción de turbidez (%) en la quebrada Naranjal	Eficiencia de remoción	Porcentaje de reducción de la turbidez final respecto a la inicial	%	Racional
Z: Condición meteorológica	Condición meteorológica	Agua sin precipitación Agua con precipitación	No aplica	Nominal

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Diseño de investigación

De acuerdo con la clasificación metodológica de Hernández et al. (2014), la presente investigación corresponde a un diseño experimental de clase experimento puro, esta clasificación obedece a que realizo una manipulación controlada de las variables independientes para analizar su efecto causal sobre la variable dependiente en un entorno de laboratorio controlado. Específicamente, se aplicó un diseño experimental factorial trifactorial (2x3x7), el cual permitió evaluar no solo la influencia individual de cada factor, sino también la interacción conjunta entre ellos. La estructura del diseño factorial se conformó de la siguiente manera:

- **Factor A:** condición meteorológica => 2 niveles (sin precipitación y con precipitación)
- **Factor B:** pH inicial => 3 niveles (ácido: 6, neutro: 7, alcalino: 9)
- **Factor C:** dosis del coagulante => 7 niveles (0.0g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g)

Por su dimensión temporal, el estudio es de corte transversal, dado que la medición de la variable respuesta (turbidez final) se realizó en un momento único tras la aplicación de los tratamientos, sin realizar un seguimiento evolutivo de las mismas unidades a través del tiempo.

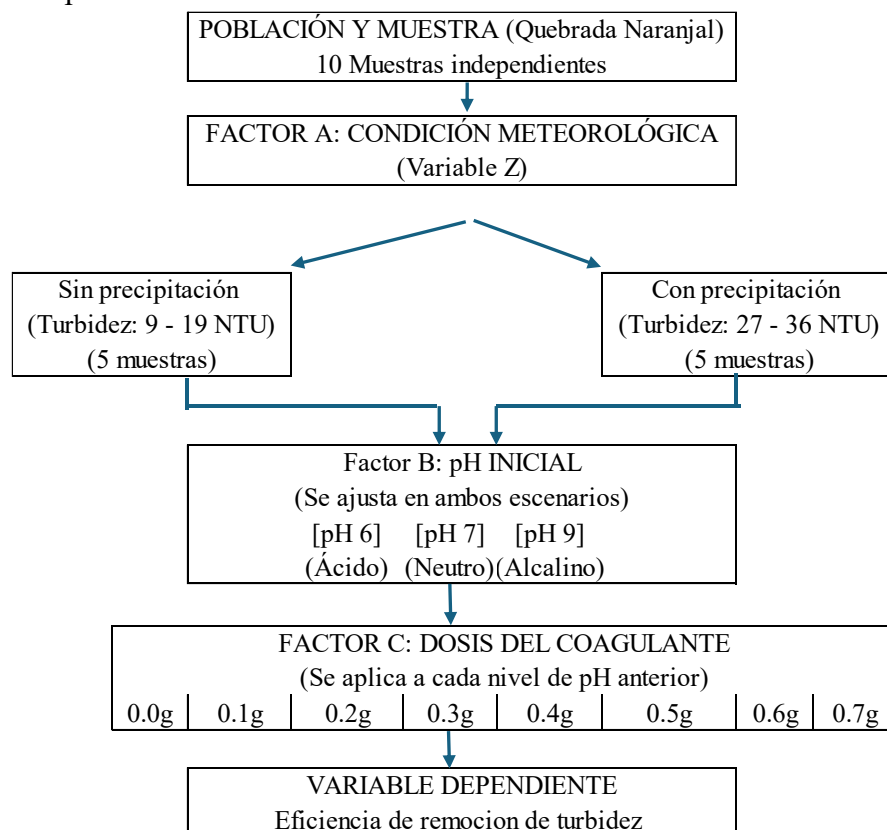


Figura 6. Esquema del diseño experimental de la investigación

3.3.6. Población y muestra

La población de estudio estuvo constituida por el cuerpo de agua superficial de la quebrada Naranjal, ubicada en el sector BRUNAS. Para la selección de las unidades de análisis se aplicó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, conformando una muestra total de 10 muestras de agua independientes. Cada unidad experimental estuvo constituida por un volumen de 40 litros, seleccionada estratégicamente en función de las condiciones meteorológicas: 5 muestras correspondientes a la condición de ausencia de precipitación y 5 a la condición de presencia de precipitación. Recolectadas en días distintos con el fin de garantizar la representatividad de la variabilidad natural de la turbidez del agua.

3.3.7. Repeticiones del experimento

Para asegurar la confiabilidad estadística y la precisión de los resultados las repeticiones se estructuraron en dos niveles:

- **Repeticiones independientes:** se realizaron 5 repeticiones completas del experimento por cada condición meteorológica. Este nivel de repetición permitió capturar la variabilidad natural de la turbidez por condición meteorológica (sin lluvia: 9.00NTU – 19.00 NTU; con lluvia: 27.00 NTU – 36.00 NTU)
- **Repeticiones técnicas:** cada unidad experimental se repitió tres veces, el valor reportado para el análisis de datos corresponde al promedio aritmético de estas tres mediciones, lo que proporciona una medida más precisa de los efectos de cada dosis. De esta manera, se mejora la exactitud y la confianza en las conclusiones obtenidas del experimento.

3.3.8. Análisis estadísticos

El procesamiento y análisis de los datos experimentales se realizó utilizando el software estadístico IBM SPSS Statistics (versión 27) y Microsoft Excel para la tabulación y generación de gráficos. El análisis se estructuró en dos etapas:

- **Estadística descriptiva:** se calcularon medidas de tendencia central (media aritmética) para consolidar los datos de las repeticiones técnicas. Estos resultados se organizaron en tablas de distribución de frecuencias y gráficos de líneas para visualizar el comportamiento de la turbidez final en función de la dosis y el pH en ambas condiciones meteorológicas (con/sin lluvia)
- **Estadística inferencial:** para determinar la validez estadística de los resultados y verificar el cumplimiento de las hipótesis planteadas, se procedió al procesamiento de los datos mediante técnicas de estadística inferencial

Tabla 5. Análisis estadístico inferencial

Tipo de análisis	Software	Prueba estadística	Finalidad del análisis
Estadística inferencial	IBM SPSS Statistics (versión 27)	Análisis de varianza (ANOVA) Trifactorial	Se aplicó un modelo lineal general para evaluar el efecto individual y la interacción de los tres factores independientes: condición meteorológica (con/sin precipitación), pH inicial (6, 7 y 9) y dosis del coagulante, sobre la eficiencia de remoción. Se consideró un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$) para determinar la significancia estadística de los efectos.
		Prueba T-Student	Se utilizó esta prueba paramétrica para la contrastación de la hipótesis general de la investigación, con el fin de determinar si el coagulante alcanza el estándar de eficiencia propuesta

Fuente: Elaboración propia

3.4. Metodología experimental

3.4.1. Obtención del coagulante de semillas de *Carica papaya*

La obtención del coagulante de semillas de *Carica papaya* involucra una serie de procesos secuenciales, los cuales se encuentran evidenciados en el siguiente flujograma.

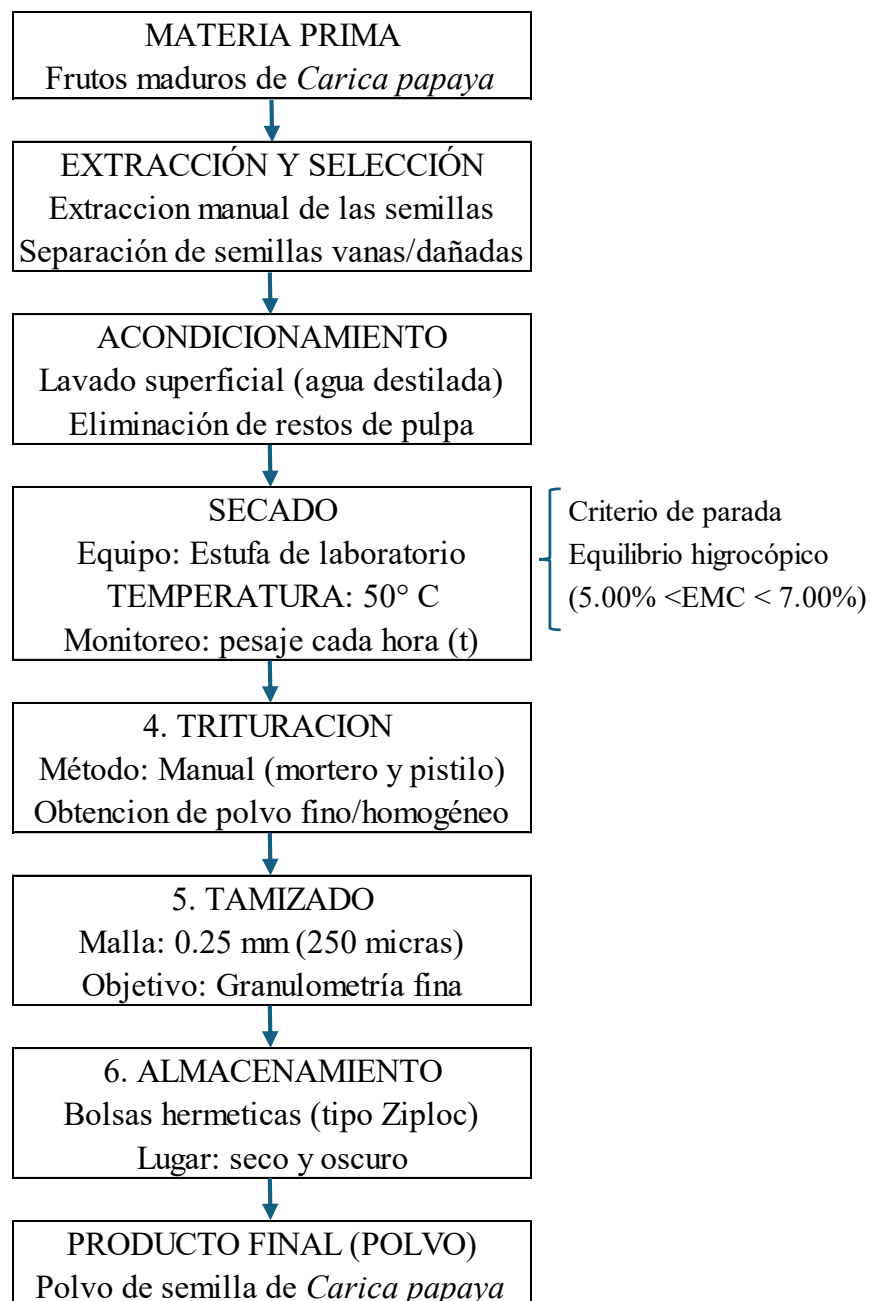


Figura 8. Flujograma para la obtención del coagulante natural de semillas de *Carica papaya*

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.1. Extracción y selección

Las semillas de *Carica papaya*, previamente extraídas de frutos maduros y proporcionadas de manera gratuita por una fuente local, fueron sometidas a un proceso de selección manual. Este procedimiento permitió descartar semillas inmaduras, deterioradas o en mal estado, conservándose únicamente aquellas que presentaban características óptimas para su posterior acondicionamiento y uso experimental.

3.4.1.2. Acondicionamiento de la materia prima

Las semillas seleccionadas fueron colocadas en un recipiente de plástico y lavadas con abundante agua con el fin de eliminar cualquier resto de pulpa adherida. Posteriormente, se transfirieron a un segundo recipiente, donde se mezclaron con agua destilada durante aproximadamente tres minutos, con el propósito de eliminar impurezas residuales. Transcurrido ese tiempo, se filtró el exceso de agua con un colador previamente enjuagado y finalmente se registró el peso total de las semillas acondicionadas.

3.4.1.3. Secado de las semillas y determinación del equilibrio higroscópico

Las semillas de *Carica papaya* previamente acondicionadas fueron distribuidas en diez cajas Petri, con un peso de 50 gramos en cada una y sometidas a un proceso de deshidratación en estufa de laboratorio a una temperatura constante de 50°C. Durante ese proceso, se realizó cada muestra fue pesada a intervalos de una hora con el fin de verificar un peso uniforme. Asimismo, es necesario mencionar que en caso de semillas se recomienda mantener un contenido de humedad en equilibrio higroscópico (EMC) de aproximadamente 5% al 7% en base húmeda, lo cual permite perseverar su viabilidad y funcionalidad (Gebre et al., 2025). Durante el proceso, se realizó un monitoreo gravimétrico registrando el peso de la muestra a intervalos de una hora ($t, t+1, t+2, \dots$). El secado se dio por finalizado al alcanzar el equilibrio higroscópico (EMC), condición que se verificó matemáticamente cuando la variación de peso entre dos mediciones consecutivas fue mínima respecto al peso inicial. Para determinar dicho equilibrio, se empleó la siguiente fórmula

$$EMC(\%) = \frac{P_t - P_{t+1}}{P_i} \times 100$$

Donde:

EMC: Porcentaje de humedad en equilibrio (variación entre horas)

P_t : Peso de la muestra en el tiempo t (g)

P_{t+1} : Peso de la muestra una hora después (g)

P_i : Peso inicial de la muestra fresca (g)

3.4.1.4. Trituración de las semillas

Una vez secas las semillas de *Carica papaya*, se procedió a su trituración manual utilizando un mortero y pistilo. Se aplicó una presión constante con movimientos circulares para asegurar una ruptura completa de su estructura hasta obtener un polvo fino y homogéneo.

3.4.1.5. Tamizado

El polvo fino obtenido de las semillas de *Carica papaya* en el proceso anterior, fue pasado por un tamiz de malla fina (0.25mm) para asegurar una granulometría uniforme y eliminar partículas grandes o aglomerados.

3.4.1.6. Almacenamiento

El polvo obtenido se almacena en bolsas herméticas, para evitar así la absorción de humedad del ambiente. Este paso es crucial para mantener la calidad y eficacia del polvo como coagulante en el tratamiento de aguas superficiales.

3.4.2. Recolección y acondicionamiento de las muestras de agua superficial de la quebrada Naranjal

La **Figura 9** ilustra el procedimiento metodológico aplicado para la preparación de las unidades experimentales. Este proceso abarca desde la captación del recurso hídrico en la fuente hasta su caracterización y estandarización fisicoquímica previa a los ensayos de coagulación.

