

La harina de haba cruda (*Vicia faba L.*) como agente coagulante y floculante natural para remover la turbiedad del agua

Raw broad bean (*Vicia faba L.*) flour as a natural coagulant and flocculant agent for turbidity removal in water

Recibido: 25 de abril de 2025 | Revisado: 30 de mayo de 2025 | Aceptado: 18 de junio de 2025

Alcides Castillo Peña¹
Olegario Marin Machuca²

1,2 Escuela Universitaria de Posgrado – UNFV, Lima, Perú

1 Correo: alcides.castillo@unsaac.edu.pe 2 Correo: omarin@unfv.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-4806-1107> <https://orcid.org/0000-0002-0515-5875>

<https://doi.org/10.62428/rcvp2025411954>

Abstract

Water, an essential resource for life, requires appropriate treatment to eliminate suspended particles, pathogenic microorganisms, and heavy metals, which affect human health and water quality. Turbidity, an indicator of the presence of particles, demands removal processes. This study evaluated the effectiveness of raw broad bean (*Vicia faba L.*) flour as a natural coagulant in reducing water turbidity. The research was experimental, explanatory, quantitative, and cross-sectional, manipulating independent variables such as coagulant concentration and rapid and slow mixing speeds to analyze their impact on the dependent variable, turbidity. Six tests were conducted using water from the Tenerías River in Cusco, applying a 1% solution of broad bean flour. The results showed a turbidity reduction greater than 98% in samples with initial values ranging from 281 to 455 NTU, and over 92% in waters with turbidity between 88.2 and 114 NTU, demonstrating the high effectiveness of the coagulant. Moreover, no significant changes in pH and electrical conductivity were observed, indicating that the treatment does not significantly alter these properties. Statistical analysis determined that the quadratic model is the most suitable for estimating the optimal dosage, with correlation and determination coefficients above 0.90 and 90%, respectively, and a p-value lower than 0.05, confirming the significance of the results. In conclusion, raw broad bean flour represents a renewable, biodegradable, and effective alternative to aluminum sulfate in water treatment processes, promoting the sustainability and safety of water resources.

Keywords: Turbid water, coagulation, flocculation, reverse coagulation, optimal coagulant dosage, raw bean flour solution.

Resumen

El agua, recurso esencial para la vida, requiere tratamientos adecuados para eliminar partículas suspendidas, microorganismos patógenos y metales pesados, que afectan la salud humana y la calidad del agua. La turbiedad, indicador de partículas presentes, demanda procesos de remoción. Este estudio, evaluó la eficacia de la harina de haba cruda (*Vicia faba L.*) como coagulante natural en la reducción de turbiedad del agua. La investigación, es de carácter experimental, explicativo, cuantitativo y transversal, manipuló variables independientes como la concentración del coagulante y las velocidades de mezcla rápida y lenta, para analizar su impacto en la variable dependiente, la turbiedad. Se realizaron seis pruebas en agua del río Tenerías, en Cusco, usando una solución al 1% de harina de haba. Los resultados mostraron una reducción de turbiedad superior al 98 % en muestras con valores iniciales de 281 a 455 NTU, y más del 92 % en aguas con turbiedades de 88,2 a 114 NTU, evidenciando alta efectividad del coagulante. Además, no se observaron cambios significativos del pH y conductividad eléctrica, indicando que el tratamiento no altera significativamente estas propiedades. El análisis estadístico, determinó que el modelo cuadrático es el más adecuado para estimar la dosis óptima, con coeficientes de correlación y determinación superiores a 0.90 y 90 %, respectivamente, y un valor de p menor a 0.05, confirmando la significancia de los resultados. En conclusión, la harina de haba cruda, representa una alternativa renovable, biodegradable y eficaz frente al sulfato de aluminio en procesos de potabilización, promoviendo la sostenibilidad y seguridad del recurso hídrico.

Palabras clave: Agua turbia, coagulación, floculación, coagulación inversa, dosis óptima de coagulante, solución de harina de haba cruda.



Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Introducción

El notable y rápido crecimiento de la población ha generado un aumento significativo en la demanda de agua tratada y con ello, el uso intensivo del sulfato de aluminio como coagulante, lamentablemente con consecuencias negativas para el ambiente y la salud, al producir lodos tóxicos no biodegradables e incorporar trazas de aluminio al cuerpo del agua tratada, situación que requiere ser revertido mediante el uso de coagulantes amigables con la salud y el medio ambiente, como los coagulantes naturales.

En el sur de Brasil, se realizaron pruebas en una planta de tratamiento de agua cruda, utilizando dos polímeros naturales a base de taninos, en comparación con el sulfato de aluminio. Los resultados indican, que es viable reemplazar el coagulante metálico por estos polímeros naturales, garantizando la eficacia del tratamiento y promoviendo la protección del medio ambiente y la salud pública (Oliveira et al., 2021).

El proceso de coagulación y floculación es fundamental para la clarificación del agua; sin embargo, su efectividad puede verse afectada por la dosificación del coagulante y los cambios en los parámetros fisicoquímicos del agua en tiempo real (Barajas y León, 2015). Los coagulantes y floculantes naturales representan una alternativa sostenible, con menores efectos secundarios en la producción de agua potable, lo que contribuye a la salud ambiental y asegura la calidad del agua que consumimos (Bouaidi et al., 2022). Los estudios sobre la coagulación y floculación de aguas residuales son especialmente valiosos en la industria textil, donde pueden implementarse prácticas que mejoren la sostenibilidad ambiental (Cabrera et al., 2020).

