

Natural Flocculation with Tara (*Caesalpinia spinosa*) as a Sustainable Strategy to Reduce Turbidity in the Chonta River

Paulo C. Poma¹, Gladys S. Licapa-Redolfo², Jhenyfer Díaz³, Ronal Aceijas-Diaz⁴, Maryuri Vega-Eras⁵
^{1,2,3,4,5}Universidad Privada del Norte, Perú.; N00179583@upn.pe; gladys.licapa@upn.edu.pe; jhenyfer.diaz@upn.edu.pe; N00211773@upn.pe; maryuri.vega@upn.edu.pe

Abstract – *The present study evaluated the effectiveness of the natural flocculant based on tara (Caesalpinia spinosa) as a sustainable alternative for turbidity removal in contaminated water. Treatment conditions were analyzed in two sedimentation intervals, 15 and 30 minutes, using a 200-mesh sieve and three stages: rapid mixing at 200 rpm for 2 minutes, slow mixing at 40 rpm for 20 minutes, and floc sedimentation for the specified time. Different concentrations of tara (Caesalpinia spinosa) were tested. At the 15-minute interval, the samples showed an initial turbidity removal of 9.60%, reducing the average from 62.5 NTU to 56.5 NTU. A gradual increase in treatment efficiency was observed, achieving a significant removal of 58.56%, with residual turbidity values as low as 25.9 NTU. In cases of higher concentration, the maximum recorded removal was 61.60%, with a residual turbidity of 29 NTU, suggesting a saturation point where higher concentrations do not produce significant improvements. At the 30-minute interval, the results showed greater efficiency in turbidity removal. The samples reduced turbidity by up to 42.68%, reaching values of 37.2 NTU in the initial concentrations. The efficiency progressively increased, achieving a removal of 73.60%, with residual turbidity of 16.5 NTU. In the most effective treatments, the maximum removal reached 80.16%, with a residual turbidity of 12.5 NTU, highlighting that longer sedimentation times improve the results. These findings confirm that the tara flocculant is effective for turbidity removal, especially in extended sedimentation intervals, positioning it as a viable and cost-effective solution for contaminated water treatment.*

Keywords: *Caesalpinia spinosa, natural flocculant, turbidity removal.*

Floculación Natural con Tara (*Caesalpinia spinosa*) como Estrategia Sostenible para Reducir la Turbidez en el Río Chonta

Paulo C. Poma¹, Gladys S. Licapa-Redolfo², Jhenyfer Díaz³, Ronal Aceijas-Díaz⁴, Maryuri Vega-Eras⁵
1,2,3,4,5 Universidad Privada del Norte, Perú; N00179583@upn.pe; gladys.licapa@upn.edu.pe; jhenyfer.diaz@upn.edu.pe; N00211773@upn.pe; maryuri.vega@upn.edu.pe

Resumen - El presente estudio evaluó la eficacia del floculante natural a base de tara (*Caesalpinia spinosa*) como una alternativa sostenible para la remoción de turbidez en agua contaminada. Se analizaron las condiciones de tratamiento en dos intervalos de sedimentación, 15 y 30 minutos, usando una malla 200 y utilizando tres etapas: mezcla rápida a 200 rpm durante 2 minutos, mezcla lenta a 40 rpm durante 20 minutos y sedimentación de flóculos durante el tiempo especificado. Se trabajó con diferentes concentraciones de tara (*Caesalpinia Spinosa*). En el intervalo de 15 minutos, las muestras presentaron una remoción inicial de turbidez del 9.60%, reduciendo el promedio de 62.5 NTU a 56.5 NTU. Se observó un incremento gradual en la eficacia del tratamiento, alcanzando una remoción significativa del 58.56%, con valores de turbidez residual de hasta 25.9 NTU. En los casos de mayor concentración, la remoción máxima registrada fue del 61.60%, con una turbidez residual de 29 NTU, sugiriendo un punto de saturación donde mayores concentraciones no producen mejoras significativas. En el intervalo de 30 minutos, los resultados mostraron una mayor eficiencia en la remoción de turbidez. Las muestras redujeron la turbidez hasta un 42.68%, alcanzando valores de 37.2 NTU en las concentraciones iniciales. La eficiencia aumentó progresivamente, logrando una remoción del 73.60%, con turbidez residual de 16.5 NTU. En los tratamientos más efectivos, la remoción máxima fue del 80.16%, con una turbidez residual de 12.5 NTU, destacando que tiempos mayores de sedimentación mejoran los resultados. Estos hallazgos confirman que el floculante de tara es eficaz para la remoción de turbidez, especialmente en intervalos prolongados de sedimentación, posicionándose como una solución viable y económica para el tratamiento de agua contaminada.

Palabras clave: *Caesalpinia spinosa*, floculante natural, remoción de turbidez.

I. INTRODUCCIÓN

El Perú, conocido mundialmente por su extraordinaria biodiversidad, alberga una vasta gama de especies vegetales que poseen un alto potencial tanto industrial como ambiental. Este país andino se caracteriza por su diversidad climática y geográfica, lo que permite el desarrollo de una gran variedad de plantas con propiedades únicas. Entre estas especies, *Caesalpinia spinosa*, popularmente conocida como tara, se distingue por su notable versatilidad en aplicaciones industriales, alimentarias y medioambientales. Nativa de los Andes, la tara crece de manera natural en altitudes que oscilan entre los 500 y 3,000 metros sobre el nivel del mar y se cultiva ampliamente en zonas áridas y semiáridas, donde las condiciones climáticas adversas limitan la producción de otros

cultivos [1][2][3].