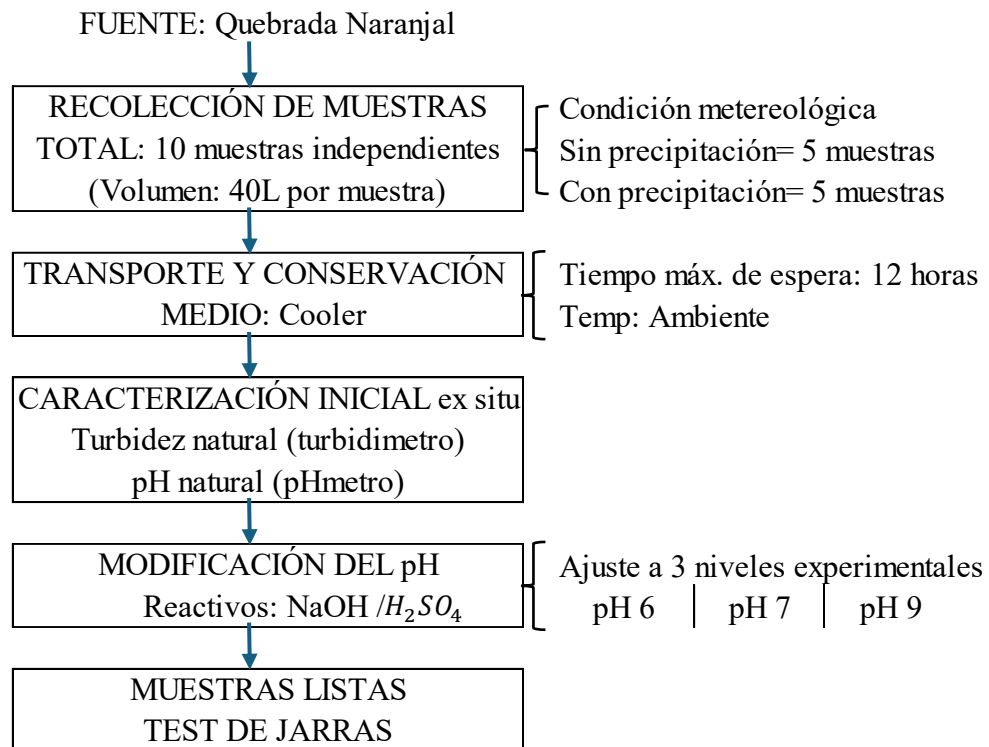


Figura 9. Flujograma para la caracterización inicial y acondicionamiento de las muestras de agua superficial

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.1. Recolección de las muestras de agua superficial

Por muestra se recolectaron dos baldes de 20L de agua superficial, utilizando recipientes previamente lavados con agua destilada y enjuagados con agua de la misma quebrada antes de su llenado para minimizar riesgos de contaminación externa. La recolección de las muestras se efectuó bajo dos condiciones meteorológicas diferenciadas: antes de una precipitación y después de una precipitación intensa, trabajando con cinco muestras independientes para cada condición.

Tabla 6. Recolección de las muestras de agua superficial

Condición meteorológica	Condición meteorológica	Nº muestras independientes (días distintos)	Unidades de captación por muestra	Volumen total recolectado por muestra
Condición 1	Sin precipitación	5	2 baldes de 20L	40 L
Condición 2	Con precipitación	5	2 baldes de 20L	40 L

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2. Transporte y conservación

Todas las muestras fueron etiquetadas adecuadamente y trasladadas al Laboratorio de Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Durante el traslado, se garantizó la cadena de frío resguardando las muestras de la luz solar directa y manteniéndolas en un conservador portátil (cooler) con geles refrigerantes a una temperatura de conservación de 4°C. Una vez en el laboratorio, las muestras se mantuvieron refrigeradas bajo esa misma condición térmica y fueron empleadas dentro de las 12 horas posteriores a su recolección, con el propósito de perseverar la estabilidad de sus parámetros físicoquímicos.

3.4.2.3. Caracterización inicial de las muestras

a) Medición del pH

La medición del potencial de hidrogeno (pH) de las muestras de agua superficial se realizó en el laboratorio, previo al inicio de los ensayos de coagulación. Se utilizó un potenciómetro digital (pH-metro) previamente calibrado con soluciones estándares (buffers) según las indicaciones del fabricante. Una vez calibrado, y con la muestra preparada, se introdujo el electrodo y se esperó hasta que la lectura se estabilizara. Es importante destacar que después de cada medición, el electrodo fue enjuagado con agua destilada con ayuda de una pisseta, a fin de evitar errores por contaminación cruzada.

b) Medición de la Turbidez

Para el análisis de la turbidez, se procedió a utilizar el turbidímetro del Laboratorio de Calidad de Agua. Como primer paso, se vertió una porción de la muestra en una celda de lectura limpia, llenándola hasta el volumen recomendado por el fabricante. Posteriormente se insertó la celda en la cámara de lectura del turbidímetro, se presionó el botón de lectura y se esperó a que el valor de turbidez se estabilizara en la pantalla. Los resultados obtenidos fueron registrados en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Entre cada muestra la celda se enjuago con agua destilada y se limpió externamente para evitar la contaminación cruzada y asegurar lecturas precisas. Se realizaron mediciones por duplicidad o triplicado para cada muestra independiente, registrando en valor promedio

3.4.2.4. Modificación del pH

Una vez registrado el pH natural de cada muestra de agua superficial, se procedió a su ajuste con el fin de obtener tres valores definidos de pH (9, 7, 6) por muestra. Y para ello se trabajó con dos compuestos químicos muy conocidos. Cada reactivo fue adicionado gradualmente en pequeñas cantidades, mientras las muestras eran sometidas a agitación constante, con el fin de asegurar una distribución homogénea y alcanzar con precisión el valor de pH establecido. Durante todo el proceso, el pH fue monitoreado continuamente mediante un pH metro digital. Los reactivos utilizados fueron el hidróxido de sodio ($NaOH$) para la alcalinización y el ácido sulfúrico (H_2SO_4) para la acidificación de las muestras.

Tabla 7. Modificación del pH de las diferentes muestras de agua superficial

Condición meteorológica	Condición de pH	Valor asignado	Agente modificador
Con y Sin precipitación	Acida	6.00	Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
	Neutra	7.00	Ajuste según pH inicial
	Alcalina	9.00	Hidróxido de sodio ($NaOH$)

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Determinación de la dosis óptima de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación

Para establecer la dosis óptima del coagulante de semillas de *Carica papaya*, se desarrollaron ensayos en el Test de jarras. Este procedimiento experimental tuvo como objetivo simular las etapas de coagulación, floculación y sedimentación a escala laboratorio, permitiendo evaluar el comportamiento del coagulante frente a la variabilidad fisicoquímica de la fuente de agua. Dada a la marcada heterogeneidad de la turbidez inicial de las condiciones meteorológicas, la determinación de la dosis óptima se realizó de manera estratificada (con y sin precipitación).

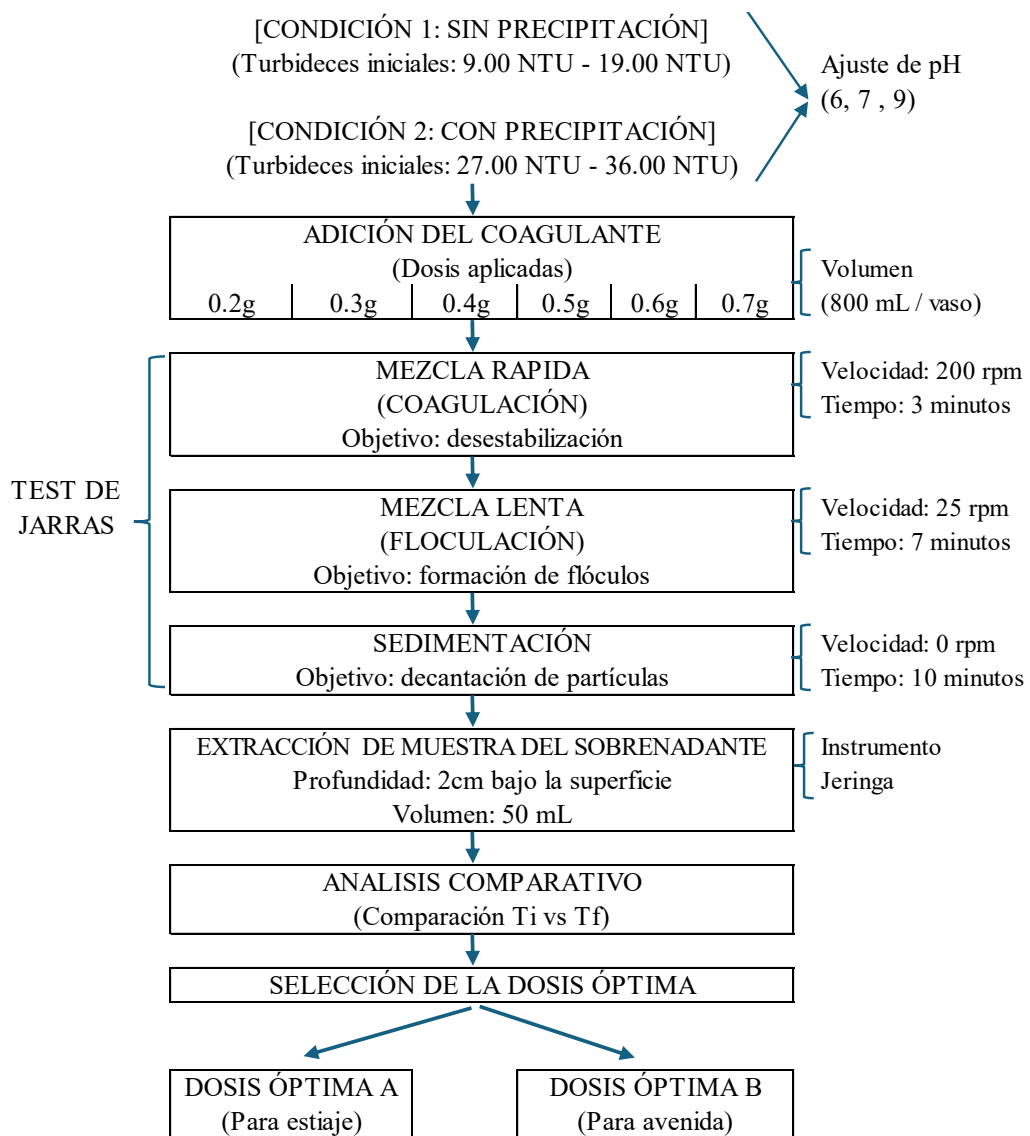


Figura 10. Flujograma para la determinación de la dosis óptima

3.4.3.1. Dosificación del coagulante

Para la dosificación de los tratamientos experimentales, se tomó como referencia el estudio de Gómez & Medina (2021), quienes reportan una eficiencia de remoción de turbidez del 90% y de sólidos suspendidos totales (SST) del 91.28% utilizando una dosis de 0.5g en condiciones neutras. Basado en este antecedente, se estableció un intervalo de evaluación que cubre valores inferiores y superiores a dicho referente, definiendo seis niveles de dosificación: 0.2g a 0.7g. Posteriormente se procedió al cálculo de la concentración equivalente para cada dosis mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración (C)} = \frac{\text{Peso (mg)}}{\text{Volumen (L)}}$$

Tabla 8. Concentraciones de las diferentes dosis a usar

Tratamientos	Peso del coagulante		Muestra de agua (L)	Concentración (mg/L)
	(g)	(mg)		
T1	0.2	200	0.8	250
T2	0.3	300		375
T3	0.4	400		500
T4	0.5	500		625
T5	0.6	600		750
T6	0.7	700		875

Fuente: Elaboración propia

La **Tabla 8** presenta las concentraciones del polvo de semillas de *Carica papaya* correspondientes a cada dosis evaluada, calculadas en función del volumen estandarizado de 0.8L de muestra utilizado en Test de jarras. Los valores resultantes representan la dosificación aplicada en cada tratamiento de agua superficial.

3.4.3.2. Test de jarras

Para la determinación de la dosis óptima del coagulante de semillas de *Carica papaya* en la remoción de turbidez, se trabajó con el equipo de Test Jarra del laboratorio, el cual dispone de 6 vasos precipitados. Cada vaso precipitado, previamente lavado, esterilizado y acondicionado, fue llenado con 800 mL de la muestra de agua superficial y rotulado según la dosis de coagulante asignada para su respectiva evaluación

El Test de jarras se desarrolló siguiendo tres etapas operacionales: mezcla rápida, mezcla lento y la sedimentación. La mezcla rápida consistió en una agitación intensa de 200 rpm durante 3 minutos, con el propósito de dispersar homogéneamente el coagulante en toda la muestra. Posteriormente, la mezcla lenta, la velocidad de agitación se redujo a 25 rpm durante 7 minutos, lo que favoreció la formación, crecimiento y estabilización de los flóculos. Finalmente, en la etapa de sedimentación, se detuvo la agitación y se permitió que la muestra reposara durante 10 minutos, permitiendo el asentamiento por gravedad de los flóculos formados. Se estandarizo el tiempo de sedimentación a 10 minutos para evaluar la cinética de sedimentación rápida, simulando condiciones hidráulicas críticas o de flujo continuo en plantas de tratamiento

Tabla 9. Las etapas del proceso de coagulación en el Test de jarras

Etapas del proceso	Fenómeno asociado	Velocidad de agitación	Tiempo
Mezclado rápido	Coagulación	200 rpm	3 minutos
Mezclado lento	Floculación	25 rpm	7 minutos
Sedimentación	Decantación	0 rpm	10 minutos

Fuente: Elaboración propia

La presente metodología se repitió en las diferentes muestras de agua superficial, tanto en condiciones con precipitación como sin precipitación, y bajo los distintos valores de pH evaluados (ácida, neutra y alcalina)

3.4.3.3. Dosis óptima de semillas de *Carica papaya* como coagulante

Una vez finalizada la etapa de sedimentación en el Test de jarras, se procedió a la extracción cuidadosa de una alícuota de aproximadamente 50ml de sobrenadante de cada unidad experimental. Esta recolección se realizó empleando una jeringa, la cual fue introducida a una profundidad estándar de 2 cm por debajo de la superficie libre del líquido, con el fin de evitar la perturbación de los flóculos sedimentados. A cada muestra recolectada se le midió la turbidez residual y el pH final. Cuyos valores fueron contrastados con los parámetros iniciales de la muestra cruda para evaluar el desempeño de cada tratamiento. El criterio para la determinación de la dosis óptima fue identificar aquella concentración de coagulante que logro la máxima reducción de turbidez. Es importante precisar que, debido a las diferencias fisicoquímicas del agua cruda, esta selección se realizó por cada condición meteorológica (con y sin precipitación)

3.4.4. Determinación de la eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación

Para cuantificar el desempeño del coagulante natural, se calculó el porcentaje de eficiencia de remoción (E) para cada unidad experimental. Este cálculo se realizó comparando la turbidez inicial de la muestra cruda frente a la turbidez residual obtenido tras el proceso de sedimentación. Se empleo la siguiente expresión matemática:

$$E (\%) = \left(\frac{T_i - T_f}{T_i} \right) \times 100$$

Donde:

E : Eficiencia de remoción (%)

T_i : Turbidez inicial de la muestra de agua (NTU)

T_f : Turbidez final o residual del sobrenadante (NTU)

La aplicación de esta fórmula a los datos obtenidos permitió identificar la dosis optima que maximiza la clarificación del agua. Cabe resaltar que este cálculo se efectuó de manera diferenciada por cada condición meteorológica (con y sin precipitación), con el fin de determinar el rendimiento optimo del coagulante según la carga de sedimentos especifica de cada condición

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Obtención del coagulante de semillas de *Carica papaya*

Para evaluar el rendimiento de la materia prima, se cuantifico la variación de masa de las muestras sometidas al proceso de deshidratación.