Entre los coagulantes naturales, la *Moringa oleífera*, un árbol originario del norte de la India, destaca como una opción eficaz para el tratamiento de aguas turbias, lo que podría fomentar prácticas más sostenibles en la gestión del agua (Ferreira et al., 2018). Aunque coagulantes como el sulfato de aluminio (Al_2SO_4) tienen una alta eficiencia en la remoción de la turbiedad, factores como el pH y la temperatura también son parámetros relevantes. El cloruro férrico (FeCl_3), también es ampliamente utilizado como coagulante en el tratamiento de aguas residuales, con efectiva reducción de la turbiedad, color y contaminantes. En este contexto, la coagulación y floculación son esenciales para la producción de agua potable de calidad, contribuyendo así a la salud pública y a la protección del medio ambiente (Bratby, 2016). Se han comparado diversos coagulantes en el tratamiento de agua, incluyendo el sulfato de aluminio y coagulantes naturales (Talib y Musawi, 2021). Se ha observado que los productos naturales presentan propiedades biocoagulantes y generan lodos biodegradables, siendo el marango (*Moringa oleífera*) una opción prometedora para el tratamiento de agua, lo que puede contribuir a la sostenibilidad y a la salud pública en comunidades donde el acceso a agua limpia es un desafío (Taiwo et al., 2020). Además, el uso del extracto de moringa como solución ecológica para el tratamiento de efluentes industriales es viable y fomenta prácticas más sostenibles en la industria alimentaria (Álvarez, 2019). La eficacia de las proteínas de Moringa como coagulante, ha sido documentada en la reducción de la turbiedad y la eliminación de cianobacterias, especialmente en aguas superficiales con altos niveles de turbiedad (Camacho et al., 2017).

La combinación de quitosano y filtración cerámica también ha demostrado ser una estrategia efectiva y sostenible para mejorar la calidad del agua potable, con un impacto positivo en la salud pública, especialmente en áreas con acceso limitado a agua limpia (Abebe et al., 2016). Taiwo et al. (2020) evaluaron la eficacia de una proteína coagulante extraída de semillas de Moringa oleífera en el tratamiento del agua del embalse de Opa en Ile-Ife, Nigeria.

Por su parte, Álvarez (2019) utilizó el extracto de *Moringa oleífera* para remover la turbiedad del efluente líquido de una industria alimentaria dedicada a la producción de néctar de maracuyá. Para medir la turbiedad del agua (en unidades NTU) se emplea el nefelómetro o turbidímetro, que determina la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz atraviesa una muestra de agua (Baños, 2018). En aguas superficiales, se encuentran diversas partículas suspendidas de origen natural y/o antropogénico, conocidas como coloides, que, debido a su carga eléctrica negativa, permanecen estables por repulsión electrostática, impidiendo su aglomeración y sedimentación (Pérez y Urrea, 2020). Es importante señalar que actualmente hay un creciente número de científicos investigando alternativas más sostenibles y menos tóxicas para minimizar el impacto ambiental (Taiwo et al. 2020). En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo determinar en qué medida la harina de haba (*Vicia faba L.*), como coagulante y floculante natural, puede remover significativamente el nivel de turbiedad del agua.

Materiales y métodos

La investigación es experimental, explicativa, cuantitativa y transversal, acorde a su naturaleza y estado del arte. Se manipularon variables independientes (concentración, dosis del coagulante y velocidades de mezclado) para medir su impacto en la turbiedad, la variable dependiente. La población observada, fueron las marchas de coagulación/floculación en tres submuestras, con una réplica cada una.

Procedimientos

1. Selección de haba (*Vicia faba* L.) INIA 409 “Munay Angélica”, en el mercado de Vino Canchón, distrito de San Jerónimo -Cusco.
2. Preparación de harina de haba cruda y tostada, con pelado mecánico, molienda y clasificación utilizando un cedazo provisto de Ro-Tap con malla de 120 mesh (125 μ m).
3. Análisis fisicoquímico del agua cruda (turbiedad, pH y conductividad eléctrica).
4. Prueba rápida cualitativa de coagulación/floculación. En dos vasos precipitado con agua cruda, se añadió a un vaso harina de haba cruda y a la otra harina de haba tostada. Se agitaron ambos enérgicamente con una espátula y luego se dejó en reposo. En el vaso con harina cruda se formaron flóculos y se clarificó el agua, mientras que en el vaso con harina de haba tostada prácticamente no hubo actividad coagulante. Se descartó como coagulante la harina de haba tostada.
5. Preparación de la solución coagulante/floculante con harina de haba cruda y agua destilada al 1% p/v (1 gramo de harina de haba cruda disuelto en 100 mililitros de solución).
6. Preparación de la solución coagulante/floculante, utilizando 10 g de harina de haba cruda y agua destilada en vaso precipitado de 1000 mL con agitación hasta su homogenización.
7. Carga de las 6 jarras del equipo con agua turbia del río Tenerías (Cusco).
8. Adición de solución coagulante/floculante en volúmenes escalonados a las jarras cargadas con agua cruda.
9. Mezcla rápida o coagulación: agitación para homogenizar la distribución de coagulante y formar microflóculos.
10. Mezcla lenta o floculación: aglomeración de micro flóculos en macroflóculos.
11. Sedimentación: reposo de las jarras para precipitación de flóculos por gravedad.
12. Medición inmediata de la turbiedad final, pH y conductividad eléctrica, registrando los datos en la tabla de resultados.

Resultados

El agua turbia, muestreada en los dos periodos de precipitación anual de 2024 del río Tenerías (río Pumamarcca), distrito de San Sebastián, Cusco, fue recolectada utilizando baldes. Inmediatamente, se evaluaron sus parámetros físico-químicos como turbiedad, pH, conductividad eléctrica y temperatura, cuyos resultados constituyen los datos de partida, las que se consignaron en tablas como la que se muestra:

Tabla 1

Datos iniciales y registro de resultados de la prueba de Jarras

Variables / Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbiedad inicial, τ (NTU)	436	436	436	436	436	436
pH inicial	8,23	8,23	8,23	8,23	8,23	8,23
Conductividad inicial (μ S/cm)	4800	4800	4800	4800	4800	4800
Dosis coagulante (C, mg/L)						
Volumen coagulante (mL)						
Mezcla rápida (rpm)						
Tiempo mezcla rápida (s)						
Mezcla lenta (rpm)						
Tiempo mezcla lenta (min)						
Tiempo sedimentación (min)						
Turbiedad final (τ , NTU)						
pH (final)						
Conductividad eléctrica final (μ S/cm)						

Nota. En la Tabla 1, se muestran las mediciones iniciales de las propiedades fisicoquímicas del agua cruda, al que se fueron añadiendo los resultados de laboratorio.