Además de su resistencia y adaptabilidad, *Caesalpinia spinosa* destaca por ser una fuente rica en compuestos bioactivos que tienen un amplio rango de aplicaciones comerciales. Entre sus principales componentes, los taninos y la goma de tara han demostrado ser de gran valor en diversas industrias. Los taninos, reconocidos por sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas, son ampliamente utilizados en la industria farmacéutica para el desarrollo de medicamentos y productos cosméticos. Asimismo, en la industria alimentaria, los taninos juegan un papel crucial como agentes conservantes y mejoradores de sabor. Por su parte, la goma de tara, que actúa como estabilizante y espesante, tiene una creciente demanda en la producción de alimentos procesados, además de aplicaciones en adhesivos y otros productos industriales. Estas características hacen de la tara un recurso estratégico para el desarrollo económico sostenible del Perú [4][5][6].

En el ámbito ambiental, *Caesalpinia spinosa* ha ganado relevancia en investigaciones orientadas a la mitigación de la contaminación hídrica, posicionándose como una alternativa sostenible frente a los productos químicos tradicionales. Los extractos de tara han mostrado una alta eficacia como coagulantes naturales en el tratamiento de aguas residuales, permitiendo la remoción de turbidez y la reducción de metales pesados. Este enfoque no solo contribuye a la protección de los recursos hídricos, sino que también minimiza los impactos ambientales asociados con el uso de coagulantes sintéticos. La capacidad de la tara para mejorar la calidad del agua la convierte en un recurso valioso en regiones donde el acceso a agua limpia y segura sigue siendo un desafío crítico [7][8][9].

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficacia del floculante natural derivado de la tara (*Caesalpinia spinosa*) como una alternativa viable frente a los agentes químicos convencionales. La importancia de este enfoque radica en su potencial para ofrecer una opción más segura, económica y ambientalmente responsable en el tratamiento de aguas contaminadas, destacando su aplicabilidad en entornos donde la preservación de los recursos naturales es prioritaria.[10][11][12]

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Recolección y Preparación de Muestras de Tara

Se realizó la recolección de vainas de *Caesalpinia spinosa*

(tara) en la región de Cajamarca, Perú, específicamente en las coordenadas 7°8'42" S y 78°29'12" W. Este paso inicial implicó la limpieza de las vainas para eliminar impurezas y la reducción de su humedad mediante secado a temperatura ambiente [13][14]. Posteriormente, las vainas fueron procesadas para obtener un polvo homogéneo y tamizado, que se utilizó como base para la preparación de soluciones floculantes en distintas concentraciones [15].

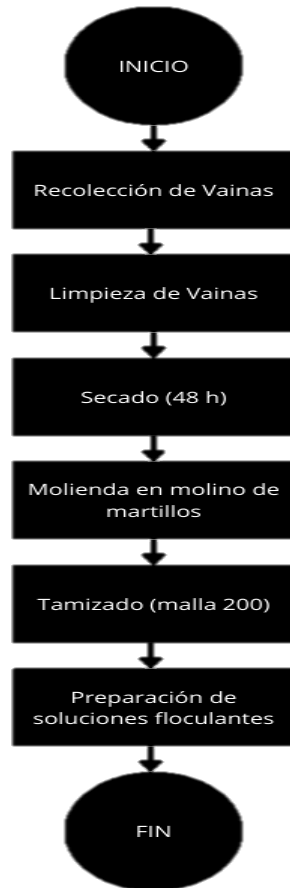


Figura 1. Flujograma del proceso de preparación de soluciones floculantes a partir de vainas de tara



Figura 2. Ubicación de la recolección de las muestras en el río Chonta, Cajamarca, Perú

TABLA I
COORDENADAS DE LA UBICACIÓN

Latitud (°S)	Longitud (°W)
-7.1524	-78.5278

B. Caracterización de la Muestra

El estudio incluyó la obtención de muestras de agua del río Chonta, las cuales fueron caracterizadas preliminarmente para conocer sus condiciones iniciales. Este proceso implicó mediciones de turbidez, pH y conductividad, realizadas con equipos calibrados siguiendo estándares establecidos [16][17]. Los datos iniciales sirvieron como referencia para evaluar los efectos del tratamiento con el floculante de tara.

C. Pruebas de Eficiencia del Floculante

El diseño experimental se centró en la aplicación de un proceso de coagulación-floculación a escala de laboratorio. Este proceso incluyó la preparación y uso de soluciones floculantes en diferentes concentraciones, evaluadas mediante el método de prueba de jarras (jar test). Los parámetros clave del procedimiento, como las velocidades de mezcla y tiempos de sedimentación, se mantuvieron constantes para garantizar la reproducibilidad de los resultados [18]. Siendo T1, T2, T3 y T4 los tratamientos en la Tabla III.

TABLA II
CONDICIONES OPERATIVAS DEL PROCESO DE MEZCLA

Paso	Descripción
1	Mezcla rápida a 200 rpm durante 2 minutos
2	Mezcla lenta a 40 rpm durante 15 y 30 minutos
3	Sedimentación de los flóculos durante 15 minutos

TABLA III
DOSIS Y VOLÚMENES DEL FLOCULANTE DE TARA
EVALUADOS

Condición	Concentración (ppm)	Volumen (ml)
T1	500	20
T2	600	24
T3	700	28
T4	800	32

D. Optimización de Parámetros

La optimización de parámetros implicó evaluar las eficiencias de remoción en función de las dosis aplicadas, así como interpretar los cambios observados en el pH y la conductividad del agua tratada. Los resultados se contrastaron con investigaciones previas para validar el enfoque utilizado [19][20].

E. Tipo de Investigación

La investigación es de tipo experimental, ya que se enfoca en manipular variables bajo condiciones controladas para observar sus efectos. Este enfoque permite determinar con precisión la eficacia del floculante de tara en el tratamiento de agua, identificando la relación entre la concentración del floculante y la calidad del agua tratada [21].