Tabla 10. Pérdida de peso total en gramos de las semillas de *Carica papaya*

Peso inicial de las semillas (g)	Peso de las semillas secas (g)	Pérdida de peso (g)	Peso del polvo obtenido (g)
500	144	356	210

En la **Tabla 10** se observa, que el peso inicial total de las diez muestras de semillas de *Carica papaya* fue de 500g y que, durante el proceso de secado en estufa a 50°C por un periodo de 5 horas, el peso final se redujo a 144g, registrándose una pérdida neta de 356g. Esta disminución equivale al 71% respecto al peso inicial, quedando únicamente un 29% de material seco. Estos datos confirman que las semillas de *Carica papaya* poseen un elevado contenido de humedad, lo cual coincide con lo reportado por Da Silva et al. (2025) y por Moran & Baca (2018); quienes señalan que, las semillas frescas de *Carica papaya* presentan un contenido de humedad inicial elevado, con valores que pueden oscilar entre 70% y 80% en base húmeda, lo que incrementa su susceptibilidad a la descomposición microbiana; y demanda un proceso de secado eficiente para garantizar su conservación a largo plazo.

Tabla 11. Porcentaje de pérdida de humedad por hora de las semillas de *Carica papaya*

Tiempo (horas)	Temperatura	Peso (g)	Pérdida de humedad (%)
0	50°C	500	0.00
1		408	18.40
2		308	38.40
3		198	60.40
4		170	66.00
5		145	71.00

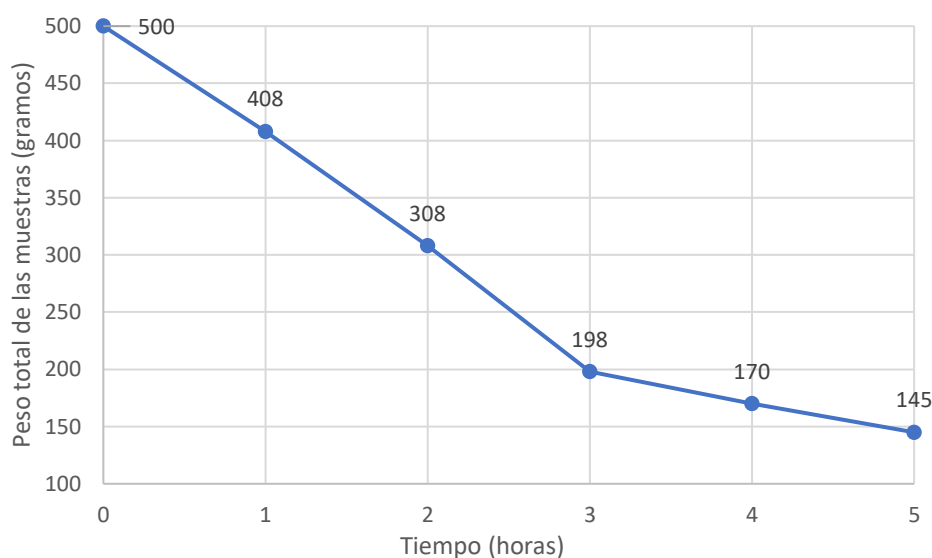


Figura 11. Pérdida de humedad por hora de las diez muestras de semillas de *Carica papaya*

Los datos de la **Tabla 11** y la **Figura 11** evidencian una cinética de secado típica, caracterizada por una eliminación rápida de humedad durante las tres primeras horas alcanzando pérdidas acumuladas del 18.40% a la primera hora, 38.40% a la segunda hora y 60.40% a la tercera hora. A partir de la cuarta hora, la pérdida de la humedad se desacelera, alcanzado un 66%, y posteriormente se estabiliza en 71% en la hora quinta, lo que sugiere que las semillas de *Carica papaya* habrían alcanzado el equilibrio higroscópico, estabilizando así su peso seco constante. Este comportamiento coincide con lo descrito por Alhanif et al. (2022), quienes evaluaron la cinética de secado de semillas de papaya bajo diferentes condiciones de temperatura y señalaron que el secado de las semillas siguió un comportamiento típico de “velocidad decreciente”, donde la eliminación de la humedad se vuelve progresivamente más lenta conforme disminuye el contenido de agua superficial y comienza a predominar la difusión interna.

Según Ghosh et al. (2011); señalan que, el proceso de secado de semillas con alto contenido de humedad inicial ocurre en tres etapas principales; una fase inicial donde se elimina el agua libre, localizada en la superficie y espacios intercelulares, con una tasa de evaporación rápida; una fase intermedia donde predomina el agua capilar, retenida en poros más pequeño, cuya eliminación requiere mayor tiempo y energía; y finalmente, una fase lenta asociada al agua remanente o ligada, fuertemente unida a la matriz celular por fuerzas de adsorción, lo que prolonga el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio higroscópico.

Asimismo, Bewley & Black (1994); señalan que, el equilibrio higroscópico (EMC) se alcanza cuando un material deja de ganar o perder humedad significativa bajo condiciones específicas de temperatura y humedad relativa. Sánchez (2018); señala que, el contenido de humedad en equilibrio (EMC) es un parámetro fundamental que debe determinarse durante el proceso de secado. En el caso de las semillas, Gebre et al. (2025); recomienda mantener un contenido de humedad en equilibrio higroscópico (EMC) de aproximadamente 5% al 7% en base húmeda, lo cual permite perseverar su viabilidad y funcionalidad. Por su parte Rosa et al (2021); menciona que, el equilibrio higroscópico (EMC) se alcanza cuando la variación de la pérdida de peso entre mediciones sucesivas es despreciable o nula. Bajo este criterio, en el proceso de secado de las semillas *Carica papaya*, se procedió a determinar el equilibrio higroscópico (EMC) utilizando los datos de los últimos intervalos del proceso, correspondientes a la cuarta y quinta hora, donde la pérdida de peso fue de apenas 5.00% del peso inicial, valor que se encuentra dentro del rango de EMC recomendado para este tipo de semillas

$$EMC(\%) = \frac{(P_t - P_{t+1})}{P_i} \times 100$$

$$EMC(\%) = \frac{(170 - 145)}{500} \times 100 = 5.00\%$$

Sains (2021), señala que, las semillas de *Carica papaya* presentan una carga catiónica superficial de aproximadamente +0.4meq/g y un contenido proteico (aminos) de 363mg/g, aunque representa un valor moderado, resulta suficiente para generar interacciones electrostáticas efectivas entre los biopolímeros y los coloides, promoviendo la formación de flóculos y la remoción de turbidez.

4.2. Dosis óptima de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal a escala laboratorio en condiciones meteorológicas con y sin precipitación

Para la determinación de la dosis óptima del coagulante natural propuesto se trabajó con diez muestras de agua superficial, recolectadas en dos condiciones meteorológicas: con y sin precipitación. Cada condición meteorológica contó con cinco muestras de agua independientes, obtenidas en diferentes días, con el objetivo de reflejar la variabilidad natural de las aguas superficiales.

Las diez unidades experimentales de la quebrada Naranjal fueron recolectadas en un periodo comprendido entre noviembre de 2024 y mayo de 2025. La distribución cronológica detallada de las fechas de muestreo para ambas condiciones meteorológicas se presenta en la **Tabla 12**

Tabla 12. Cronograma de recolección de muestras de agua superficial en la quebrada Naranjal

N° de muestra	Condición meteorológica	
	Sin precipitación	Con precipitación
1	25/11/2024	10/11/2024
2	11/02/2025	18/02/2025
3	24/03/2025	09/04/2025
4	31/03/2025	15/04/2025
5	21/04/2025	06/05/2025

4.2.1. Dosis óptima de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en condiciones meteorológicas sin precipitación

Tabla 13. Resultados del Test de jarras de la Muestra 1 sin precipitación

N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Ácido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		8.00	9.00		5.10	7.00		6.40	6.00
2	0.3	375		6.71	8.99		3.70	6.99		4.80	6.00
3	0.4	500	9.00	5.60	8.95	9.00	3.20	6.95	9.00	3.60	6.01
4	0.5	625		5.20	8.91		3.10	6.91		3.50	6.02
5	0.6	750		5.70	8.87		4.10	6.87		4.10	6.03
6	0.7	875		6.30	8.81		4.50	6.85		4.90	6.03

Ti: Turbidez inicial

Tf: Turbidez final

Conc: Concentración

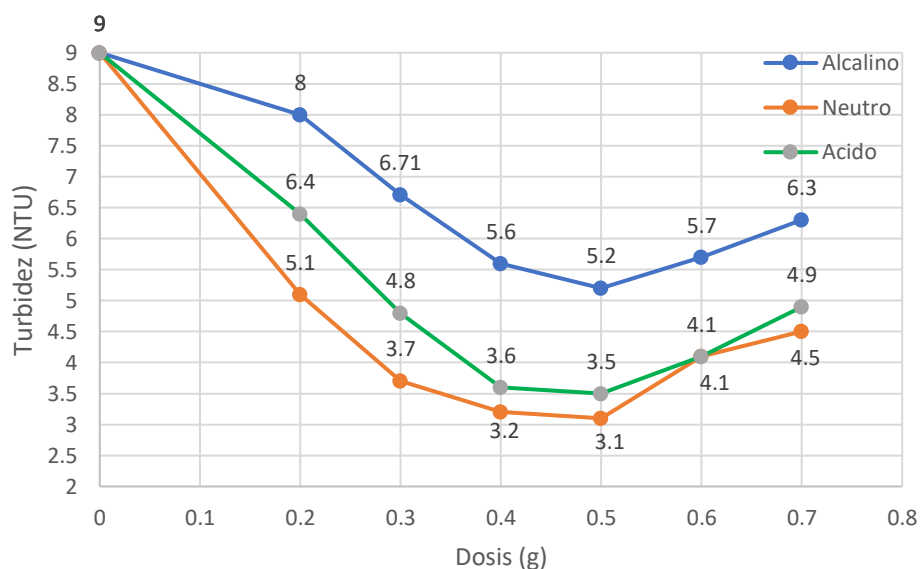


Figura 12. Remoción de la turbidez en la Muestra 1 sin precipitación a diferentes valores de pH

La **Tabla 13** y **Figura 12** ilustran el comportamiento de la Muestra 1 de aguas superficiales sin precipitación, tras la aplicación del coagulante de semillas de *Carica papaya* en dosis de 0.2g hasta 0.7g, equivalente a concentraciones de 250 mg/L a 875 mg/L. En los tres escenarios de pH evaluados (alcalino, neutro y ácido), se evidenció una relación inversa: conforme aumentó la dosis del coagulante, la turbidez inicial disminuyó progresivamente.

Respecto a la eficiencia, se determinó que la dosis de 0.5g (625 mg/L) representa el punto óptimo para los tres medios estudiados. Con esta dosificación, la turbidez inicial de 9.00 NTU se redujo a 5.20 NTU en el medio alcalino, a 3.10 NTU en el medio neutro y a 3.50 NTU en el medio ácido. Cabe señalar que, si bien esta dosis de 0.5g es óptima en las tres condiciones de pH evaluadas, su desempeño más destacado se registra en el medio neutro, donde se obtiene el menor valor de turbidez residual.

Tabla 14. Resultados del Test de jarras de la Muestra 2 sin precipitación

N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		9.80	8.98		6.40	7.00		7.80	6.00
2	0.3	375		8.30	8.95		4.40	6.90		5.80	6.00
3	0.4	500	11.00	7.00	8.90	11.00	4.30	6.85	11.00	4.40	6.01
4	0.5	625		6.60	8.85		4.28	6.81		4.30	6.02
5	0.6	750		7.10	8.80		4.90	6.78		4.90	6.03
6	0.7	875		7.80	8.75		5.80	6.75		5.80	6.05

Ti: Turbidez inicial

Tf: Turbidez final

Conc: concentración

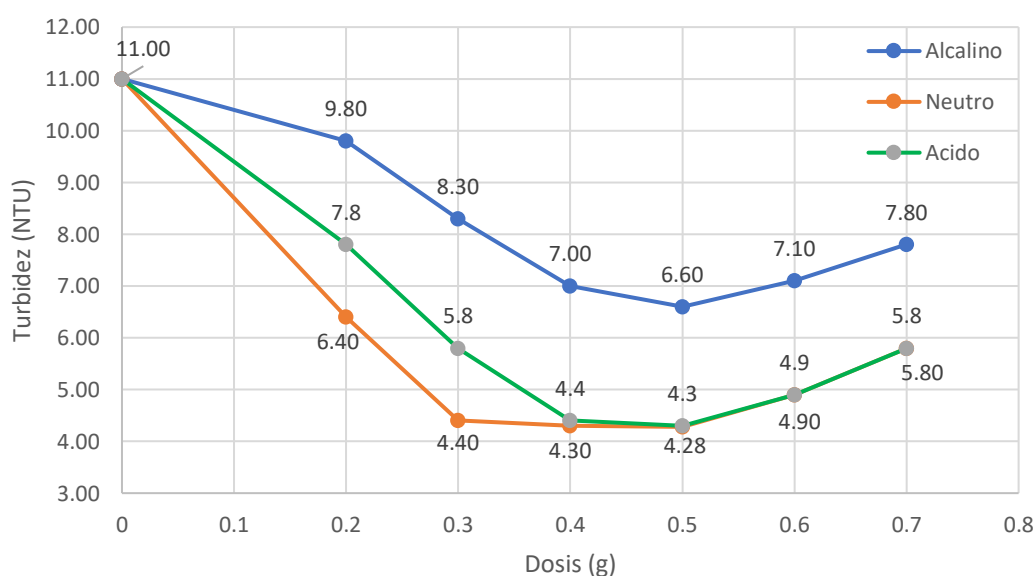


Figura 13. Remoción de la turbidez en la Muestra 2 sin precipitación a diferentes valores de pH

En la **Tabla 14** y **Figura 13** evidencian el comportamiento de la turbidez en la Muestra 2 de aguas superficiales sin precipitación tras la aplicación del coagulante de *Carica papaya* en medios alcalino, neutro y ácido. El análisis determina que la mayor eficiencia de remoción se alcanzó con una dosis de 0.5g (625 mg/L) en los tres escenarios evaluados. Con esta dosificación, la turbidez inicial de 11.00 NTU se redujo a 6.60 NTU en el medio alcalino, 4.28 NTU en el medio neutro y a 4.30 NTU en el medio ácido. Cabe señalar que, si bien esta dosis de 0.5g es óptima en las tres condiciones de pH evaluadas, su desempeño más destacado se registra en el medio neutro, donde se obtiene el menor valor de turbidez residual.