El muestreo, planificado según las directrices de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. [EPA] y la Organización Mundial de la Salud [OMS], se realizó en un único punto del río Tenerías (Pumamarcca), siguiendo un enfoque estacional para asegurar la validez y calidad de los resultados.

Tabla 2

Análisis estadístico de los datos obtenidos en la primera prueba de jarras

Variables / Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbidez inicial, τ (NTU)	436	436	436	436	436	436
pH inicial	8,23	8,23	8,23	8,23	8,23	8,23
Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4800	4800	4800	4800	4800	4800
Dosis coagulante (C, mg/L)	10	20	30	40	50	60
Volumen coagulante (mL)	1	2	3	4	5	6
Mezcla rápida (rpm)	150	150	150	150	150	150
Tiempo mezcla rápida (s)	10	10	10	10	10	10
Mezcla lenta (rpm)	20	20	20	20	20	20
Tiempo mezcla lenta (min)	20	20	20	20	20	20
Tiempo sedimentación (min)	30	30	30	30	30	30
Turbidez final (τ , NTU)	13,65	11,58	8,79	8,86	7,45	6,96
pH (final)	8,21	8,32	8,36	8,39	8,40	8,40
Conductividad eléctrica final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4800	4780	4797	4802	4800	4798

La data experimental, se ajustó un modelo exponencial del tipo logístico, útil para modelar procesos biológicos y ambientales, como la reducción de la turbiedad del agua. Este ajuste minimiza el error entre la función y los datos empíricos, mejorando la representación del proceso de coagulación/floculación. La dependencia de la turbiedad final, $\hat{\tau}$ (NTU) de la dosis del coagulante, C (mg/L), según su comportamiento descendente tiene la forma:

$$\hat{\tau} = A \times e^{-k \times C} + \delta$$

La ecuación describe la reducción de la turbiedad en función de la concentración del coagulante, con un valor mínimo (δ) que no puede eliminarse. Los parámetros involucrados en la ecuación representan la turbiedad del agua ($\hat{\tau}$) en un momento dado; que es la variable dependiente que se modela en función de la concentración del coagulante (C , mg/L).

A: Valor máximo de la turbiedad (τ), cuando la concentración del coagulante (C) tiende a cero.

e: Base del logaritmo natural, modela el decaimiento de la turbiedad.

k: Constante que mide la velocidad de reducción de la turbiedad

C: Concentración del coagulante natural.

δ : Nivel residual de turbiedad tras aplicar una concentración adecuada de coagulante.

Modelo descendente mejorado

$$\hat{\tau} = A \times e^{-k \times C} + \delta$$

Linealizando logarítmicamente la función de transferencia:

$$\ln(\hat{\tau} - \delta) = \ln A - k \times C$$

Primero, se determina el factor asintótico de turbiedad (δ), procediendo como sigue: Se toman tres valores de la variable independiente (C) de la tabla de resultados y los valores correspondientes de la variable dependiente (τ). De preferencia, se toma el primer valor (C_1) y el último (C_2) y el valor intermedio (C_3). El valor intermedio C_3 , es la media aritmética entre el primero y el último de los valores independientes. Como para el valor intermedio de la variable independiente, no hay el valor correspondiente de la variable dependiente en la tabla de resultados, este es calculado interpolando. Con el τ_3 calculado, se utiliza la siguiente ecuación para calcular δ :

$$\delta = \frac{\tau_1 \times \tau_2 - \tau_3^2}{\tau_1 + \tau_2 - 2\tau_3}$$

La data disponible y la calculada es la siguiente:

- Primer valor de: $C_1 = 10$ mg/L, le corresponde: $\tau_1 = 13,65$ NTU
- Último valor de : $C_2 = 60$ mg/L, le corresponde: $\tau_2 = 6,96$ NTU
- Valor intermedio de C_3 : $\frac{10 + 60}{2} = 35$ mg/L
- Como este valor, no se encuentra en la tabla de resultados; se interpola, determinando un valor de $\tau_3 = 8,795$ NTU

Ahora, reemplazamos en la fórmula:

$$\delta = \frac{13,65 \times 6,96 - 8,795^2}{13,65 + 6,96 - 2(8,795)} = 5,845 \text{ NTU}$$

- Este valor se incorpora al modelo objetivo o función de transferencia:

$$\hat{\tau} = A \times e^{-k \times C} + 5,845$$

- Para calcular los valores de los parametros A y k, se linealiza la ecuacion y se aplica la regresión lineal simple:

$$\ln(\hat{\tau} - 5,845) = \ln A - k * C$$

- El modelo logístico resultante es la siguiente:

$$\hat{\tau} = 11,9351 \times e^{-0,0395 \times C} + 5,845$$

El coeficiente de correlación de Pearson para este modelo es $R = -0,9978$ que significa una fuerte y negativa relación entre las dos variables y el coeficiente de determinación $R^2 * 100 = 99,56\%$, que indica la proporción de la variabilidad de la variable dependiente que se puede explicar por la variabilidad en la variable independiente, ambos estadísticos confirman la validez del modelo matemático seleccionado.

Análisis estadístico de los datos obtenidos en la segunda prueba de jarras

Con la información producida y con el propósito de optimizar el resultado, nuevamente se procede a un ajuste con un modelo exponencial, utilizando el modelo logístico que ayuda a minimizar el error entre la función y los datos empíricos, buscando una mejora en la representación del proceso de coagulación/floculación. Se utiliza para este fin, la ecuación de ajuste logístico mejorado.