F. Diseño de la Investigación

El diseño fue experimental y descriptivo transversal, ya que combinó la evaluación de parámetros específicos en un único momento con el control experimental de las condiciones del proceso. Este diseño implicó recolectar y analizar datos puntuales para caracterizar los efectos del tratamiento, sin evaluar cambios a largo plazo [22].

G. Recopilación de Muestras de Agua

La recopilación de muestras de agua se llevó a cabo siguiendo un enfoque sistemático para garantizar la representatividad. Esto incluyó la selección de un punto estratégico en el río Chonta y el seguimiento de protocolos estándar para la conservación de las muestras durante el transporte y análisis.

H. Medición de Turbidez Inicial

La medición de la turbidez inicial se llevó a cabo utilizando un turbidímetro digital calibrado según los estándares establecidos para análisis de calidad del agua. Este equipo permitió determinar la turbidez en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Este procedimiento se realizó inmediatamente después de la recolección de las muestras de agua para asegurar que los valores obtenidos representaran fielmente las condiciones naturales del río Chonta. Los datos de turbidez inicial sirvieron como punto de referencia para comparar los resultados posteriores al tratamiento y evaluar la eficiencia del floculante de *Caesalpinia spinosa*.

I. Preparación del Tratamiento

El tratamiento del agua incluyó la preparación de soluciones floculantes en concentraciones predeterminadas, utilizando el polvo de tara obtenido. Este paso fue clave para evaluar cómo la variación en las dosis influyó en la eficacia del proceso de clarificación del agua. [15]

J. Medición de la Turbidez Post-Tratamiento

La medición post-tratamiento se realizó comparando los resultados iniciales y finales, lo que permitió calcular la eficiencia de remoción. Este análisis fue fundamental para validar la viabilidad del uso de *Caesalpinia spinosa* como floculante natural.

K. Análisis de datos

El análisis de datos se realizó utilizando herramientas computacionales para organizar y graficar las eficiencias obtenidas. Este enfoque facilitó la comparación con estudios similares y la identificación de las condiciones óptimas para maximizar la remoción de turbidez [19][20].

L. Interpretación y Presentación de Resultados

Los resultados se presentaron en tablas y gráficos que destacaron las tendencias observadas. Este paso implicó discutir los hallazgos en el contexto de investigaciones previas, reforzando la relevancia del uso de floculantes naturales en aplicaciones sostenibles [21].

M. Población

La población considerada para el presente estudio estuvo conformada por muestras de agua recolectadas del río Chonta, ubicado en la región de Cajamarca, Perú. Este río fue seleccionado por su relevancia en la zona y por presentar condiciones representativas de cuerpos de agua con turbidez debido a actividades antropogénicas y naturales. Las vainas de *Caesalpinia spinosa* utilizadas en el tratamiento fueron recolectadas en áreas rurales de la región, procesadas mediante molienda y tamizadas a través de una malla 200 para garantizar la uniformidad del material empleado en la remoción de turbidez.

N. Cálculo de Remoción de Turbidez:

$$PR = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100 \text{ -----(1)}$$

PR: Porcentaje de remoción

C_i: Concentración inicial

C_f: Concentración final

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de turbidez realizado en los tiempos de retención de 15 y 30 minutos evidencia variaciones significativas en la capacidad de remoción.

TABLA IV
RESULTADOS INICIALES SIN FLOCULANTE (*Caesalpinia spinosa*)

Parámetro	Valor
Turbidez (M1)	62.5 NTU
Turbidez (M2)	251 NTU

A. Resultados obtenidos luego de 15 minutos

A los 15 minutos de iniciado el proceso, los resultados obtenidos evidenciaron variaciones significativas en la capacidad de remoción de turbidez dependiendo de la concentración de coagulante empleada y las etapas del tratamiento aplicado. En la Tabla 5 se puede observar que la muestra P0, que no recibió coagulante, mantuvo constantes los niveles de turbidez en todas las etapas (62.5 NTU), confirmando que las condiciones de mezcla y sedimentación por sí solas no tienen impacto significativo en la reducción de turbidez. Este resultado refuerza la necesidad de un agente coagulante para promover la formación y estabilización de flocúlos en el agua tratada.

TABLA V
REMOCIÓN DE TURBIDEZ A LOS 15 MINUTOS

Muestra	Conc. [mg/L]	Turbidez (NTU)		
		T1	T2	T3
P0	0	251	251	251
P1	500	56.5	55.7	80.1
P2	600	41.9	57.4	82.7
P3	700	25.9	50.2	79.7
P4	800	29	59.7	101

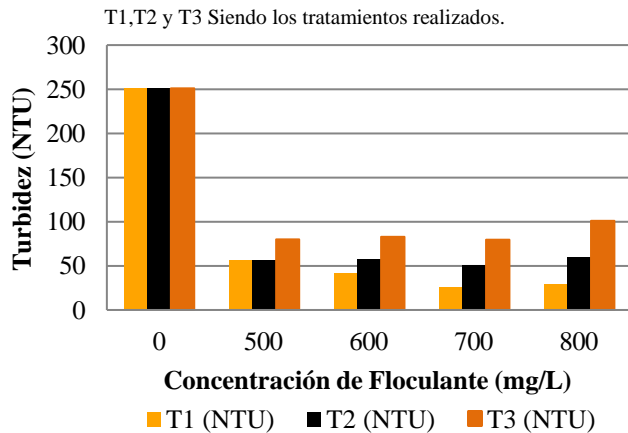


Figura 3. Resultados de la Remoción de Turbidez Utilizando *Caesalpinia Spinosa* como Coagulante a los 15 Minutos

Por otro lado, las muestras tratadas con coagulante mostraron un comportamiento variable, resaltando la importancia de una dosificación adecuada. En la tabla y en la figura 3 se puede observar que, en P1, con una concentración de 500 mg/L, se observó una reducción inicial de turbidez en T1 (56.5 NTU) y T2 (55.7 NTU); sin embargo, en T3 la turbidez aumentó notablemente a 80.1 NTU. Este incremento sugiere

que los flocúlos formados no eran suficientemente estables para mantenerse durante la sedimentación, posiblemente debido a una concentración subóptima del coagulante.