Tabla 15. Resultados del Test de jarras de la Muestra 3 sin precipitación

N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		11.70	8.98		7.50	7.00		7.60	6.00
2	0.3	375		10.00	8.90		5.20	6.96		5.35	6.01
3	0.4	500	13.00	8.60	8.86	13.00	5.10	6.94	13.00	5.10	6.02
4	0.5	625		8.10	8.80		5.07	6.92		5.09	6.03
5	0.6	750		8.80	8.75		5.80	6.89		5.80	6.04
6	0.7	875		9.60	8.70		6.70	6.85		6.70	6.05

Ti: Turbidez inicial

Tf: Turbidez final

Conc: concentración

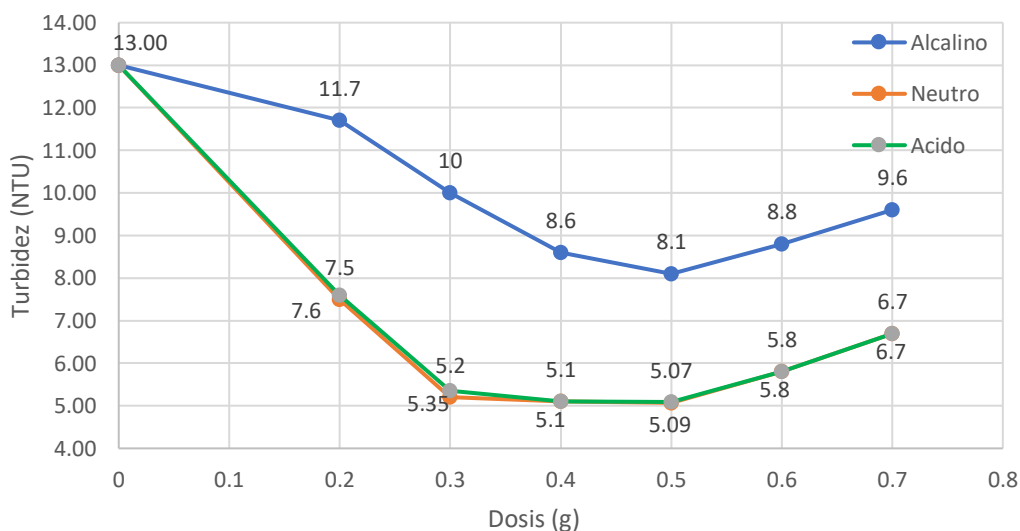


Figura 14. Remoción de la turbidez en la Muestra 3 sin precipitación a diferentes valores de pH

En la **Tabla 15** y **Figura 14** evidencian que, en los tres escenarios de pH (alcalino, neutro y ácido), a medida que se incrementan las dosis del coagulante natural, la turbidez disminuye progresivamente. En cuanto a las dosis óptimas en la Muestra 3, la mayor reducción de la turbidez en las tres condiciones de pH se alcanza con la dosis de 0.5g (625 mg/L), donde la turbidez inicial de 13 NTU disminuye a 8.10 NTU en el pH alcalino, a 5.07 NTU en el pH neutro y a 5.09 NTU en el pH ácido. Estos valores representan un equilibrio entre la reducción efectiva de la turbidez y el uso racional del coagulante, dejando a un lado la remoción marginal como la sobredosisificación. Es importante destacar que, al comparar las dosis óptimas en los tres escenarios de pH, la mayor remoción de turbidez se registró en el medio neutro, seguida por el medio ácido y finalmente el medio alcalino.

Tabla 16. Resultados del Test de jarras de la Muestra 4 sin precipitación

N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		12.60	8.98		8.35	7.00		8.50	6.00
2	0.3	375		10.80	8.94		5.80	6.98		7.50	6.01
3	0.4	500	14.00	9.30	8.91	14.00	5.50	6.88	14.00	5.90	6.02
4	0.5	625		8.70	8.87		5.45	6.86		5.60	6.03
5	0.6	750		9.50	8.84		6.50	6.75		6.40	6.04
6	0.7	875		10.50	8.81		7.20	6.71		7.40	6.05

Ti: Turbidez inicial

Tf: Turbidez final

Conc: Concentración

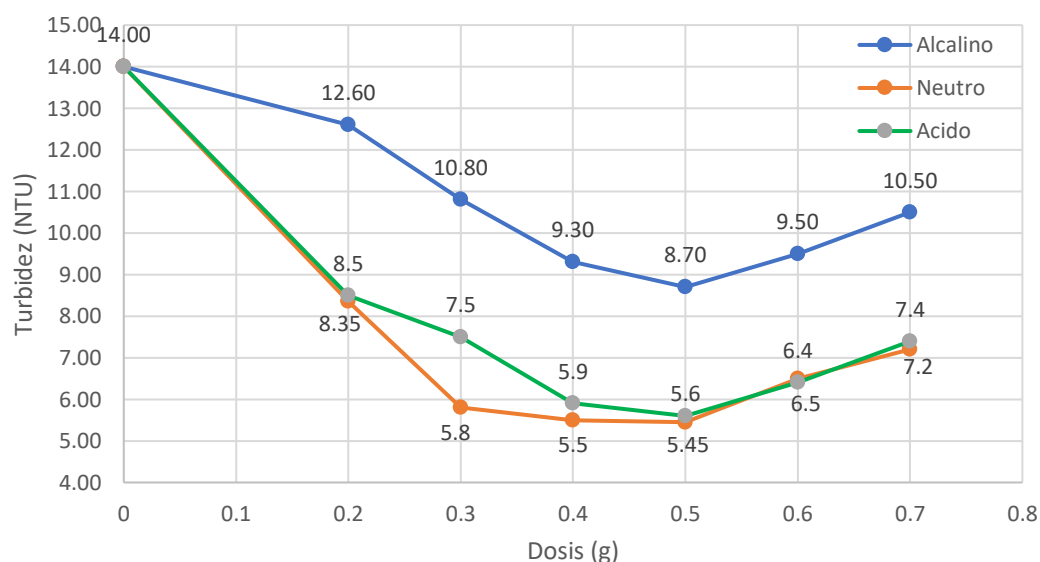


Figura 15. Remoción de la turbidez en la Muestra 4 sin precipitación a diferentes valores de pH

En la **Tabla 16** y **Figura 15** se observan los resultados del Test de jarras correspondientes a la Muestra 4 de aguas superficiales sin precipitación, evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido), tras la aplicación del coagulante natural obtenido a partir de las semillas de *Carica papaya*. En cuanto a las dosis óptimas en la Muestra 4 sin precipitación, los resultados muestran que en el medio alcalino y ácido la mayor reducción de la turbidez se alcanza con la dosis de 0.5g (625 mg/L), donde la turbidez inicial de 14.00 NTU disminuye a 8.70 NTU en el pH alcalino y a 5.60 NTU en el pH ácido. En cuanto al medio neutro, la dosis óptima fue de 0.4g, donde la turbidez inicial de 14.00 NTU disminuye a 5.50 NTU. Cabe señalar que, la dosis que demostró una mayor remoción de turbidez en las tres condiciones de pH evaluadas fue la de 0.4g en el medio neutro, seguido por el medio ácido.

Tabla 17. Resultados del Test de jarras de la Muestra 5 sin precipitación

N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		17.10	8.99		11.50	7.00		13.40	6.00
2	0.3	375		14.60	8.97		10.20	6.98		10.20	6.01
3	0.4	500	19.00	12.70	8.93	19.00	8.00	6.91	19.00	8.00	6.02
4	0.5	625		11.80	8.89		7.70	6.87		7.80	6.03
5	0.6	750		12.90	8.86		8.70	6.84		9.00	6.04
6	0.7	875		14.30	8.83		10.00	6.81		10.50	6.05

Ti: Turbidez inicial

Tf: Turbidez final

Conc: Concentración

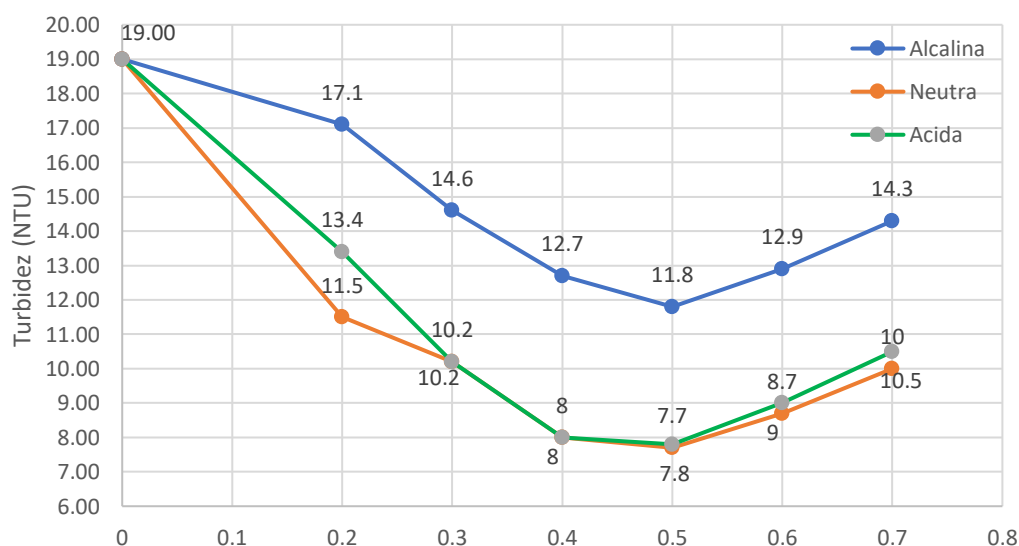


Figura 16. Remoción de la turbidez en la Muestra 5 sin precipitación a diferentes valores de pH

En la **Tabla 17** y **Figura 16** se observan los resultados obtenidos en el Test de jarras correspondiente a la Muestra 1 de aguas superficiales sin precipitación, evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido), tras la aplicación del coagulante de semillas de *Carica papaya* a diferentes dosis. En cuanto a la dosis óptima, los resultados muestran que la mayor reducción de la turbidez en las tres condiciones de pH se alcanza con la dosis de 0.5g (625 mg/L), donde la turbidez inicial de 19.00 NTU disminuye a 11.80 NTU en el pH alcalino, a 7.70 NTU en el pH neutro y a 7.80 NTU en el pH ácido. Cabe señalar que, si bien esta dosis de 0.5g es óptima en las tres condiciones de pH evaluadas, su desempeño más destacado se registra en el medio neutro, seguido por el medio ácido y el medio alcalino.

Tabla 18. Dosis óptima de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal en condiciones meteorológicas sin precipitación

Muestras de agua superficial sin precipitación	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Dosis óptima (g)	pH del medio
Muestra 1	9.00	3.10	0.50	Neutro
Muestra 2	11.00	4.28	0.50	Neutro
Muestra 3	13.00	5.07	0.50	Neutro
Muestra 4	14.00	5.50	0.40	Neutro
Muestra 5	19.00	7.70	0.50	Neutro

En la **Tabla 18** se presentan los resultados correspondientes a las dosis óptimas determinadas para las cinco muestras de agua superficial sin precipitación obtenidas tras la aplicación del coagulante propuesto y evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido). Los resultados evidencian que en las muestras con turbideces iniciales comprendidas entre 9.00 NTU a 19.00 NTU (valores característicos de cuerpos de agua superficiales sin precipitación), la aplicación de una dosis óptima de 0.5g del coagulante de semillas de *Carica papaya* permite reducir la turbidez a valores finales entre 3.10 NTU a 7.70 NTU. Asimismo, respecto al pH del medio, si bien el coagulante fue evaluado en diferentes condiciones, los resultados evidencian que el coagulante presenta un desempeño óptimo predominante en condiciones de pH neutro a ligeramente ácidos, mientras que su eficiencia disminuye en medios alcalinos.

Este comportamiento de la remoción de turbidez en función del pH coincide con estudios previos que señalan que los coagulantes de origen proteico presentan un rendimiento óptimo en rangos de pH neutro a ligeramente ácidos, debido a que, en estas condiciones, las proteínas presentes en el material coagulante tienden a encontrarse protonadas, incrementando la disponibilidad de grupos funcionales con carga positiva. Esta mayor densidad de carga positiva en el medio acuoso favorece la atracción electrostática y la neutralización de las partículas coloidales cargadas negativamente. (Díaz, Martínez et al., 2025; Yimer & Dame, 2021)

Springer (2018), evaluó la eficiencia del coagulante de semillas de *Carica papaya* bajo diferentes condiciones de pH y concluyó que la mayor eficiencia se alcanzó en condiciones ligeramente ácidas a neutras y afirmó que ello se debe a que en este rango de pH, las proteínas y compuestos bioactivos presentes en las semillas presentan una mayor estabilidad y solubilidad. Asimismo, investigaciones como las de Kurniawan et al. (2021) y Choy et al. (2014), evidenciaron que los coagulantes vegetales presentan un rendimiento significativamente superior en pH neutro debido a la mayor disponibilidad de cargas positivas en las proteínas. No obstante estudios como el de Okoro & Agbede (2019), evidencian que la eficiencia de los coagulantes proteicos disminuye notablemente en ambientes alcalinos por la pérdida de protonación

Asimismo, en los resultados del Test de jarras en las muestras de agua superficiales en las dos condiciones meteorológicas con y sin precipitación se evidencia un ligero aumento de la turbidez al aumentar la dosis óptima de 0.5g o 0.6g a una dosis superior de 0.7g, lo que indica el inicio de la sobredosificación, fenómeno en el que el exceso de coagulante genera una sobresaturación de cargas en el medio, provocando repulsión entre partículas y dificultando la formación – consolidación de los flóculos. Gómez & Medina (2021); mencionan que, una dosis excesiva de coagulante en un medio acuoso puede invertir la carga superficial de las partículas coloidales, el cual ocurre debido a que las partículas coloidales no solo quedan neutralizadas, sino que adquieren una carga neta del mismo signo que el coagulante. Esta inversión de carga genera nuevamente la repulsión entre ellas y la desestabilización de los flóculos formados, lo que reduce la eficiencia de remoción.

De manera similar, en el estudio de Vezar et al. (2024) se evidencio que, cuando la dosificación del coagulante de semillas de *Carica papaya* superaba el punto óptimo en muestras de aguas residuales de lavandería, la eficiencia en la remoción de turbidez no solo dejaba de incrementarse, sino que comenzaba a disminuir. Este comportamiento fue atribuido a la sobredosificación, donde el exceso de coagulante respecto a la dosis óptima genera efectos adversos, tales como la reestabilización de las partículas coloidales en el sistema, la formación de microflóculos y a la producción excesiva de lodos (Cadena Alava et al, 2024).