Modelo descendente mejorado

$$\hat{\tau} = Ae^{-k \times C} + \delta$$

Se procede de la misma forma que para la primera prueba de jarras:

- Se linealiza la ecuación exponencial

$$\ln(\hat{\tau} - \delta) = \ln A - k * C$$

- Para calcular el valor del coeficiente asintótico (δ), se procede a calcular la media aritmética de la dosis del coagulante (C) y por interpolación se estima el valor medio de la turbiedad (τ)

$$\delta = \frac{\tau_1 \times \tau_2 - \tau_3^2}{\tau_1 + \tau_2 - 2\tau_3} = \frac{15,41 \times 9,73 - 12,34^2}{15,41 + 9,73 - 2 \times 12,34} = -5,08 \text{ NTU}$$

- Teniendo el valor de delta, la ecuación exponencial queda así:

$$\hat{\tau} = Ae^{-k.C} - 5,08$$

Y linealizando logarítmicamente la ecuación y aplicando el método de los mínimos cuadrados (MMC), se calculan los valores de las constantes A y k, quedando definida el modelo logístico.

$$\hat{\tau} = 22,01e^{-0,006574 \cdot C} - 5,08$$

Tabla 3

Estimación de turbiedad final de la primera y segunda pruebas con el modelo logístico

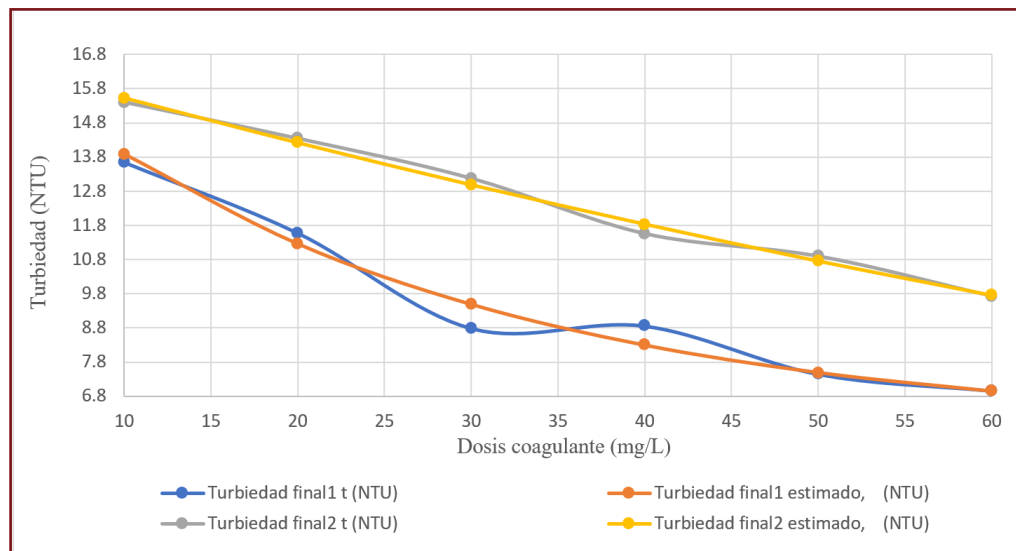
Dosis coagulante C (mg/L)	Turbiedad final ¹ τ (NTU)	Turbiedad final ¹ estimado τ (NTU)	Turbiedad final ² τ (NTU)	Turbiedad final ² estimado τ (NTU)
10	13,65	13,886	15,41	15,53
20	11,58	11,262	14,35	14,22
30	8,79	9,495	13,18	12,99
40	8,86	8,304	11,56	11,84
50	7,45	7,502	10,9	10,76
60	6,96	6,961	9,73	9,76

Nota. 1: Turbiedad experimental de la primera prueba (τ); 1: Turbiedad estimada de la primera prueba ($\hat{\tau}$)
2: Turbiedad experimental de la segunda prueba (τ); 2: Turbiedad estimada de la segunda prueba ($\hat{\tau}$)

La Tabla 3, muestra los datos de turbiedad final medida y turbiedad final estimada para la primera y segunda pruebas experimentales. El resultado muestra una notable coincidencia entre los valores reales y estimados de la turbiedad, que respalda la validez del modelo propuesto. Se observó una degradación de la turbiedad de 98,40% y 97,86% para la primera y segunda prueba de jarras respectivamente, para una dosis de coagulante del 60 mg/L.

Figura 1

Remoción de la turbiedad vs dosis de coagulante



La Figura 1, muestra una evidente proximidad entre los resultados medidos en laboratorio y los estimados con el modelo logístico ajustado.

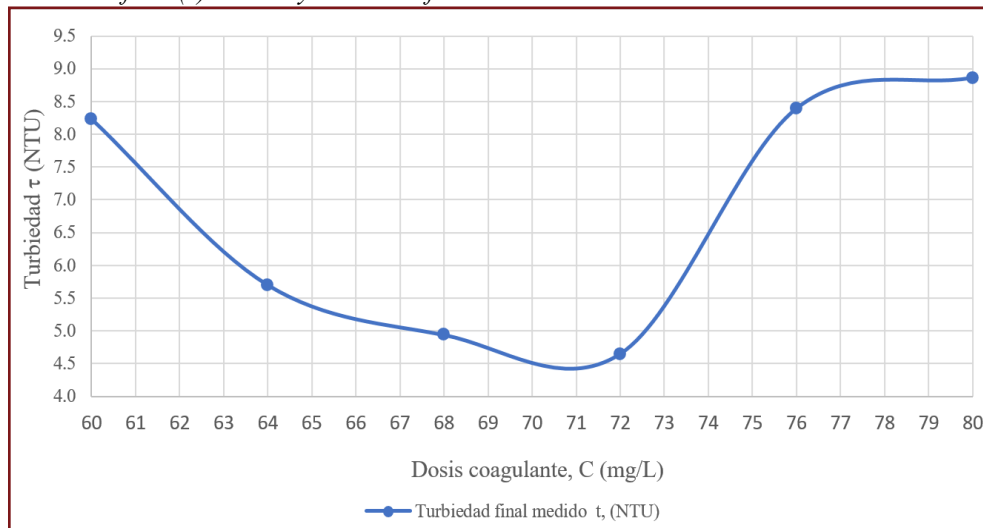
En las dos pruebas evaluadas, no se alcanza la máxima degradación ni se identifica la dosis óptima del coagulante, por lo que procedemos a modificar la dosis del coagulante.