El comportamiento en P2, con 600 mg/L, mostró una tendencia similar. En la Tabla 5 se puede observar que, aunque se logró una reducción más pronunciada en T1 (41.9 NTU), la turbidez aumentó en las etapas posteriores, alcanzando 82.7 NTU en T3. Esto evidencia que, a pesar de una mejora inicial, la formación y sedimentación de flocúlos no fueron efectivas con esta concentración, lo que podría deberse a un desequilibrio en la interacción entre partículas y coagulante.

La muestra P3, tratada con 700 mg/L, presentó la mayor reducción inicial de turbidez en T1 (25.9 NTU), destacándose como el tratamiento más efectivo en esta etapa. En la Tabla 5 y en la figura 3 se puede observar que, sin embargo, en T2 y T3, los niveles aumentaron a 50.2 NTU y 79.7 NTU, respectivamente, aunque se mantuvieron inferiores en comparación con las muestras tratadas con concentraciones menores. Este resultado sugiere que, aunque esta concentración fue efectiva en la etapa inicial, la estabilidad de los flocúlos durante las etapas posteriores podría haberse visto afectada por condiciones del proceso, como el tiempo de sedimentación o la velocidad de mezcla.

La muestra P4, con 800 mg/L, mostró una reducción inicial significativa (29 NTU) en T1, pero experimentó el mayor incremento en turbidez en las etapas siguientes, alcanzando 101 NTU en T3. En la Tabla 5 se puede observar que esto demuestra que una sobre-dosificación del coagulante puede ser contraproducente, desestabilizando los flocúlos formados y resultando en niveles de turbidez superiores. Este fenómeno subraya los riesgos asociados con concentraciones excesivas de coagulante, que pueden interferir con la efectividad del proceso de clarificación.

TABLA VI
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ A LOS 15 MINUTOS

Muestra	Conc. [mg/L]	Turbidez (NTU)		
		T1	T2	T3
P0	0	0.00	0.00	0.00
P1	500	9.60	10.88	-28.16
P2	600	32.96	8.16	-32.32
P3	700	58.56	19.68	-27.52
P4	800	53.60	4.48	-61.60

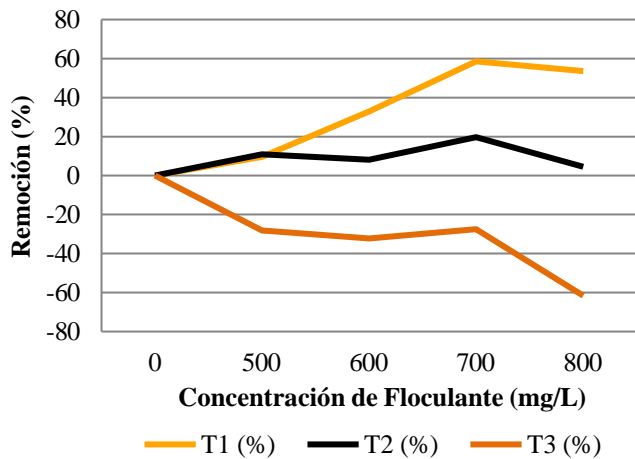


Figura 4. Resultados de Porcentaje de Remoción de Turbidez Utilizando *Caesalpinia Spinosa* a los 15 Minutos

Así como también, se evaluaron los porcentajes de remoción de turbidez en las cinco muestras sometidas a diferentes concentraciones de coagulante que se pueden observar en la figura 4 con la fórmula 1, considerando las tres etapas de tratamiento: mezcla rápida (T1), mezcla lenta (T2) y sedimentación (T3). Los resultados obtenidos muestran una variación considerable en la remoción de turbidez dependiendo de la concentración utilizada y la etapa del tratamiento.

En la muestra P0, que no recibió coagulante, los valores de remoción permanecieron en 0.00% durante todas las etapas, confirmando que los tratamientos por sí solos no son efectivos para reducir la turbidez en ausencia de coagulante. Para P1 (500 mg/L), se observó una reducción moderada en T1 (9.60%) y un ligero aumento en T2 (10.88%), pero en T3 el valor fue negativo (-28.16%), lo que indica una posible resuspensión de partículas que no lograron sedimentar adecuadamente. Este comportamiento señala que esta concentración es insuficiente para formar flóculos estables que puedan mantenerse durante la sedimentación.

En la muestra P2 (600 mg/L), la remoción inicial en T1 fue mayor (32.96%), pero disminuyó considerablemente en T2 (8.16%) y se tornó negativa en T3 (-32.32%), mostrando que, aunque se logró una mayor eficiencia inicial, los flóculos formados no resistieron las condiciones posteriores del proceso. La muestra P3 (700 mg/L) presentó el mejor desempeño en T1, con una remoción del 58.56%, siendo la más alta de todas las concentraciones evaluadas. Sin embargo, en T2 y T3 los valores disminuyeron a 19.68% y -27.52%, respectivamente, lo que sugiere que, aunque esta concentración fue efectiva en las etapas iniciales, la sedimentación todavía presenta ineficiencias.