Sharma et al. (2006); señalan que, la sobredosificación de coagulante provoca la saturación de los sitios activos de las partículas coloidales, impidiendo así la formación de enlaces adicionales entre ellas y como consecuencia a la no formación de flóculos grandes y compactos; pero si a la formación de microflóculos inestables que sedimentan lentamente o incluso permanecen en suspensión, reduciendo la eficiencia del proceso de coagulación y aumentando la turbidez del agua tratada

No obstante, en los resultados de ciertas muestras de agua superficial, se observaron una tendencia distinta, al incrementar la dosis optima de 0.5g o 0.6g a dosis superiores, la reducción de la turbidez era mínima o marginal. Este comportamiento indica que el sistema había alcanzado una meseta de eficiencia, donde los incrementos adicionales en las dosis no generan mejoras significantes en el proceso de coagulación. Iber et al. (2023); señalan que, la adición excesiva de polímero catiónico mejora la cohesión de partículas solo hasta un punto determinado; por encima de este umbral, el sistema no presenta mejoras significativas en la remoción de la turbidez, manifestándose así una remoción marginal, lo que da lugar al fenómeno denominado meseta de eficiencia, en cual el aumento adicional de la dosis del coagulante no genera una mejora apreciable en el proceso de coagulación. De manera similar, Adelodun et al. (2023), señalan que, tras alcanzar la dosis óptima, el sistema entra en una fase de saturación en el proceso de coagulación – floculación, el cual se debe a que una vez neutralizadas y desestabilizadas la mayoría de las partículas coloidales presentes en la muestra, la adición de más coagulante no contribuye de forma significativa a la remoción y que incluso puede generar fenómenos de sobredosificación.

4.2.2. Dosis óptima de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en condiciones meteorológicas con precipitación

Tabla 19. Resultados del Test de jarras de la Muestra 1 con precipitación

N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		21.50	8.98		19.00	6.99		18.50	6.00
2	0.3	375		18.50	8.92		16.00	6.95		15.50	6.01
3	0.4	500	27.00	15.50	8.87	27.00	13.50	6.91	27.00	13.62	6.02
4	0.5	625		13.00	8.85		11.50	6.86		11.00	6.03
5	0.6	750		12.00	8.81		10.74	6.82		10.85	6.03
6	0.7	875		12.35	8.78		11.10	6.79		11.30	6.04

Ti: Turbidez inicial

Tf: Turbidez final

Conc: Concentración

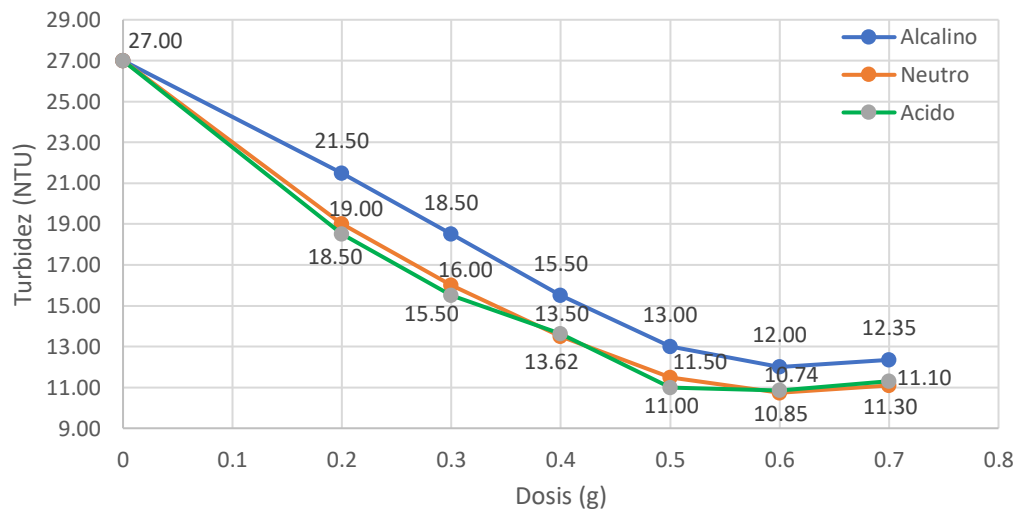
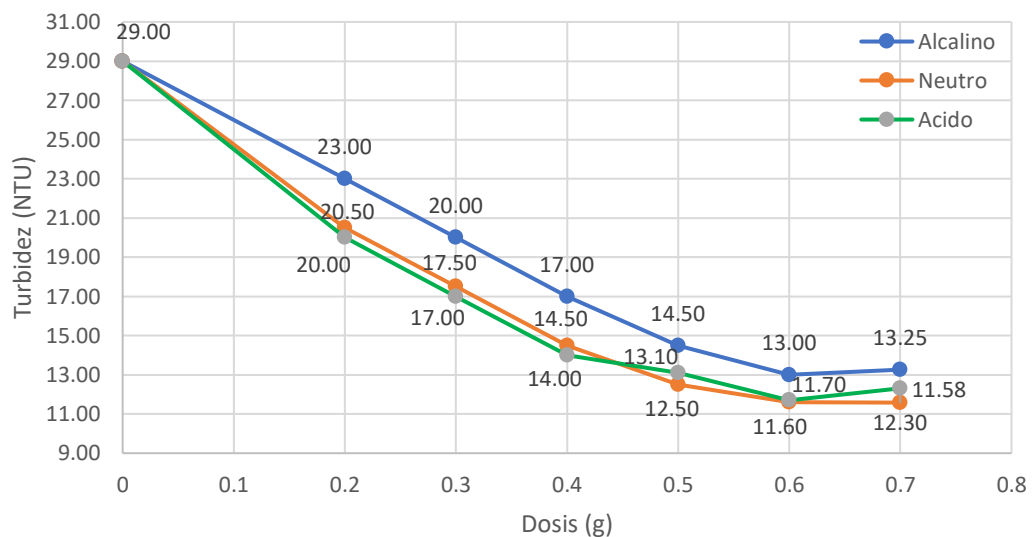


Figura 17. Remoción de la turbidez en la Muestra 1 con precipitación a diferentes valores de pH

La **Tabla 19** y **Figura 17** presentan los resultados del Test de jarras correspondientes de la Muestra 1 de aguas superficiales con precipitación, evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido). En cuanto a la dosis óptima, los resultados muestran que la mayor reducción de la turbidez en las tres condiciones de pH se alcanza con la dosis de 0.6g (750 mg/L), donde la turbidez inicial de 27.00 NTU disminuye a 12.00 NTU en el pH alcalino, a 10.74 NTU en el pH neutro y a 10.85 NTU en el pH ácido. Cabe señalar que, si bien la dosis de 0.6g es óptima en las tres condiciones de pH, su desempeño más destacado se registra en el medio neutro, seguido por el medio ácido y el medio alcalino.

Tabla 20. Resultados del Test de jarras de la Muestra 2 con precipitación

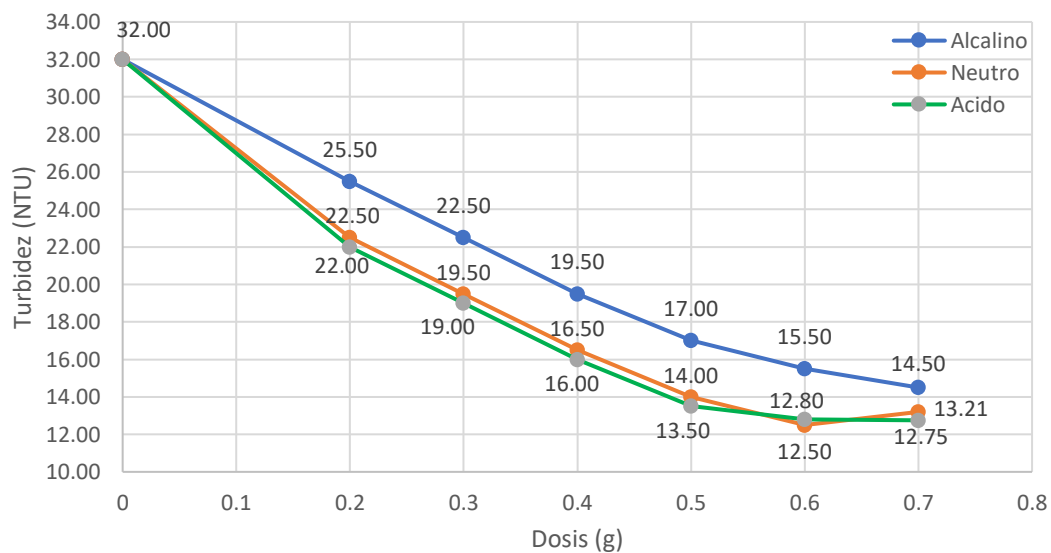
N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		23.00	8.98	20.50	6.99		20.00	6.00	
2	0.3	375		20.00	8.95	17.50	6.96		17.00	6.01	
3	0.4	500	29.00	17.00	8.93	29.00	14.50	6.91	29.00	14.00	6.02
4	0.5	625		14.50	8.87	12.50	6.87		13.10	6.03	
5	0.6	750		13.00	8.84	11.60	6.85		11.70	6.03	
6	0.7	875		13.25	8.79	11.58	6.81		12.30	6.04	

Ti: Turbidez inicial**Tf:** Turbidez final**Conc:** Concentración**Figura 18.** Remoción de la turbidez en la Muestra 2 con precipitación a diferentes valores de pH

La **Tabla 20** y **Figura 18** presentan los resultados obtenidos del Test de jarras de la Muestra 2 de aguas superficiales con precipitación en la remoción de la turbidez, evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y acido). En cuanto a la dosis óptima, los resultados muestran que la mayor reducción de la turbidez en las tres condiciones de pH se alcanza con la dosis de 0.6g (750 mg/L), donde la turbidez inicial de 29.00 NTU disminuye a 13.00 NTU en el pH alcalino, a 11.60 NTU en el pH neutro y a 11.70 NTU en el pH acido. Cabe señalar que, si bien esta dosis de 0.6g es óptima en las tres condiciones de pH evaluadas, su desempeño más destacado se registra en el medio neutro, donde se obtiene el menor valor de turbidez residual.

Tabla 21. Resultados del Test de jarras de la Muestra 3 con precipitación

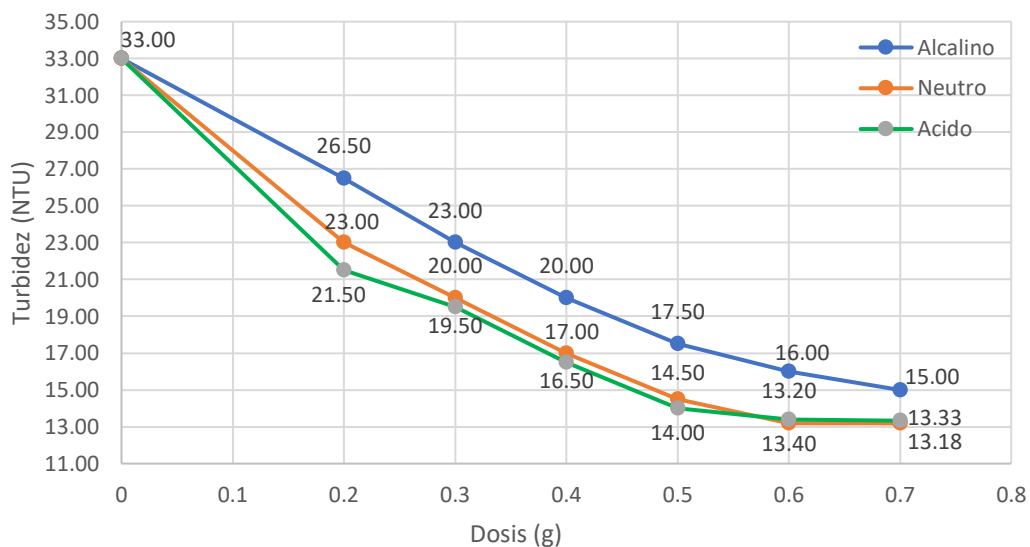
N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		25.50	8.98		22.50	6.99		22.00	6.00
2	0.3	375		22.50	8.95		19.50	6.96		19.00	6.01
3	0.4	500	32.00	19.50	8.91	32.00	16.50	6.91	32.00	16.00	6.02
4	0.5	625		17.00	8.87		14.00	6.87		13.50	6.03
5	0.6	750		15.50	8.82		12.50	6.84		12.80	6.03
6	0.7	875		14.50	8.77		13.21	6.79		12.75	6.04

Ti: Turbidez inicial**Tf:** Turbidez final**Conc:** Concentración**Figura 19.** Remoción de la turbidez en la Muestra 3 con precipitación a diferentes valores de pH

La **Tabla 21** y **Figura 19** presentan los resultados del Test de jarras correspondientes la Muestra 3 de aguas superficiales con precipitación en la remoción de la turbidez, evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido). En cuanto a la dosis óptima, los resultados muestran que en el medio alcalino la mayor reducción de la turbidez se logra con una dosis de 0.7g (875 mg/L), donde la turbidez inicial de 32.00 NTU disminuye a 14.50 NTU. En los medios neutro y ácido, la dosis óptima fue de 0.6g (750 mg/L), donde la turbidez inicial de 32.00 NTU disminuye a 12.50 NTU y a 12.80 NTU respectivamente. Cabe señalar que, la dosis óptima que mostró mayor remoción de turbidez en las tres condiciones de pH fue 0.6g en el medio neutro

Tabla 22. Resultados del Test de jarras de la Muestra 4 con precipitación

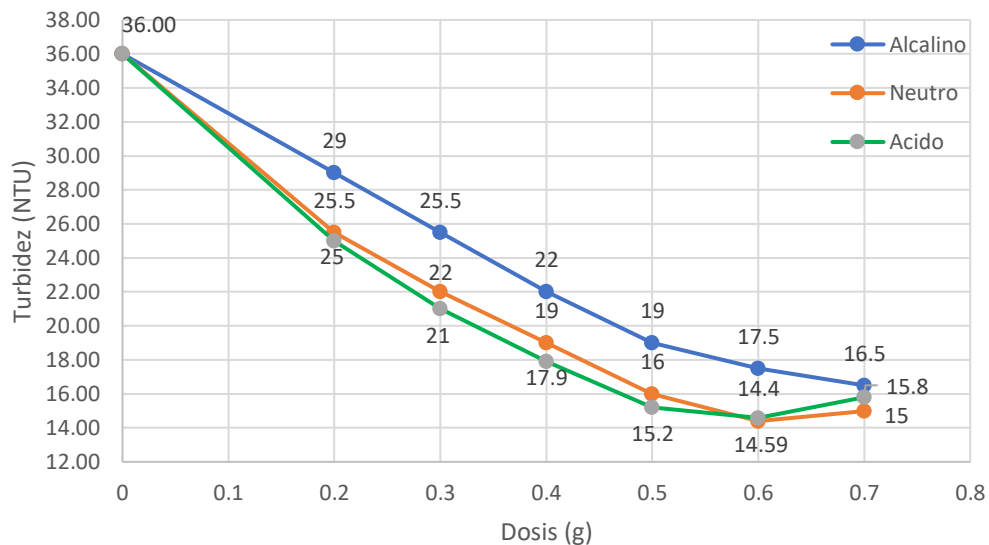
N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		26.50	8.98		23.00	6.99		21.50	6.00
2	0.3	375		23.00	8.96		20.00	6.96		19.50	6.01
3	0.4	500	33.00	20.00	8.91	33.00	17.00	6.94	33.00	16.50	6.02
4	0.5	625		17.50	8.87		14.50	6.89		14.00	6.03
5	0.6	750		16.00	8.85		13.20	6.87		13.40	6.03
6	0.7	875		15.00	8.81		13.18	6.81		13.33	6.04