Análisis estadístico de los datos obtenidos en la tercera prueba de jarras

Al analizar los datos de la tercera prueba, se observa que la correlación entre la concentración del coagulante (C mg/L) y la turbiedad (τ NTU) presenta un punto de inflexión en la degradación de la turbiedad, formando una curva cóncava hacia arriba con un único mínimo.

Figura 2

Turbiedad final (τ) medido y turbiedad final estimado



Esto sugiere que podría ajustarse a un modelo cuadrático, de la forma:

$$\hat{\tau} = DC^2 + BC + A, \text{ donde } D > 0, \text{ para que la curva sea cóncava hacia arriba.}$$

Reescribimos la ecuación de modelamiento cuadrático:

$$\hat{\tau} = A + B * C + D * C^2 \text{ Donde:}$$

- A: Representa la turbiedad inicial (NTU) antes de añadir el coagulante ($C = 0$ mg/L).
- B: Coeficiente que muestra cómo varía linealmente la turbiedad con la concentración del coagulante (C , mg/L). Un valor negativo de B, significa mayor efectividad del proceso al reducir la turbiedad; si es positivo, la turbidez aumenta, disminuyendo la eficiencia.
- D: Representa el efecto cuadrático de la concentración de coagulante (C , mg/L) sobre la turbidez ($\hat{\tau}$ NTU). Un valor positivo de D implica una relación cóncava hacia arriba, con un punto crítico donde la turbiedad es mínima, seguido de un aumento por coagulación inversa.

Con el ajuste necesario sobre la ecuación, se determinaron los valores de los parámetros:

$$A = 180,08; B = -5,0782 \text{ y } D = 0,0368$$

Quedando la ecuación cuadrática definida así:

$$\hat{\tau} = 180,08 - 5,0782 * C + 0,0368 * C^2$$

Para hallar la concentración crítica de la dosis del coagulante (C_c), se deriva la expresión anterior y se iguala a cero;

$$\frac{d\hat{\tau}}{dC} = -5,0782 + 2 * 0,0368 * C = 0, \text{ entonces:}$$

$$C = 68,9973 \cong 69 \text{ mg/L}$$

Que corresponde a la concentración de coagulante para la máxima degradación de la turbiedad o dosis óptima, a partir de la cual se inicia la coagulación inversa. Con esta dosis de coagulante, se estima la turbiedad: $\hat{\tau} = 4,8889$ NTU, turbiedad final remanente estimada para la dosis optima de coagulante; con valor muy próximo al resultado obtenido en laboratorio.

Análisis estadístico de los datos obtenidos en la cuarta prueba de jarras

Observando la data producida en esta prueba, sobre el comportamiento de la Turbiedad final, τ (NTU) frente a la dosis de coagulante, C (mg/L), se ve que la curva es cóncava hacia arriba y con un único mínimo, similar a la de la prueba tres, por tanto, para el ajuste se utiliza la ecuación cuadrática:

$$\hat{\tau} = A + B * C + D * C^2$$

Realizando el ajuste necesario, se llega a la expresión:

$$\hat{\tau} = 180,08 - 5,0782 \times C + 0,0368 \times C^2$$

Para hallar la concentración crítica de dosis del coagulante (C_C), se deriva la expresión anterior y se iguala a cero;

$$\frac{d\tau}{dC} = -5,0782 + 2(0,0368) \times C \quad \frac{d\tau}{dC} = 0$$

De tal manera que: $\frac{d\tau}{dC} = -5,0782 + 2(0,0368) \times C = 0$

De donde: $C_C = 68,9973 \cong 69$ mg/L

Con esta información se estima la turbiedad remanente

$$\tau_{(C_C=69)} = 8,889 \text{ NTU}$$

Tabla 4

Estimación de la turbiedad final de la tercera y cuarta pruebas con el modelo logístico

Dosis coagulante C (mg/L)	Turbiedad final ³ medido τ (NTU)	Turbiedad final ³ estimado $\hat{\tau}$ (NTU)	Turbiedad final ⁴ medido τ (NTU)	Turbiedad final ⁴ Estimado $\hat{\tau}$ (NTU)
60	8,23	7,868	9,83	9,85
64	5,7	5,808	7,8	7,67
68	4,94	4,926	6,92	6,23
72	4,65	5,221	5,38	6,72
76	8,39	6,694	9,44	7,95
80	8,86	9,344	9,82	10,32