La muestra P4 con 800 mg/L de floculante natural mostró una remoción significativa en T1 (53.60%), aunque inferior a la de P3. Sin embargo, en las etapas posteriores (T2 y T3), los valores fueron de 4.48% y -61.60%, respectivamente, lo que indica que una concentración elevada puede provocar efectos adversos, como la desestabilización de flóculos debido a una posible sobre-dosificación. Estos resultados resaltan la necesidad de optimizar la concentración de coagulante y las condiciones de tratamiento para evitar pérdidas en la eficiencia de remoción, especialmente en la etapa de sedimentación.

B. Resultados obtenidos a los 30 minutos

A los 30 minutos de iniciado el proceso, se evaluaron los niveles de turbidez en cinco muestras de agua tratadas con diferentes concentraciones de coagulante, considerando tres etapas: mezcla rápida (T1), mezcla lenta (T2) y sedimentación (T3). Los resultados obtenidos reflejan una variación significativa en la reducción de turbidez en función de la concentración utilizada y el tiempo transcurrido en cada etapa del tratamiento.

TABLA VII
REMOCIÓN DE TURBIDEZ A LOS 30 MINUTOS

Muestra	Conc. [mg/L]	Turbidez (NTU)		
		T1	T2	T3
P0	0	251	251	251
P1	500	38.6	35.9	37.2
P2	600	40.1	42.3	44.1
P3	700	110	105	63.7
P4	800	53.4	51.7	49.8

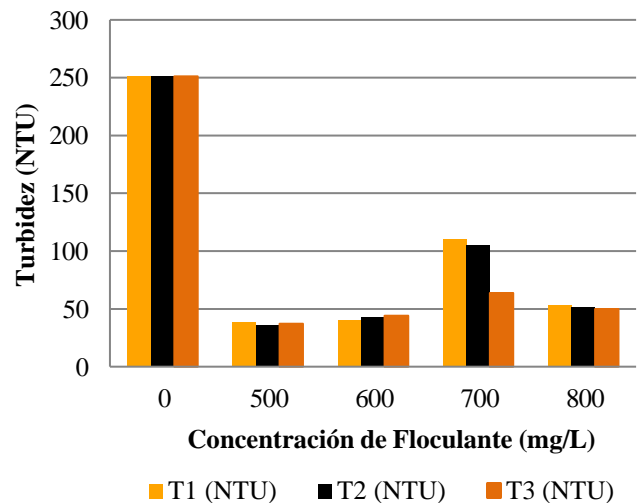


Figura 5. Resultados de la Remoción de Turbidez Utilizando *Caesalpinia Spinosa* a los 30 Minutos

En la muestra P0, que no recibió coagulante, los valores de turbidez permanecieron constantes en 251 NTU en todas las etapas observadas en la tabla 7, lo que confirma que, sin la adición de un agente coagulante, los procesos de mezcla y sedimentación no tienen impacto en la reducción de turbidez. Para P1 (500 mg/L), se observó una reducción importante en T1, con un valor de 38.6 NTU, que se mantuvo estable durante T2 (35.9 NTU) y T3 (37.2 NTU). Esto indica una eficiencia moderada de esta concentración, logrando una clarificación sostenida a lo largo del tratamiento

En la muestra P2 (600 mg/L), se logró una reducción inicial de turbidez en T1 (40.1 NTU), pero los valores aumentaron ligeramente en T2 (42.3 NTU) y T3 (44.1 NTU), lo que sugiere que los flóculos formados con esta concentración no tuvieron suficiente estabilidad para mantener bajos niveles de turbidez en las etapas posteriores. Por su parte, la muestra P3 (700 mg/L) presentó una reducción significativa en T1, alcanzando 110 NTU, y continuó disminuyendo en T2 (105 NTU) y T3 (63.7 NTU). Este comportamiento destaca que esta concentración es altamente efectiva en mejorar la calidad del agua, con una tendencia a mejorar en las etapas de mezcla lenta y sedimentación.

La muestra P4 (800 mg/L) mostró una remoción inicial significativa en T1 (53.4 NTU), que se mantuvo relativamente estable en T2 (51.7 NTU) y T3 (49.8 NTU). Aunque esta concentración logra una reducción considerable de la turbidez, los valores obtenidos son menos efectivos que los alcanzados con P3 en las etapas finales, lo que sugiere que la sobre-dosificación del coagulante puede limitar la eficiencia del proceso. Estos resultados enfatizan la necesidad de seleccionar cuidadosamente la concentración de coagulante y optimizar los tiempos y condiciones de cada etapa para maximizar la remoción de turbidez y mejorar la calidad del agua tratada.

TABLA VIII
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ A LOS 30 MINUTOS

Muestra	Conc. [mg/L]	Porcentaje de remoción de Turbidez (%)		
		T1	T2	T3
P0	0	0.00	0.00	0.00
P1	500	84.62	85.70	85.18
P2	600	84.02	83.15	82.43
P3	700	56.18	58.17	74.62
P4	800	78.73	79.40	80.16

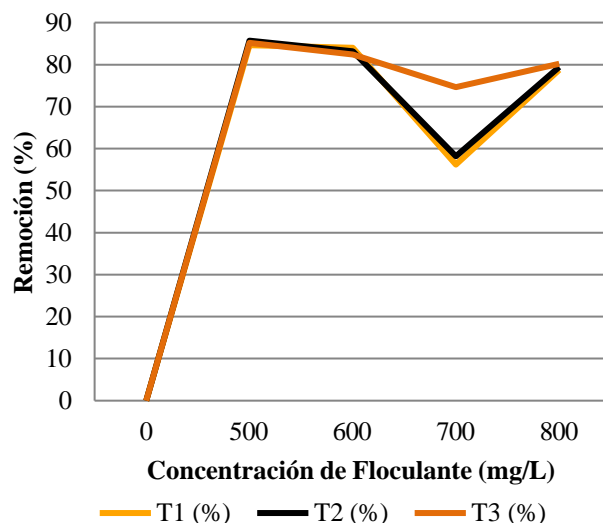


Figura 6. Resultados de Porcentaje de Remoción de Turbidez Utilizando *Caesalpinia Spinosa* como Coagulante a los 30 Minutos

De igual manera, se evaluaron los porcentajes de remoción de turbidez para cinco muestras sometidas a diferentes concentraciones de coagulante en tres etapas observadas en la tabla 8 y en la figura 6 utilizando la fórmula 1: mezcla rápida (T1), mezcla lenta (T2) y sedimentación (T3). Los resultados obtenidos muestran cómo varía la eficiencia de remoción en función de la concentración utilizada y las condiciones de cada etapa.