Ti: Turbidez inicial**Tf:** Turbidez final**Conc:** Concentración**Figura 20.** Remoción de la turbidez en la Muestra 4 con precipitación a diferentes valores de pH

La **Tabla 22** y **Figura 20** representan los resultados del Test de jarras correspondiente a la Muestra 4 de aguas superficiales con precipitación en la remoción de la turbidez, evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido). En cuanto a la dosis óptima, los resultados muestran que en el medio alcalino la mayor reducción de la turbidez se logra con una dosis de 0.7g (875 mg/L), donde la turbidez inicial de 33.00 NTU disminuye a 15.00 NTU. En los medios neutro y ácido, la dosis óptima corresponde a 0.6g (750 mg/L), donde la turbidez inicial de 33.00 NTU disminuye a 13.20 NTU y 13.40 NTU respectivamente. Cabe señalar que, la dosis que demostró una mayor remoción de turbidez en las tres condiciones de pH evaluadas fue la de 0.6g en el medio neutro

Tabla 23. Resultados del Test de jarras de la Muestra 5 con precipitación

N°	Dosis (g)	Conc (mg/L)	Alcalino (pH=9)			Neutro (pH=7)			Acido (pH=6)		
			Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH	Ti	Tf	pH
1	0.2	250		29.00	8.98		25.50	7.00		25.00	6.00
2	0.3	375		25.5	8.95		22.00	6.99		21.00	6.01
3	0.4	500	36.00	22.00	8.91	36.00	19.00	6.95	36.00	17.90	6.02
4	0.5	625		19.00	8.88		16.00	6.91		15.20	6.03
5	0.6	750		17.50	8.86		14.40	6.87		14.59	6.03
6	0.7	875		16.50	8.81		14.38	6.84		15.8	6.04

Ti: Turbidez inicial**Tf:** Turbidez final**Conc:** Concentración**Figura 21.** Remoción de la turbidez en la Muestra 5 con precipitación a diferentes valores de pH

La **Tabla 23** y **Figura 21** presentan los resultados del Test de jarras correspondiente a la Muestra 5 de aguas superficiales con precipitación en la remoción de la turbidez, evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y acido). En cuanto a la dosis óptima, los resultados indican que en el medio alcalino la mayor reducción de la turbidez se logra con una dosis de 0.7g (875 mg/L), donde la turbidez inicial de 36.00 NTU disminuye a 16.50 NTU. En los medios neutro y acido, la dosis óptima corresponde a 0.6g (750 mg/L), donde la turbidez inicial de 36.00 NTU disminuye a 14.40 NTU y a 14.59 NTU respectivamente. Cabe señalar que, la dosis que demostró una mayor remoción de turbidez en las tres condiciones de pH evaluadas fue la de 0.6g en el medio neutro, seguido por el medio acido.

Asimismo, al analizar el comportamiento del pH inicial del medio en función a la dosificación del coagulante, se observó un grado de variación de ± 0.3 unidades conforme se aumentó la dosis del coagulante de 0.2g a 0.7g. Este comportamiento del coagulante en función al pH presenta una significancia despreciable o nula a comparación con los descensos drásticos del pH tras el uso de coagulantes sintéticos. Diversos autores han documentado que los coagulantes químicos o sintéticos, especialmente los basados en sales metálicas como el sulfato de aluminio y cloruro férrico, generan reducciones abruptas del pH debido a la hidrólisis ácida de sus cationes. Duan & Gregory (2023) demostraron que la aplicación sulfato de aluminio (coagulante sintético convencional) produce una disminución del pH entre 1.00 y 2.00 unidades, dependiendo de la dosis y la alcalinidad del agua, obligando a adicionar agentes alcalinizantes (cal o sosa) para restablecer el equilibrio químico del sistema.

Por su parte, Amran et al. (2021) señalaron que los coagulantes basados en semillas vegetales presentan una interacción más equilibrada con el pH del medio, dado que su mecanismo de coagulación se fundamenta principalmente en proteínas con carga positiva y grupos funcionales naturales, como aminas, hidroxilos y carbonilos presentes en las proteínas y metabolitos del material vegetal. Los cuales inducen a la desestabilización coloidal mediante la neutralización de cargas y el puenteo intermolecular, sin generar reacciones de hidrólisis ácida, lo cual elimina la necesidad de ajustar el pH final del agua mediante agentes alcalinizantes, simplificando la operación unitaria y reduciendo los costos operativos asociados a la corrección química

Tabla 24. Dosis óptima de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal en condiciones meteorológicas con precipitación

Muestras de agua superficial con precipitación	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Dosis óptima (g)	pH del medio
Muestra 1	27.00	10.74	0.60	Neutro
Muestra 2	29.00	11.60	0.60	Neutro
Muestra 3	32.00	12.90	0.60	Neutro
Muestra 4	33.00	13.35	0.60	Neutro
Muestra 5	36.00	14.40	0.60	Neutro

En la **Tabla 24** se presentan los resultados correspondientes a las dosis óptimas determinadas para las cinco muestras de agua superficial con precipitación obtenidas tras la aplicación del coagulante propuesto y evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido). Los resultados evidencian que en las muestras con turbideces iniciales comprendidas entre 27.00 NTU a 36.00 NTU (valores característicos de cuerpos de agua superficiales con precipitación), la aplicación de una dosis óptima de 0.6g del coagulante de semillas de *Carica papaya* permite reducir la turbidez a valores finales de 10.74 NTU a 14.40 NTU. Asimismo, los resultados corroboran que el coagulante natural propuesto exhibe un desempeño óptimo predominante en condiciones de pH neutros a ligeramente ácidos, mientras que su eficiencia disminuye en medios alcalinos. Este comportamiento coincide con el estudio realizado por Amran et al. (2021); quienes demostraron que, bajo condiciones de pH neutro a ligeramente ácido, el coagulante obtenido a partir de las semillas de *Carica papaya* alcanzó una alta eficiencia de remoción de la turbidez del 85%, valor similar del 88% obtenido por el coagulante sintético (sulfato de aluminio). Los autores atribuyeron esta eficiencia a la presencia de proteínas con carga positiva y grupos funcionales activos en las semillas, y destacaron las ventajas ambientales al ser uso de los coagulantes naturales, como la generación de lodos menos voluminosos - biodegradables y la ausencia de residuos tóxicos en el agua tratada.

Análogamente, Toni et al. (2025), señalan que, tanto los coagulantes naturales como los sintéticos se ven directamente influenciados por el valor del pH del medio acuoso, pudiendo este parámetro favorecer el proceso de coagulación – floculación o por el contrario, disminuyendo significativamente su eficiencia. Sugiharto (2025) y Marobhe & Sabai (2024), quienes señalan que, en medios con tendencias neutras a ácidas, los grupos aminos presentes en los coagulantes naturales de origen proteico se protonan y adquieren mayor carga positiva. lo que incrementa su capacidad para neutralizar la carga superficial negativa de las partículas coloidales, lo cual favorece la desestabilización electrostática y la posterior formación de flóculos mediante procesos de adsorción y puenteo intermolecular

En el estudio de Naceradska et al. (2019); se analizó de manera integral la influencia del pH sobre la coagulación, considerando dos aspectos fundamentales: la especiación química del coagulante natural y la dinámica de formación de formación de flóculos. Los autores concluyeron que, en un rango de pH cercano a la neutralidad, se favorece la formación de especies poliméricas más estables del coagulante, las cuales presentan una mayor capacidad para adsorberse sobre las partículas coloidales y promover su desestabilización. Así mismo, señalaron que, cerca del pH neutro, los flóculos crecen con mayor rapidez y alcanzan tamaños superiores en comparación con aquellos formados a valores de pH más bajos o altos

4.3. Determinación de la eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en aguas de la quebrada Naranjal en condiciones meteorológicas con y sin precipitación

4.3.1. Eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en condiciones meteorológicas sin precipitación

Tabla 25. Eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en condiciones meteorológicas sin precipitación

Dosis (g)	Eficiencia (%)					pH del medio
	Muestra 1 (9 NTU)	Muestra 2 (11 NTU)	Muestra 3 13 NTU	Muestra 4 14 NTU	Muestra 5 19 NTU	
0.2	43.33	41.82	42.31	40.36	39.47	Neutra
0.3	58.89	60.00	58.85	58.57	46.32	Neutra
0.4	64.44	60.91	60.77	60.71	57.89	Neutra
0.5	65.56	61.09	61.00	61.07	59.47	Neutra
0.6	54.44	55.45	55.38	53.57	54.21	Neutra
0.7	50.00	47.27	48.46	48.57	47.37	Neutra

La **Tabla 25** presenta las mayores eficiencias de remoción de turbidez tras la aplicación del coagulante de semillas de *Carica papaya* en las diferentes muestras de agua superficial sin precipitación evaluadas a diferentes condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido). En ella se determina que, el coagulante natural propuesto a una dosis óptima de 0.5g presenta una eficiencia de remoción del 59.47% al 65.56% en muestras de agua superficial sin precipitación con turbideces iniciales de 9.00 NTU al 19.00 NTU (valores característicos de cuerpos de agua superficiales sin precipitación).

Asimismo, se deduce que el coagulante de semillas de *Carica papaya* es más eficiente en condiciones neutras (pH=7), intermedia en condiciones ácida (pH=7) y menor eficiente en condiciones alcalinas (pH=9). Bratby, J. (2016), señala que, la remoción de la turbidez en el tratamiento de aguas se basa principalmente en los procesos de coagulación y floculación; donde el pH es un parámetro crítico que afecta la eficacia de estos procesos, ya que influye en la carga superficial de las partículas coloidales y la solubilidad tanto de los coagulantes como de las partículas en suspensión.

Si bien estas eficiencias del coagulante de semillas de *Carica papaya* pueden considerarse moderadas en comparación con los coagulantes sintéticos convencionales, su desempeño es técnicamente competitivo dado a que su aplicación presenta ventajas ambientales y operativas relevantes, ya que se trata de un insumo biodegradable, de bajo costo, no tóxico y capaz de generar lodos químicos considerablemente menores en volumen y carga residual, los cuales incluso podrían aprovecharse como compostaje. Lo que lo posiciona como una alternativa sostenible frente a los coagulantes inorgánicos tradicionales. (Kukic et al., 2020). Además, Yimer (2025); reporta que, el extracto de semillas de *Carica papaya* logró una remoción de coliformes totales del 96.32%, lo que evidencia no solo su capacidad para reducir la turbidez, sino también para la mejora de la calidad microbiológica del agua.

No obstante, es necesario mencionar que la *Carica papaya* es un fruto de alta disponibilidad en la zona de Tingo María y que, en la mayoría de los casos, sus semillas son considerados residuos agroindustriales que se desechan. Por tanto, su uso contribuye a generar un valor agregado dentro de la economía circular de nuestra región.

Por su parte diversos autores señalan que el uso de coagulantes inorgánicos genera impactos negativos tanto en la salud humana como en el ambiente. Cedenño & Sacoto (2019); señalan que, estos compuestos se caracterizan por llegar a ser nocivos para la salud humana y el ambiente, debido a la presencia de metales residuales tanto en los lodos generados como en el agua tratada, los cuales requieren un manejo especializado para evitar impactos ambientales negativos. De manera similar Krupinska et al. (2020) reportan que los coagulantes a base de aluminio pueden dejar concentraciones residuales de este metal en el agua tratada, lo que constituye un riesgo potencial para la salud, debido a su posible relación con el desarrollo de la enfermedad del Alzheimer. Asimismo, Ahma et al. (2019) señalan que, los coagulantes inorgánicos o polímeros sintéticos empleados en los procesos de coagulación y floculación generan cantidades significativas de lodos, los cuales se caracterizan por su alto potencial de residuo peligroso para los ecosistemas donde sean vertidos o depositados. Por lo que se aconseja que su disposición final se realice mediante métodos controlados para evitar impactos ambientales adversos. En este contexto, el uso de coagulantes orgánicos emerge como una posible herramienta para la remoción de turbidez en aguas superficiales.

4.3.2. Eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en condiciones meteorológicas con precipitación

Tabla 26. Eficiencia de las semillas de *Carica papaya* como coagulante en condiciones meteorológicas con precipitación

Dosis (g)	Eficiencia (%)					pH del medio
	Muestra 1 (27 NTU)	Muestra 2 (29 NTU)	Muestra 3 (32 NTU)	Muestra 4 (33 NTU)	Muestra 5 (36 NTU)	
0.2	29.63	29.31	31.25	30.30	29.17	Neutro
0.3	40.74	39.66	40.63	39.39	38.89	Neutro
0.4	50.74	50.34	50.00	48.48	47.22	Neutro
0.5	57.41	56.90	56.88	56.06	55.56	Neutro
0.6	60.22	60.00	59.69	59.55	60.00	Neutro
0.7	58.89	60.07	59.44	59.85	59.69	Neutro

La **Tabla 26** presenta las mayores eficiencias de remoción de turbidez tras la aplicación del coagulante de semillas de *Carica papaya* en las diferentes muestras de agua superficial con precipitación bajo la influencia de tres condiciones de pH (alcalino, neutro y ácido). En ella se determina que, el coagulante natural propuesto a una dosis óptima de 0.6g, presenta una eficiencia de remoción del 59.55% al 60.22% en muestras de agua superficial con precipitación a turbideces iniciales de 27.00 NTU al 36.00 NTU (valores característicos de cuerpos de agua superficiales con precipitación).