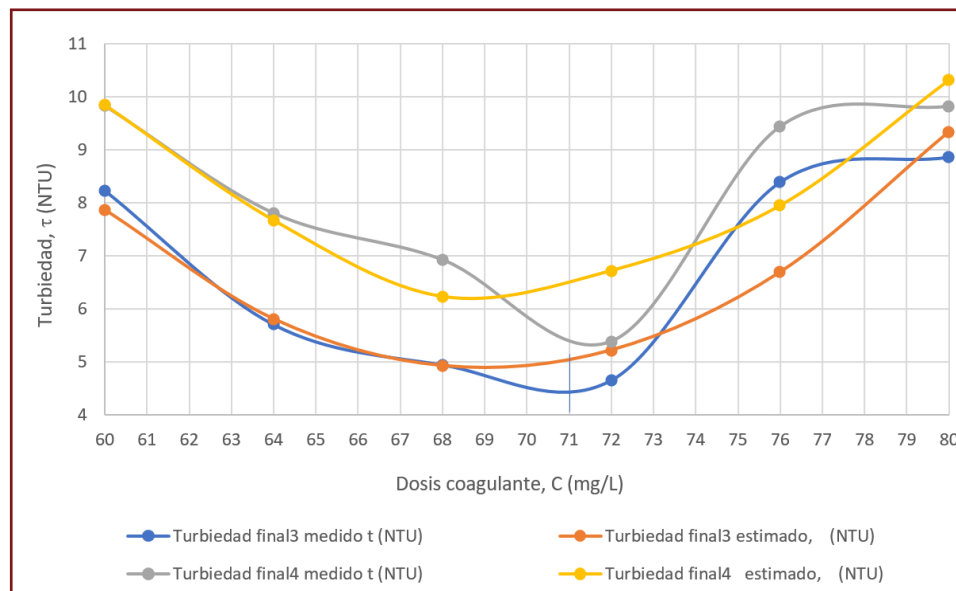
Nota. 3: Turbidez experimental de la tercera prueba (τ) 3: Turbidez estimada de la tercera prueba ($\hat{\tau}$)

4: Turbidez experimental de la cuarta prueba (τ) 4: Turbidez estimada de la cuarta prueba ($\hat{\tau}$)

La Tabla 4, evidencia la proximidad entre los resultados experimentales y estimados de la turbiedad final en la tercera y cuarta prueba; confirmando la validez del modelo utilizado.

Ambas pruebas, presentan un punto de quiebre en la reducción de la turbidez a una concentración de coagulante de 72 mg/L (Tabla 3), a partir del cual, comienza la coagulación inversa, lo que indica que se alcanzó la máxima reducción de la turbiedad y la dosis óptima del coagulante. La disminución de la turbiedad es del 98,89% y 98,09% para la tercera y cuarta pruebas de jarra.

Figura 3
Remoción de la turbiedad vs dosis de coagulante

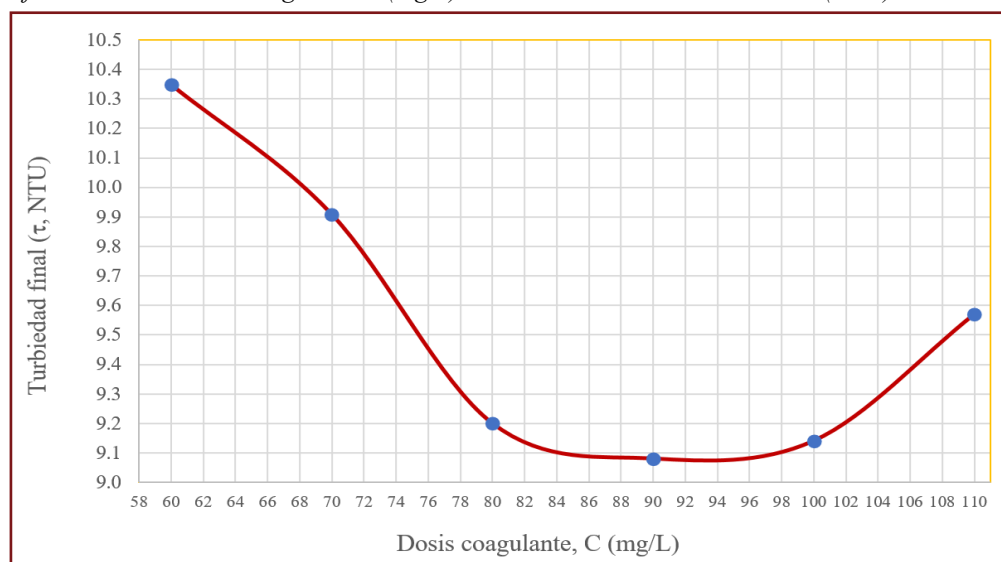


La Figura 3, además de mostrar la proximidad entre las curva empírica y estimada, muestra el punto de quiebre en la reducción de la turbiedad, para aproximadamente una dosis de coagulante de 71 mg/L, a partir del cual se produce la coagulación inversa. Este punto corresponde a la máxima reducción de la turbiedad y la dosis óptima del coagulante.

Análisis estadístico de los datos obtenidos en la quinta prueba de jarras

En base a la medición de la Turbiedad final, τ (NTU) y la dosis del coagulante, C (mg/L) aplicado, resulta una curva:

Figura 4
Efecto de la dosis del coagulante C (mg/L) en la reducción de la turbiedad τ (NTU)



De la figura 4, deducimos que el proceso tiene un comportamiento cóncavo hacia arriba, con único mínimo que podría ajustarse a un modelo cuadrático de la forma:

$$\tau = A + B \times C + D \times C^2$$

Realizando el ajuste necesario, se llega a la expresión:

$$\tau = 20,278 - 0,24364 \times C + 0,001327 \times C^2$$

Para hallar la concentración crítica de dosis del coagulante (C_C), se deriva la expresión anterior y se iguala a cero;

$$\frac{d\tau}{dC} = -0,24364 + 2(0,001327) \times C = 0$$

De modo que: $C_C = 91,8159$ mg/L, dosis crítica del coagulante.

Con este valor, se estima la turbiedad final remanente mínima en el punto crítico:

$$\tau_{(C_C=91,8159)} = 9,0948 \text{ NTU}, \text{ prácticamente igual al medido que fue de } 9,08 \text{ NTU}.$$

Análisis estadístico de los datos obtenidos en la sexta prueba de jarras

Como en el caso anterior, el resultado de la acción del coagulante frente a la turbiedad es similar, por lo que se aplica la misma ecuación cuadrática para su evaluación estadística:

$$\tau = A + B \times C + D \times C^2$$

Realizando el ajuste pertinente y se llega a la expresión:

$$\tau = 26,5486 - 0,3970 \times C + 0,002168 \times C^2$$

Para hallar la concentración crítica de la dosis del coagulante (C_C), se deriva la expresión anterior y se iguala a cero;

$$\frac{d\tau}{dC} = -0,3970 + 2(0,002168) \times C = 0$$

De donde $C_C = 91,5651$ mg/L, dosis crítica, para la máxima remoción de la turbiedad.