En la muestra P0, que no recibió coagulante, los valores de remoción permanecieron en 0.00% durante todas las etapas, lo que evidencia la ineficacia del proceso de tratamiento en ausencia de un agente coagulante. Por otro lado, en la muestra P1 (500 mg/L), se obtuvo una remoción significativa desde la primera etapa, alcanzando un 84.62% en T1, que se incrementó ligeramente en T2 (85.70%) y se mantuvo constante en T3 (85.18%) lo cual se pueden observar en la tabla 8 y en la figura 6. Este comportamiento muestra que esta concentración fue eficiente para lograr una reducción estable de la turbidez a lo largo del proceso.

En la muestra P2 (600 mg/L), se alcanzaron valores similares a P1, con un 84.02% de remoción en T1, seguido de ligeras disminuciones en T2 (83.15%) y T3 (82.43%). Esto sugiere que, aunque esta concentración logra una buena remoción inicial, los flóculos formados podrían no ser completamente estables durante las etapas posteriores. En la muestra P3 (700 mg/L), la remoción en T1 fue menor, con un 56.18%, pero mejoró significativamente en T2 (58.17%) y alcanzó un 74.62% en T3. Este comportamiento destaca la efectividad de esta concentración durante la etapa de sedimentación, aunque su desempeño inicial fue menor en comparación con las concentraciones más bajas.

La muestra P4 (800 mg/L) presentó una remoción inicial de 78.73% en T1, que se incrementó ligeramente en T2 (79.40%) y T3 (80.16%). Aunque este tratamiento mostró una remoción sostenida, no logró superar los valores alcanzados por P1 y P2 en las etapas iniciales. Estos resultados resaltan que las concentraciones de 500 y 600 mg/L son más efectivas para mantener una remoción alta y constante de turbidez, mientras que concentraciones mayores, como 700 y 800 mg/L, tienen un mejor desempeño en las etapas finales del tratamiento, particularmente en la sedimentación. Esto subraya la necesidad de ajustar la concentración de coagulante según los objetivos específicos de remoción y las condiciones del proceso.

C. Evaluación estadística

En la tabla 9, se muestra que la remoción de turbidez es la variable en función a la dosificación del floculante natural y el tiempo de velocidad lenta en minutos. En ambos casos el valor el valor P (tabulado) es mayor que el nivel de significancia, lo que indica que la concentración del floculante natural y el tiempo no tienen efecto significativo sobre la variable respuesta, sin embargo, la interacción de la concentración de *Caesalpinia spinosa* y el tiempo de factores del efecto combinado de estos factores influye significativamente en la variable analizada.

TABLA IX
ANÁLISIS DE VARIANZA EN LA REMOCIÓN DE TURBIDEZ

Fuente	SC Gl	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Conc Tara (mg/L)	3	290.67	96.89	1.48 0.258
Tiempo (min)	1	15.25	15.25	0.23 0.636
Conc Tara (mg/L)*Tiempo (min)	3	669.64	223.21	3.41 0.043
Error	16	1048.22	65.51	
Total	23	2023.79		

Estudios complementarios han demostrado la efectividad de diversos coagulantes naturales, incluyendo *Caesalpinia spinosa* y otros compuestos vegetales, en la remoción de turbidez en diferentes tipos de agua. En una investigación, se evaluó un coagulante extraído de *Stenocereus griseus* en la potabilización de agua cruda con turbiedades iniciales que variaban entre 20 y 100 NTU. Las dosis óptimas del coagulante, entre 300 y 600 ppm, lograron una remoción de turbidez que osciló entre 14.50% y 80.42% antes de la simulación de filtración y entre 69.27% y 96.46% después de ella. Este resultado subraya la capacidad del coagulante para mejorar significativamente la calidad del agua tratada, cumpliendo con los estándares de potabilización establecidos. [22]

En otros estudios, se diseñó un biofiltro utilizando mucílago de *Caesalpinia spinosa* para tratar las aguas

superficiales del río Pollo, en la provincia de Otuzco. Los resultados indicaron una efectividad del 99.3% en la reducción de turbidez, posicionándolo como una de las opciones más viables para el tratamiento doméstico de aguas. Este diseño, además de ser económico, incluyó un tanque principal de tratamiento con motor DC, un tanque de reserva y mallas filtrantes, lo que permitió la producción de agua de alta calidad, destacando el potencial del mucílago como una solución práctica y sostenible. [23]

Así como también, en la remoción de turbidez de una suspensión artificial de bentonita, se utilizó goma de tara (*Caesalpinia spinosa*) como ayudante de coagulación en combinación con sulfato de aluminio tipo A. En turbiedades iniciales de 400 NTU y 30 NTU, la turbidez residual se redujo a 0.40 NTU y 0.32 NTU, respectivamente, mostrando una mejora del 63.3% y 56% en la reducción de turbidez cuando se añadió goma de tara. Este estudio también demostró que es posible reducir el uso de sulfato de aluminio en un 40% para turbiedades bajas, lo que representa un avance significativo hacia un tratamiento de agua más sostenible y menos dependiente de coagulantes químicos. [24]