Asimismo, es necesario mencionar que, en muchos estudios donde se reportan mayores eficiencias de remoción de turbidez, se hace uso de una combinación de coagulante y floculante, lo que permite potenciar tanto la desestabilización de partículas como la formación de flóculos más compactos y sedimentables. Sin embargo, en el presente estudio, el coagulante natural propuesto actúa de manera dual, actuando simultáneamente como coagulante y floculante. Esta propiedad ha sido también señalada en otros biopolímeros proteicos y polisacáridos, como la *Moringa oleífera* y la quitosana, los cuales muestran capacidad de neutralización de carga y a la vez de puenteo entre partículas (Renault et al., 2009). Diversos estudios científicos han confirmado que el coagulante obtenido a partir de las semillas de *Carica papaya* presenta una acción dual ya que no solo reduce la carga superficial coloidal del agua, propia de la coagulación, sino que también favorece la aglomeración y compactación

de las partículas desestabilizadas. Uninsa et al (2018), atribuye el comportamiento dual a la presencia simultánea de proteínas catiónicas y polisacáridos presentes en las semillas, los cuales permiten la neutralización de cargas (mecanismo coagulante clásico) y el puenteo de partículas (mecanismo típico de los floculantes) en un solo paso del tratamiento.

Esta doble acción otorga un valor adicional a los resultados obtenidos, ya que permite alcanzar eficiencia de remoción sin necesidad de incorporar floculantes externos. Lo cual no solo reduce costos y simplifica el proceso operativo, sino que también promueve un enfoque más sostenible frente a los sistemas de tratamientos que requieren múltiples insumos químicos. Al utilizar las semillas de *Carica papaya* como agente único, se simplifica la cadena de tratamiento, reduciendo la alteración del pH del agua tratada y minimizando el volumen de lodos químicos residuales.

Si bien la eficiencia obtenida responde a que el coagulante fue evaluado bajo un mecanismo de acción dual, ejerciendo funciones de coagulación y floculación de manera simultánea sin la adición de polímeros sintéticos que potencian la densificación de los flóculos. Asimismo, estos resultados también lo atribuimos a la influencia de las propiedades intrínsecas de la materia prima, específicamente su alto contenido lipídico (aprox. 30%), los cuales al estar presentes en matriz del polvo crudo interfieren con los mecanismos de neutralización de carga y con el puenteo intermolecular. Si bien la literatura sugiere la implementación de un previo proceso de desengrasado, técnica consistente en la remoción de la fracción grasa mediante el uso de solventes orgánicos apolares como el hexano o etanol (Sains, 2021; Gómez & Medina, 2021). La presente investigación priorizó la evaluación de la matriz integral de la semilla. No obstante, lejos de ser una limitante, estos resultados permitieron establecer una línea base técnica para el uso de las semillas de *Carica papaya* en su estado más natural y accesible. Al determinar la eficiencia basal del polvo crudo sin modificaciones químicas, se proporciona un punto de referencia necesario para que futuras investigaciones cuantifiquen con precisión el incremento de rendimiento atribuible exclusivamente a las etapas de purificación química.

Tabla 27. Análisis de varianza (ANOVA) Trifactorial: dosis, pH y lluvia

Pruebas de efectos inter – sujetos					
Variable dependiente: Eficiencia					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	86382,996	41	2106,902	116,983	,000
Intersección	310592,061	1	310592,061	17245,197	,000
Concentración	65377,012	6	10896,169	604,995	,000
pH_Inicial	11142,057	2	5571,028	309,324	,000
Lluvia	506,361	1	506,361	28,115	,000
Concentración * pH_Inicial	2109,940	12	175,828	9,763	,000
Concentración * Lluvia	3235,719	6	539,287	29,943	,000
pH_Inicial * Lluvia	3304,886	2	1652,443	91,750	,000
Concentración * pH_Inicial * Lluvia	707,022	12	58,918	3,271	,000
Error	3025,739	168	18,010		
Total	400000,796	210			
Total corregido	89408,735	209			

La **Tablas 27** muestra los resultados obtenidos en el análisis de varianza (ANOVA) trifactorial, el cual evidencia que las tres variables independientes evaluadas ejercen un efecto estadísticamente significativo sobre la eficiencia del tratamiento ($p < 0.05$). La magnitud de los valores F calculados permitió establecer una jerarquía clara en el nivel de influencia de cada factor. La concentración del coagulante se identificó como el factor de mayor incidencia, registrando el valor de F más elevado ($F=604.995$), lo que confirma que las variaciones en la dosificación son las que generan los cambios más pronunciados en la eficiencia de remoción. La segunda variable con moderada incidencia es el pH inicial del medio ($F=309.324$), lo que confirma su rol determinante en los mecanismos fisicoquímicos asociados al proceso de coagulación – floculación. Finalmente, la condición meteorológica mostró una influencia comparativamente menor ($F=28.115$); sin embargo, su efecto sigue siendo significativo dentro del modelo, evidenciado que las condiciones ambientales previas a la toma de muestras (con o sin precipitación) contribuyen, aunque en menor magnitud, a la variabilidad de la eficiencia obtenida.

Tabla 28. Prueba T – Student respecto a la hipótesis del 90% de eficiencia

Condición meteorológica	Tratamiento óptimo identificado	Diferencia de medias respecto al 90%	Eficiencia media real	Sig. (p)
Sin precipitación	pH 7 Dosis 0.5g	-28,36	61.64%	.000
Con precipitación	pH 7 Dosis 0.6g	-29.768	60.23%	.000

El resumen estadístico de la prueba T – Student revela que, para ambas condiciones meteorológicas el valor de significancia (Sig.) de 0.000 ($p < 0.05$), lo que determina estadísticamente que existe una diferencia significativa entre la eficiencia obtenida y el valor teórico esperado. Al analizar la diferencia de medias, se observa valores negativos en ambos casos (-28.36 y -29.768), lo que deduce el rechazo de la hipótesis de investigación, confirmando que el coagulante en su presentación de polvo integral, no supera el umbral del 90% de eficiencia.

No obstante, los resultados permiten establecer el rendimiento real del tratamiento. En la condición meteorológica sin precipitación, la eficiencia media real se situó en 61.64% operando a una dosis de 0.5g; mientras que en la condición meteorológica con precipitación el rendimiento fue de 60.23% operando a una dosis de 0.6g

V. CONCLUSIONES

Se obtuvo un coagulante a partir de las semillas de *Carica papaya*, el cual presenta características fisicoquímicas compatibles con coagulantes de origen proteico.

Se determinó como dosis optima 0.5g (625 mg/L) para la condición meteorológica sin precipitación y 0.6g (750 mg/L) para la condición con precipitación. En ambos escenarios, el coagulante alcanzo su máximo desempeño operativo en un medio de pH neutro

Se determinó una eficiencia media de remoción de turbidez del 61.64% en muestras sin precipitación y 60.23% en muestras con precipitación. Estos resultados demuestran la capacidad clarificadora de coagulante, aunque estadísticamente no superan el umbral del 90% planteado en la hipótesis

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Realizar una caracterización química detallada de las semillas de *Carica papaya*, incluyendo análisis proteico, identificación de grupos funcionales, determinación de los compuestos activos y pruebas toxicológicas

Determinar si la eliminación de las grasas de las semillas de *Carica papaya* potencia la capacidad de los agentes activos proteicos en su eficiencia como coagulante

Evaluar la influencia del coagulante natural propuesto sobre otros parámetros de potabilización, tales como el color, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), conductividad eléctrica y coliformes totales

Evaluar el desempeño del coagulante natural en sistemas de tratamientos combinados, haciendo uso de floculantes como coadyuvantes, con el objetivo de densificar los flóculos formados

Analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos sedimentados para validar su potencial uso como compostaje o abono agrícola,

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adelodun, B., Ajibade, F. O., Ogunshina, M. S., Ajibade, T. F., & Khosravi, F. (2023). Impact of *Moringa oleifera* seed-derived coagulants processing on coagulation-flocculation efficiency and water quality. *Scientific Reports*, 13(1), 8576.
- Ahma, A., Risso, M., & Silva, L. (2019). Environmental impacts of chemical coagulants in wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 245, 10-18.
- Alhanif, M., Kumoro, A. C., & Wardhani, D. H. (2022). Thin-layer drying of papaya (*Carica papaya*) seeds: Drying kinetics, mathematical modeling and effective moisture diffusivity. *AIP Conference Proceedings*, 2610
- 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), 5715
- Annegowda, H. V., Bhat, R., Min-Tze, L., Karim, A. A., & Mansor, S. M. (2014). Influence of processing on the content of polyphenols and antioxidant properties of tropical fruits. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3627–3639.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua Coagulación y Floculación. SEDAPAL, Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico., 44.
- Arenas Pacheco, K. D. R., & Mamani Carrillo, G. D. L. A. (2023). Evaluación de la eficiencia de biofloculantes obtenidos a partir de Opuntia Ficus Indica, *Hylocereus Undatus*, *Solanum Tuberosum* y mezcla de ellos en la mejora de la calidad de aguas destinadas para consumo humano en el distrito de Samegua-Moquegua.
- Barrenechea, A. (2004). Teoría y práctica de la purificación del agua (3.^a ed.). CEPIS/OPS.
- Bewley, JD, y Black, M. (1994). Semillas: Fisiología del desarrollo y la germinación (2.^a ed.). Plenum Press.
- Bratby, J. (2016). Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment (3.^a ed.). IWA Publishing.

- Cadena-Álava, A. D., Cevallos-Cedeño, P. M., & García-Muentes, S. P. (2024). Evaluation of the coagulant property of *Carica papaya* seeds in surface water treatment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 23(3), 1143-1155.
- Carrasco Díaz, S. (2005). *Metodología de la investigación científica: Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación*. Editorial San Marcos.
- Carpio Hernández, B. M. (2019). Evaluación del Uso de Semillas de *Mangifera Indica* L (Mango) Como Coagulante Natural Para El Tratamiento de Aguas Residuales de La Ptar Munives de VES-Lima.
- Cedeño, Y., & Sacoto, A. (2019). Tratamiento de agua residual procedente de industria cafetera por accion de compuestos organicos de cascaras: *Musa Paradisiaca* y *Manhot Esculenta*.
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., & Ramanan, R. N. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4174-4189.
- Córdova, E. A. (2010). *Guía técnica del cultivo de la papaya*.
- Da Silva, T. L., & Santos, R. (2025). Drying kinetics and moisture content analysis of *Carica papaya* seeds for industrial applications. *Industrial Crops and Products*, 180, 114-122.
- Degrémont. *Water Treatment Handbook*. 1991. 6.^a edición, vol.1, Francia.
- Diaz Aliaga, J. K. (2019). Aplicación de la Enzima Papaina Obtenida a Partir de las Semillas CARICA Papaya como Coagulante Natural para la Remocion de Turbidez en la PTAR-VES.
- Díaz, L., Martínez, R., et al. (2025). Eficiencia de coagulantes naturales proteicos bajo diferentes condiciones de pH en el tratamiento de agua. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 21(3), 115–129.
- Elgadir, M. A., Salama, M., & Adam, A. (2014). *Carica papaya* as a medicinal plant. *Current Research Journal of Biological Sciences*, 6(5), 198-202.
- Espíritu-León, F. J. (2023). Eficacia del mucílago de la planta *Triumfetta rhomboidea* Jacq. como floculante natural en la remoción de turbiedad del agua de consumo. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS.

- Franco, A. (2015). Prácticas de precosecha y cosecha que influyen en la poscosecha. Bogotá, 3-19.
- García F., B. (2007). Metodología de extracción in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo.
- García, I. M. (2019). Evaluación de la actividad coagulante de la semilla de Papaya (*Carica papaya*) en muestras de agua recolectadas en la cuenca alta del Río Bogotá.
- Gebre, S. H., & Tadesse, M. (2025). Hygroscopic equilibrium and viability of papaya seeds during storage. *Journal of Stored Products Research*, 101, 102-110.
- Gil, A. I., & Miranda, D. (2005). Morfología de la flor y de la semilla de papaya (*Carica papaya* L.): variedad Maradol e híbrido Tainung-1. *Agronomía Colombiana*, 23(2), 217-222.
- Ghosh, S. (2011). A systematic examination of the dynamics of water–cellulose interactions during drying. *Drying Technology*, 29(1), 1–11.
- Gómez Vaca, J. A., & Medina Tomalá, B. M. (2021). Determinación de la capacidad coagulante de las semillas de papaya (*Carica papaya*) para la remoción de turbidez en el tratamiento de aguas superficiales (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química).
- González, P. (2018). Características botánicas y morfológicas de la papaya (*Carica papaya*). *Fruticultura Tropical*.
- Huaman Huisa, C. A., & Sosa Quispe, L. N. (2025). Uso de coagulantes químicos (sulfato férrico, cloruro férrico y policloruro de aluminio) en el tratamiento de efluentes de camal en el altiplano peruano. Universidad Peruana Unión.
- Hernández, G. (2015). Análisis bibliográfico de riesgo de plagas para la importación de semillas de papaya (*Carica papaya* L.) Proveniente de Estados Unidos (Doctoral dissertation, Tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador).
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Education.

- Iber, B. T., Ubaidillah, N. H., Man, H. C., & Isa, M. H. (2023). Optimising coagulation/flocculation using response surface methodology and application of floc in biofertilisation. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 104052.
- Krupinska, I. (2020). Aluminium drinking water treatment residuals and their toxic potential. *Water Research*, 172, 115510.
- Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Said, N. S. M., & Ismail, N. (2020). Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9312.
- Kusniawati, D., Nuryanti, S., & Walici, E. (2023). Utilization of Carica papaya seeds as natural coagulant in groundwater treatment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1265(1)
- Kukić, D., Prodanović, J., Šolević Knudsen, T., & Kukić, M. (2020). Application of natural coagulants for water and wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 260, 110–129.
- Li, X., Zhang, T., Chen, Y., & Wang, J. (2021). Optimization of natural coagulant dosing in water treatment: Mechanism and performance analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6)-106743.
- Limongi, J. M., & Mendoza, C. M. (2022). Aplicación de coagulantes naturales obtenidos de las semillas de habas (*Vicia faba*) y durazno (*Prunus persica*) en la potabilización del agua. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 9(1), 54-67.
- Lopez C. & Bejar P. (2024). Remoción de turbidez mediante aplicación de coagulantes naturales de papaya y pitahaya en aguas residuales. *Revista Sciencevolution*, 4 (12), 133-142
- López, J. (2018). Tratamiento de aguas: Coagulación y floculación. Ediciones Técnicas.
- Marobhe, I. S., & Sabai, C. M. (2024). Natural coagulants and their efficiency under variable pH conditions in drinking water purification. *African Journal of Water Science and Technology*, 12(1), 22–34.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2023). Línea de base de la diversidad de la papaya peruana con fines de bioseguridad. Dirección General de Diversidad Biológica

- Moran A. & Baca E. (2018). Proceso de secado de semilla de papaya (Carica Papaya) para la obtención de aceite. Tesis de grado. Universidad nacional del Callao
- Muhammad, N. H. N., Abdullah, A. R., & Isa, N. (2020). The effect of pH and dosage coagulants to optimise performance of selected natural and chemical coagulants in wastewater: A comparative study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 616(1)
- Mrad Gacía, I. (2021). Evaluación de la actividad coagulante de la semilla Carica papaya en muestras de agua colectadas en la cuenca alta del río Bogotá.
- Navarro C., A., Rojas Z., E., Lazcano H., M., & Vera L., O. (2016). Propiedades funcionales de semillas de papaya (Carica papaya L.).
- Načeradská, M., Pivokonská, L., & Pivokonský, M. (2019). On the importance of pH value in coagulation. *AQUA – Water Journal of the International Water Association*, 68(3), 222–234
- Okoro, B. C., & Agbede, A. M. (2019). Effect of pH on the efficiency of protein-based coagulants in water treatment. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(2), 560-569.
- Ojeda, E. (2012). Operaciones unitarias en ingeniería sanitaria: Coagulación. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Parni, B., & Verma, Y. (2014). Biochemical properties in peel , pulp and seeds of carica papaya. *Plant Archives*, 14(1), 565–568.
- Pérez, J., Cánepa de vargas , L., & Richter, C. (1977). Coagulación. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). PE., 78.
- Propaya (2011). Estudio de oportunidades de mercado e inteligencia comercial internacional de la papaya mexicana e identificación de necesidades de infraestructura logística. (En línea). México.
- Renault, F., Sancey, B., Badot, P. M., & Crini, G. (2009). Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. *European Polymer Journal*, 45(5), 1337-1348.