Con esta información, se estima la turbiedad remanente: $\tau_{(C_C=91,5691)} = 8,3741 \text{ NTU}$

Con la información producida, se estima la turbidez final para la quinta y sexta pruebas, utilizando las ecuaciones cuadráticas.

Tabla 5

Estimación de la turbiedad final de la tercera y cuarta pruebas con el modelo logístico

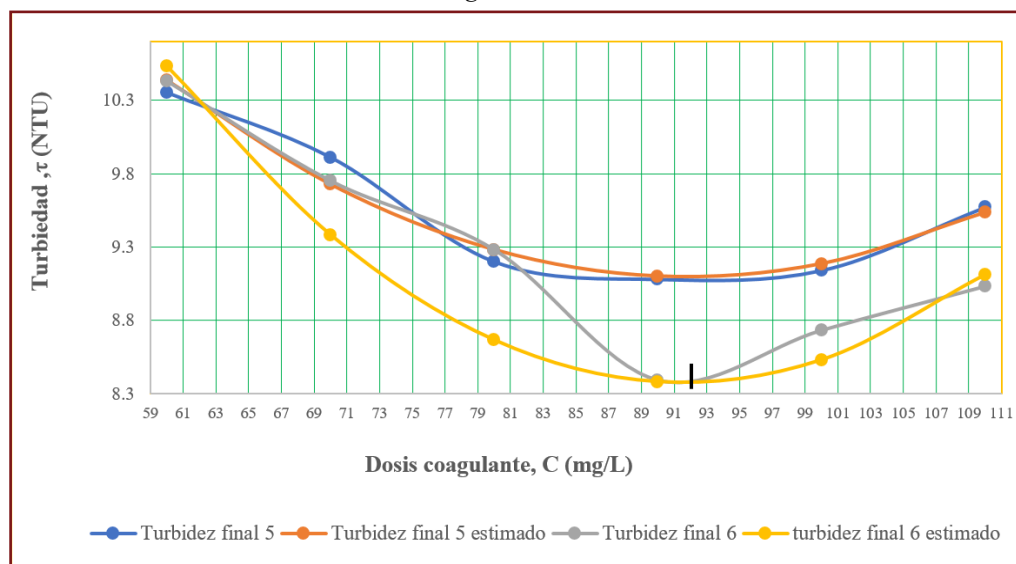
Dosis coagulante (mg/L)	Turbidez final ⁵ (τ , NTU)	Turbiedad final estimada ⁵ ($\hat{\tau}$, NTU)	Turbiedad final ⁶ (τ , NTU)	Turbiedad final estimada ⁶ , ($\hat{\tau}$ NTU)
60	10,35	10,4368	10,43	10,5334
70	9,91	9,7255	9,75	9,3818
80	9,2	9,2796	9,28	8,6638
90	9,08	9,0991	8,39	8,3794
100	9,14	9,184	8,73	8,5286
110	9,57	9,5343	9,03	9,1114

Nota. 5: Turbiedad experimental de la quinta prueba (τ) 5: Turbiedad estimada de la quinta prueba ($\hat{\tau}$)

6: Turbiedad experimental de la sexta prueba (τ) 6: Turbiedad estimada de la sexta prueba ($\hat{\tau}$)

La Tabla 5, muestra nuevamente una alta cercanía entre los datos empíricos de la turbiedad final y la turbiedad final estimada, evidenciando que el modelo utilizado es adecuado. La remoción de la turbiedad es de 89,71% y 92,64% para la quinta y sexta pruebas respectivamente.

Figura 5
Remoción de la turbiedad VS Dosis de coagulante



La Figura 5, muestra un alto nivel de coincidencia entre las curvas de la data empírica y la data de la simulación, que valida el modelo seleccionado. Además, se puede inferir visualmente, que la dosis óptima aproximada del coagulante es 92 mg/L (Figura 3) para la máxima reducción de la turbiedad, punto a partir del cual se inicia la coagulación inversa.

Tabla 6
Análisis del efecto de la remoción de la turbiedad en el pH y conductividad eléctrica

Variables \ Jarras	1	2	3	4	5	6
Turbidez inicial (τ , NTU)	114	114	114	114	114	114
pH (inicial)	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09
Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3550	3550	3550	3550	3550	3550
Turbidez final (τ , NTU)	10,43	9,75	9,28	8,39	8,73	9,03
pH (final)	8,04	8,11	8,13	8,14	8,15	8,15
Conductividad final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3450	3440	3470	3430	3480	3360

La Tabla 6, muestra con claridad el efecto de la remoción de la turbiedad en el pH, que luego de una ligera disminución de hasta 0,05 unidades en la primera jarra, este aumenta hasta en 0,06 unidades en las jarras 5 y 6, variación que se encuentra dentro de lo que se considera insignificante, que no afecta la calidad del agua ni es riesgo para la salud ni el medio ambiente.

Algo similar ocurre con la conductividad eléctrica, pues mediante una evaluación de promedio aritmético de su variación, se concluye que se encuentra dentro de lo insignificante, de manera similar al pH.

Discusión

Para el proceso de potabilización del agua, se emplean métodos fisicoquímicos como la coagulación, floculación y sedimentación, conforme a lo señalado por Chulluncuy (2011) y Cabrera et al. (2020). En un contexto de creciente utilización del sulfato de aluminio como coagulante en la potabilización del agua (NTP 311.095), se ha observado un aumento correlativo en la producción de lodos metálicos tóxicos, lo que repercute negativamente en el medio ambiente y en la salud pública, significando al mismo tiempo un incremento en los costos asociados al tratamiento del agua, tal como señalan Oliveira et al., (2021). En este sentido, el presente estudio aporta evidencia adicional al campo, mostrando que la solución de harina de haba (*Vicia faba L.*) puede reducir la turbiedad del agua entre un 89% y más del 98% al emplear dosis de 60 a 92 mg/L.