Además, investigaciones sobre aguas residuales generadas en la producción de azúcar, caracterizadas por un pH de 5.3 y turbiedad de 351 NTU, mostraron que *Aloe vera* y *Caesalpinia spinosa* pueden ser coagulantes altamente efectivos. El mucílago de *Aloe vera* alcanzó una eficiencia de remoción de turbidez del 86.69% con una concentración de 40,000 ppm, mientras que *Caesalpinia spinosa* logró una eficiencia del 82.35% en las mismas condiciones. Estos resultados evidencian que el mucílago presente en ambas plantas es capaz de atraer partículas de carga negativa, promoviendo la coagulación y clarificación del agua. [25]

En otros análisis, el uso de goma de tara en agua con turbiedades iniciales de 53 NTU, 58 NTU y 60 NTU redujo la turbidez a rangos de 11.7-19.2 NTU, 11.84-18.89 NTU y 12.86-20.20 NTU, respectivamente. Las eficiencias de remoción de sólidos suspendidos alcanzaron 81%, 77.92% y 79.59%, mientras que los valores de color y conductividad mostraron variaciones significativas, indicando que estos parámetros son determinantes en el proceso de coagulación-floculación. Este estudio reafirma que *Caesalpinia spinosa* no solo mejora la turbidez, sino que también contribuye al control de otros parámetros fisicoquímicos. [26]

IV. CONCLUSIONES

Se evaluó la eficacia del floculante natural a base de tara (*Caesalpinia spinosa*) para la remoción de turbidez en agua contaminada, observándose en la etapa inicial (15 minutos de sedimentación) una reducción del 9.60% (de 62.5 NTU a 56.5 NTU), que fue incrementándose hasta alcanzar una remoción

del 58.56% y, en los casos de mayor concentración, un máximo de 61.60%.

Se comprobó que la eficiencia en la remoción de turbidez se incrementó al aumentar el tiempo de sedimentación a 30 minutos, logrando reducciones del 42.68% en las concentraciones iniciales y alcanzando un máximo de 80.16% (con valores de turbidez residual de 12.5 NTU), lo cual evidenció que intervalos de sedimentación más prolongados mejoran significativamente el desempeño del floculante.

Se identificó la existencia de un punto de saturación en las concentraciones más altas, pues incrementos adicionales del floculante no produjeron mejoras relevantes en la remoción de turbidez, lo que sugiere la necesidad de optimizar tanto la dosificación como el tiempo de sedimentación para maximizar la eficacia de este tratamiento.

Se demostró que el floculante de tara constituye una alternativa segura y económica frente a agentes químicos convencionales, puesto que los valores de remoción de turbidez obtenidos respaldan su aplicabilidad en el tratamiento de aguas contaminadas, especialmente en contextos que priorizan la preservación de los recursos naturales.

Se determinó que este enfoque de tratamiento puede ser considerado una opción sostenible y responsable, dadas sus ventajas en términos de eficacia, costo y bajo impacto ambiental, posicionándose como una solución viable para mejorar la calidad del agua en diversos entornos.