- Ruiz-Ortega, A. (2022). Optimización de la remoción de turbidez en agua utilizando Aloe vera (L.) mediante superficie de respuesta. [Tesis de titulación, Universidad Nacional de Trujillo o similar en región norte].
- Sains M. (2021). Semillas descascaradas de carica papaya como coagulante natural para mejorar la calidad de agua del río. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 23(3):1-10
- Sánchez N. (2018). Optimización de la cinética de secado en semillas de papaya. Tesis de grado. Universidad de Costa Rica.
- Sanchez C. (2024). Determinación de contenido de humedad de equilibrio para algunos de los más importantes granos
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (2018). Datos hidrometeorológicos de la estación Tingo María. Gobierno del Perú.
- Sharma, S., et al. (2006). Flocculants—An ecofriendly approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 1–10.
- Tonial, Boaventura & Botelho (2025). Estudio comparativo de coagulantes naturales y químicos para el tratamiento en flujo continuo de aguas residuales textiles. *Ciencia de la ingeniería química*, volumen 320(B)
- Unnisa, S. A., & Bi, S. (2018). Dual action of natural coagulants: Coagulation and flocculation using *Moringa oleifera* and *Carica papaya*. *Applied Water Science*, 8, 120.
- Yimer, F., & Dame, B. (2021). Evaluation of protein-based natural coagulants for turbidity removal in drinking water treatment. *Journal of Water Purification and Sustainability*, 9(4), 201–214.
- Veazar, S. A. N., et al. (2024). The use of *Carica papaya* seeds as bio-coagulant for laundry wastewater treatment. *Journal of Engineering and Applied Sciences*.

VIII. ANEXOS

Anexo A. Proceso de secado de las semillas de *Carica papaya* en estufa

Tabla 29. Pérdida de peso por hora de las muestras de semillas de *Carica papaya* en estufa

N° de mues tras	TEMPERATURA 50°C					
	Peso inicial (g)	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)	Peso 4 (g)	Peso 5 (g)
	Tiempo: Inicio	Tiempo: 1h	Tiempo: 2h	Tiempo: 3h	Tiempo: 4h	Tiempo: 5h
1	50	40	31	20	15	15
2	50	41	32	21	14	14
3	50	40	30	20	15	15
4	50	41	31	19	15	15
5	50	41	31	18	15	15
6	50	42	30	18	15	14
7	50	40	32	19	15	14
8	50	41	30	20	17	14
9	50	42	30	20	15	15
10	50	40	31	19	14	14
Peso	500	408	308	194	150	145
Total						

Anexo B. Análisis estadístico

Tabla 30. Prueba T - Student: comparación de la eficiencia del coagulante respecto al 90% para las muestras de aguas superficiales sin precipitación

Prueba para una muestra							
Valor de prueba = 90							
Lluvia pH_Inicial Concentración	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia		
					Inferior	Superior	
6	250 Eficiencia	-20,247	4	,000	-56,34447	-64,0709	-48,6181
	375 Eficiencia	-16,755	4	,000	-40,89402	-47,6704	-34,1177
	500 Eficiencia	-51,177	4	,000	-30,69578	-32,3611	-29,0305
	625 Eficiencia	-73,781	4	,000	-29,63726	-30,7525	-28,5220
	750 Eficiencia	-69,633	4	,000	-35,55982	-36,9777	-34,1420
	875 Eficiencia	-65,492	4	,000	-43,36610	-45,2045	-41,5277
	NO 7	250 Eficiencia	-70,366	4	,000	-48,54199	-50,4573
375 Eficiencia		-12,661	4	,000	-33,24478	-40,5350	-25,9546
500 Eficiencia		-27,934	4	,000	-29,05364	-31,9414	-26,1659
625 Eficiencia		-27,639	4	,000	-28,36168	-31,2107	-25,5127
750 Eficiencia		-98,547	4	,000	-35,38689	-36,3839	-34,3899
875 Eficiencia		-84,118	4	,000	-41,66518	-43,0404	-40,2899
9		250 Eficiencia	-319,288	4	,000	-79,39596	-80,0864
	375 Eficiencia	-24,423	4	,000	-68,79521	-76,6159	-60,9745
	500 Eficiencia	-10,788	4	,000	-60,12820	-75,6029	-44,6535
	625 Eficiencia	-8,840	4	,001	-56,94567	-74,8305	-39,0608
	750 Eficiencia	-11,720	4	,000	-60,98565	-75,4326	-46,5387
	875 Eficiencia	-17,987	4	,000	-65,99105	-76,1772	-55,8049

Tabla 31. Prueba T - Student: comparación de la eficiencia del coagulante respecto al 90% para las muestras de aguas superficiales con precipitación

Prueba para una muestra							
Valor de prueba = 90							
Lluvia pH_ Inicial Concentración	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia		
					Inferior	Superior	
6	250 Eficiencia	-75,642	4	,000	-58,16600	-60,3010	-56,0310
	375 Eficiencia	-142,303	4	,000	-48,56547	-49,5130	-47,6179
	500 Eficiencia	-106,795	4	,000	-39,68851	-40,7203	-38,6567
	625 Eficiencia	-45,127	4	,000	-32,54942	-34,5520	-30,5468
	750 Eficiencia	-304,450	4	,000	-30,28277	-30,5589	-30,0066
	875 Eficiencia	-43,777	4	,000	-31,67844	-33,6876	-29,6693
7	250 Eficiencia	-307,215	4	,000	-60,38057	-60,9263	-59,8349
	375 Eficiencia	-154,670	4	,000	-50,45175	-51,3574	-49,5461
	500 Eficiencia	-62,562	4	,000	-40,95397	-42,7715	-39,1365
	625 Eficiencia	-103,429	4	,000	-33,56598	-34,4670	-32,6649
	750 Eficiencia	-163,955	4	,000	-29,76806	-30,2722	-29,2640
	875 Eficiencia	-98,421	4	,000	-30,44145	-31,3002	-29,5827
9	250 Eficiencia	-303,887	4	,000	-69,89721	-70,5358	-69,2586
	375 Eficiencia	-140,848	4	,000	-59,66537	-60,8415	-58,4892
	500 Eficiencia	-67,816	4	,000	-49,73655	-51,7728	-47,7003
	625 Eficiencia	-41,349	4	,000	-41,41625	-44,1972	-38,6353
	750 Eficiencia	-38,842	4	,000	-36,96110	-39,6031	-34,3191
	875 Eficiencia	-369,304	4	,000	-35,60615	-35,8738	-35,3385

Anexo C. Panel fotográfico**Figura 22.** Recolección de la muestra de agua sin lluvia**Figura 23.** Fruta de *Carica papaya*



Figura 24. Extracción y selección de las semillas



Figura 25. Acondicionamiento de las semillas



Figura 26. Pesado de las semillas de *Carica papaya* antes de ir a estufa



Figura 27. Secado en estufa de las semillas de *Carica papaya*



Figura 28. Trituración manual de las semillas secas de *Carica papaya*

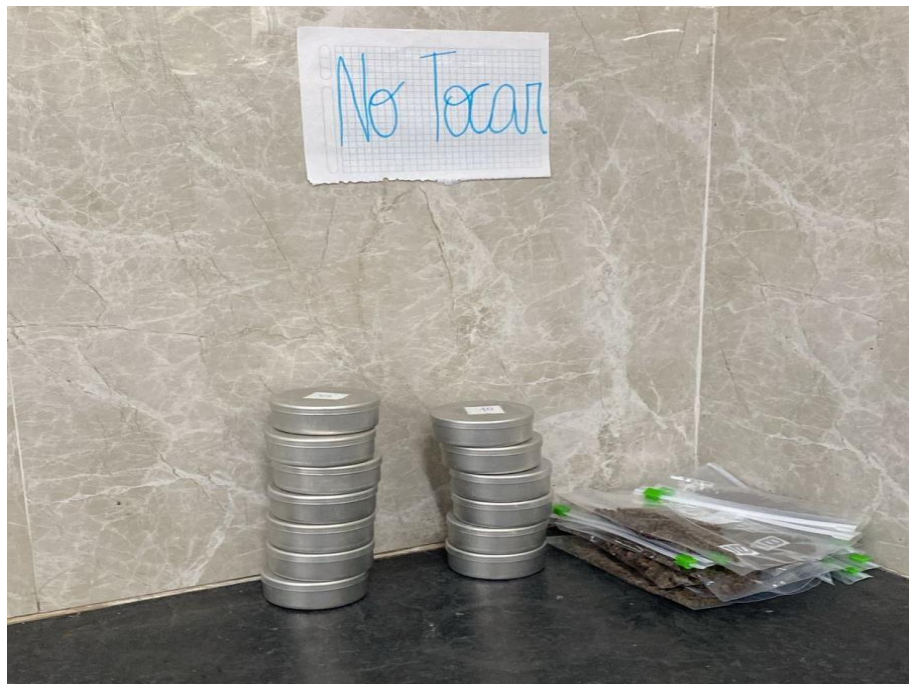


Figura 29. Almacenamiento del polvo de semillas de *Carica papaya*



Figura 30. Acondicionamiento del pH en las diferentes muestras de agua superficial



Figura 31. Equipo de Test de jarras con un espacio de 6 vasos precipitados



Figura 32. Test de jarra con el coagulante natural

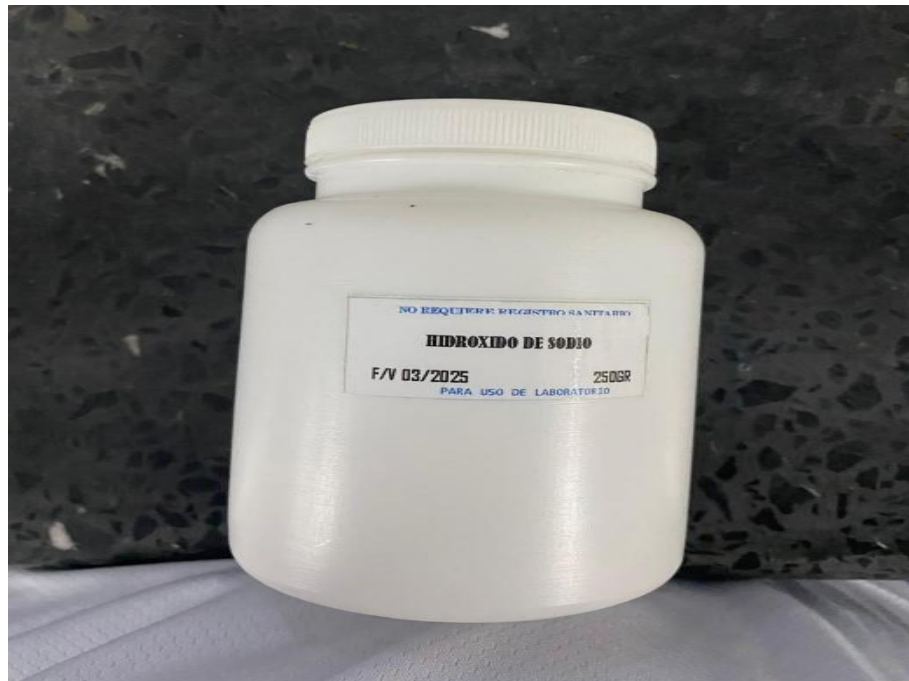


Figura 33. Hidróxido de sodio para ajustar el valor del pH del medio acuoso



Figura 34. Medición de la turbidez inicial de las diferentes muestras de agua

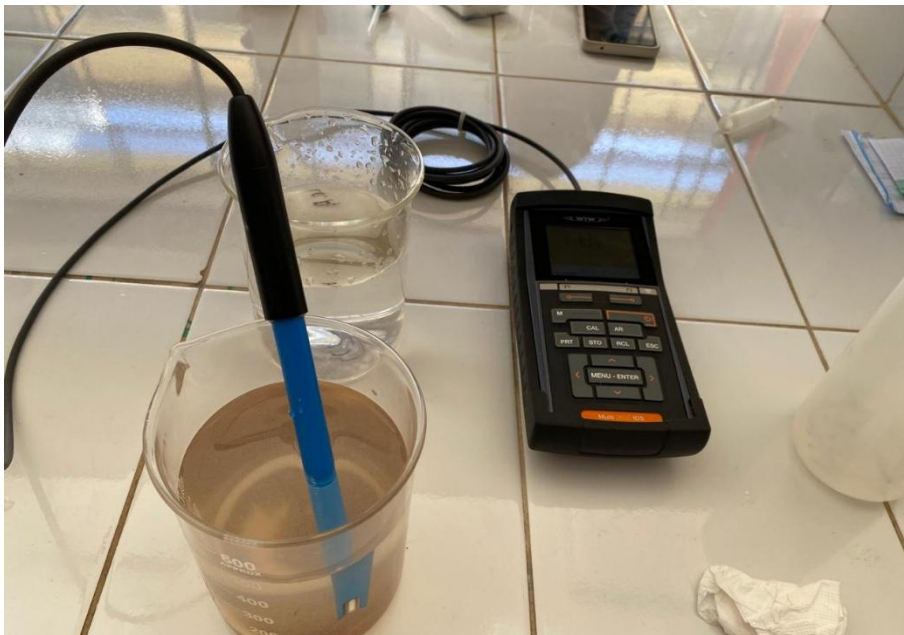


Figura 35. Medición del sobrenadante de las diferentes muestras de agua



Figura 36. Medición de los parámetros finales de las diferentes muestras de agua



Figura 37. Mediciones de la turbidez en las muestras de agua con lluvia