V. REFERENCIAS

- [1] De la Cruz Lapa, P. (2004). *Aprovechamiento integral y racional de la Tara (Caesalpinia spinosa - Caesalpinia tinctoria)*. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, 7(14), 64-73. Disponible en: https://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/publicaciones/geologia/Vo17_N14/a09.pdf
- [2] Sanabria Pérez, N. R. (2011). *Extracción de goma a partir de semillas de Tara (Caesalpinia spinosa) y evaluación de sus propiedades reológicas* (Tesis de Ingeniería en Industrias Alimentarias). Universidad Nacional del Centro del Perú. Disponible en: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1216/TE_SIS%20NOEMI%20SANABRIA.pdf?sequence=1
- [3] Vega Villanueva, C. R. (2019). *Silvicultura y comercialización de la tara (Caesalpinia spinosa (Feuillee ex Molina Kuntze))*. Universidad Nacional de Cajamarca. Disponible en: <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3203>
- [4] Goycochea Ricci, R. A. (2010). *Evaluación de taninos y goma del fruto de la tara (Caesalpinia spinosa (Molina) Kuntze) provenientes de las lomas de Atiquipa, Arequipa - Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/43d4bac8-05be-4643-a716-ad8485a4df27/full>
- [5] Bacardit, A., Díaz, J., Casas, C., & Ollé, L. (2016). *Dimensional and structural stability of leather under alternating climate conditions*. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108045/02.pdf?sequence=2>
- [6] Castell, J. C., Fabregat, C., Sorolla, S., Jorba, M., Bacartit, A., & Ollé, L. (2012). *Caesalpinia spinosa (tara): La fuente sostenible de taninos*. AQUEIC Revista de Tecnología de Curtidos, 63(2). Disponible en: https://aqueic.org/wp-content/uploads/2022/10/v63N2_03_ES.pdf
- [7] Hurtado de Mendoza Cruz, W. A. R., & Orbegoso Rabines, E. J. (2015). *Evaluación del uso de goma de tara (Caesalpinia spinosa kuntze) como coagulante natural en el tratamiento de agua*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/de853908-de32-4f26-b02a-25b9e54c8ce1>
- [8] Ramírez Flores, K. D. P. (2017). *Dosis de coagulante natural Caesalpinia spinosa para mejorar la calidad de las aguas residuales en el Dren 4000* (Tesis de Ingeniería Ambiental). Universidad César Vallejo. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/33240?show=full>
- [9] Montenegro Valdivia, J. P. (2019). *Comparación de la eficiencia del mucílago de Opuntia ficus indica y goma de Caesalpinia spinosa en la mejora de la calidad de agua residual de camal* (Tesis de Ingeniería Ambiental). Universidad César Vallejo. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/43789/Montenegro_VJP-SD.pdf
- [10] Ccora Crispin, R. V., & Curasma Bendezu, N. (2021). *Eficiencia de la goma de la semilla de tara (Caesalpinia spinosa) como ayudante de coagulación en el tratamiento de agua potable de la EPS Emapa Huancavelica* (Tesis de Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional de Huancavelica. Disponible en: <https://repositorio.unh.edu.pe/items/c460b4d3-638c-4345-9885-5c8772268735/full>
- [11] Nolasco Carbajal, G. (2020). *Goma de tara (Caesalpinia Spinosa) y su efecto en los procesos de coagulación-floculación en el tratamiento de las aguas del río Chumbao, Andahuaylas – Apurímac, 2018* (Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental). Universidad Tecnológica de los Andes. Disponible en: <https://repositorio.utea.edu.pe/server/api/core/bitstreams/899142fe-3d08-41c3-937e-a3d7928f9746/content>
- [12] Díaz Aliaga, S., & Tafur Izquierdo, V. I. (2020). *Análisis de la eficiencia de mucílago y almidones naturales como coagulantes – floculantes en el tratamiento de agua* (Tesis de Ingeniería Ambiental). Universidad Privada del Norte. Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/24870/D%20C3%A Daz%20Aliaga.%20Stuart%20-%20Tafur%20Izquierdo.%20Victoria%20Isabel.pdf?sequence=1>
- [13] Benjumea-Hoyos, C. A., Toro Martínez, M., & Luna Marin, V. (2021). *Evaluación de la eficiencia de extractos naturales en el proceso de coagulación floculación de aguas crudas, con fines de potabilización*. Revista Bionatura, 6(2). Disponible en: https://revistabionatura.com/files/2021.06.02.17.pdf?utm_source
- [14] Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. M., & Ramos-Pacheco, B. S. (2018). *Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua residual artificial*. Universidad Nacional José María Arguedas. Disponible en: https://repositorio.unajma.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14168/739/David_Art%20C3%ADculo_2018.pdf?sequence=1&utm_source
- [15] Estela Sangay, S. L. (2021). *Eficiencia de floculantes naturales con cáscara de maracuyá (Passiflora edulis) y maní (Arachis hypogaea) en la biosorción de plomo y zinc en muestras sintéticas* (Tesis de Ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Federico Villarreal. Disponible en: <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/4838>
- [16] Gonzales Rosales, B. M. (2019). *Eficiencia de los coagulantes naturales en la clarificación-potabilización de agua para uso alternativo en zonas rurales*. Universidad Científica del Sur. Disponible en: <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/778>
- [17] Fanego Hernández, S. I. (2021). *Floculantes naturales: Una alternativa para la clarificación del jugo de caña*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Disponible en: <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2021/10/articulo-4.pdf>
- [18] Alarcón Espinoza, R. D., & Espinoza Ríos, E. F. (2020). *Análisis bibliométrico sobre el uso de coagulantes y floculantes naturales para mejoramiento de la calidad del agua*. Universidad César Vallejo.

- Disponible en:
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/61482>
- [19] Riaño Méndez, F. W., & Tarazona Barajas, J. A. (2015). *Coagulantes-floculantes poliméricos de origen natural para potabilización de agua*. Universidad Industrial de Santander. Disponible en:
<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/183346ef-0020-4b42-915f-f2ee95d30683/content>
- [20] Sánchez-Romero, M. I., García-Lechuz Moya, J. M., González López, J. J., & Orta Mirad, N. (2019). *Recogida, transporte y procesamiento general de las muestras en el laboratorio de Microbiología*. Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica. Disponible en:
<https://www.elsevier.es/es-revista-enfermedades-infecciosas-microbiologia-clinica-28-articulo-recogida-transporte-procesamiento-general-muestras-S0213005X17303907>
- [21] Nath, A., Mishra, A., & Pande, P. P. (2021). *A review of natural polymeric coagulants in wastewater treatment*. ScienceDirect. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320323324>
- [22] Fuentes, L. C., Mendoza, I. A., López, A. M., Castro, M. F., & Urdaneta, C. J. (2011). *Efectividad de un coagulante extraído de Stenocereus griseus (Haw.) Buxb. en la potabilización del agua*. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia, 34(1), 64-73. Disponible en:
https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0254-07702011000100007&script=sci_arttext&utm_source
- [23] Del Castillo Sagastegui, M. J. (2022). *Diseño de biofiltro con mucílago de Caesalpinia spinosa para reducir la turbidez de las aguas superficiales del río Pollo, Otuzco, Perú 2021* (Tesis de licenciatura). Universidad Privada del Norte. Disponible en:
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/31488>
- [24] Valeriano-Mamani, J. J., & Matos-Chamorro, R. A. (2019). *Influencia de la goma de tara (Caesalpinia spinosa) como ayudante en el proceso de coagulación-floculación para la remoción de turbidez de una suspensión artificial de bentonita*. Información tecnológica, 30(5), 299-308. Disponible en:
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642019000500299
- [25] Segura Peláez, L. A. (2023). *Aloe vera y Caesalpinia spinosa para la remoción de turbidez en aguas residuales del sector azucarero* (Tesis de licenciatura). Universidad Privada del Norte. Disponible en:
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/33898>
- [26] Nolasco Carbajal, G. (2020). *Goma de tara (Caesalpinia spinosa) y su efecto en los procesos de coagulación-floculación en el tratamiento de las aguas del río Chumbao, Andahuaylas – Apurímac, 2018* (Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental). Universidad Tecnológica de los Andes. Disponible en:
<https://repositorio.utea.edu.pe/server/api/core/bitstreams/899142fe-3d08-41c3-937e-a3d7928f9746/content>