Los resultados obtenidos en este estudio, indican que la harina de haba (*Vicia faba L.*) cruda, es efectiva en la reducción de la turbiedad del agua, además de no generar lodos tóxicos ni alterar significativamente el pH o

la conductividad eléctrica del agua tratada. Estos resultados, son consistentes con las conclusiones de Bouaidi et al. (2022), quienes subrayan la relevancia de los coagulantes naturales en la mejora de la calidad del agua y en la minimización de impactos ambientales adversos. El uso de coagulantes naturales, se diferencian notoriamente del sulfato de aluminio, no solo porque contribuyen a la salud pública, sino también por la protección del medio ambiente, propiciando prácticas más sostenibles y eficientes, tal como han concluido Bratby (2016) y Talib y Musawi (2021). Este grado de turbiedad inicial (436 NTU) es comparable al de las aguas residuales generadas por la industria textil, tal como se señala en el estudio de Cabrera et al. (2020). Los coagulantes vegetales son una alternativa más segura, biodegradable y accesible, especialmente beneficiosa para comunidades rurales y en desarrollo, donde su uso contribuye a prácticas de tratamiento de agua más sostenibles, promoviendo la salud pública y la conservación ambiental, como lo indican Choy et al., (2014).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en las pruebas de coagulación/floculación con solución de harina de haba cruda (*Vicia faba L.*) demuestran un alto potencial coagulante y floculante. Se logró una reducción de la turbiedad del agua superior al 89% y, en algunos casos, por encima del 98%, dependiendo de la turbiedad inicial y la dosis del coagulante aplicado (60, 72 y 92 mg/L). Estos hallazgos resaltan la eficacia de la harina de haba como alternativa sostenible en el tratamiento de aguas turbias superficiales, contribuyendo a procesos de purificación con menor impacto ambiental. La preparación de la solución coagulante ha resultado sencilla y accesible, que comienza con la selección del haba seca descascarada, molida y pasada por un cedazo provisto de malla 120 mesh (125 μ m), resultando una harina con la granulometría adecuada.

El efecto de la harina de haba preparada como solución coagulante al 1% p/v, demostró una eficiencia comparable a otros coagulantes naturales como la Moringa oleífera y los polímeros de taninos. Las pruebas de jarra revelaron que para turbiedades iniciales de 419 a 455 NTU, dosis de 72 mg/L logran reducciones de la turbiedad del 98,89% y 97,86%, respectivamente. En condiciones de turbiedad más baja, se lograron reducciones de 89% hasta el 98,09% con dosis de 92 mg/L. Estos resultados permiten avizorar un futuro prometedor para los polisacáridos de la harina de haba cruda como coagulante natural alternativo al sulfato de aluminio o al cloruro férrico.

Recomendaciones

Se recomienda investigar la efectividad de la harina de haba (*Vicia faba L.*) bajo diferentes niveles de turbiedad y composiciones químicas del agua, con mayor número de réplicas; explorar la combinación de la harina de haba (*Vicia faba L.*) con otros coagulantes naturales para evaluar posibles sinergias en la reducción de la turbidez; evaluar la viabilidad económica y la efectividad de la harina de haba (*Vicia faba L.*) en sistemas de tratamiento de agua a gran escala, específicamente en Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP); investigar la efectividad de la harina de haba (*Vicia faba L.*) desengrasada como coagulante y floculante natural primario y realizar estudios comparativos sobre la efectividad coagulante/floculante de la harina de haba (*Vicia faba L.*) en relación con el sulfato de aluminio para diversas turbiedades y propiedades químicas del agua.

Referencias

- Abebe, L., Xinyu, C., & Sobsey, M. (2016). Coagulación de quitosano para mejorar la eliminación de microbios y turbidez mediante filtración cerámica de agua para el tratamiento de agua potable doméstica. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública*, 13(3), 269. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.73340>
- Álvarez, H. (2019). Extracto de moringa (*Moringa oleífera*) para la remoción de turbidez de efluentes de la producción de néctar de maracuyá [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio LaMolina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3923>
- Baños, A. (2018). *Medición de la turbidez*. Higieneambiental.com. <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/que-nos-dice-la-turbidez-sobre-la-calidad-del-agua-potable>

- Barajas, C., & León, A. (2015). *Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) en el proceso de coagulación - floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial* [Tesis de licenciatura, Universidad Santo Tomás]. Repositorio USTA. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2916/Barajasclaudia2015.pdf>
- Bouaidi, W., Libralato, G., Tazzari, Z., Enaime, G., Douma, M., Ounas, A., Yaacoubi, A., Lofrano, G., Carotenuto, M., Saviano, L., Siciliano, A., Romano, V., Guida, M., & Loudiki, M. (2022). Coagulantes de origen natural para el tratamiento de agua potable: una visión ecotoxicológica. *Investigación sobre el medio ambiente acuático*, 94(8), e10782. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36029154/>
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* (Third Edition). IWA Publishing. <https://iwaponline.com/ebooks/book/286/Coagulation-and-Flocculation-in-Water-and>
- Cabrera, X., Fleites, M., & Contreras, A. (2020). Estudio del proceso de coagulación floculación de aguas residuales de la empresa textil "Desembarco del Granma" a escala de laboratorio. *Tecnología Química*, 29(3), 64-73. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543760009.pdf>
- Camacho, F., Sousa, V., Bergamasco, R., & Teixeira, M. (2017). El uso de Moringa oleífera como coagulante natural en el tratamiento de aguas superficiales. *Chemical Engineering Journal*, 313(1), 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.031>
- Choy, S., Prasad, K., Wu, T., Raghunandan, M., & Ramanan, R. (2014). Utilización de coagulantes naturales de origen vegetal como alternativas de futuro hacia la clarificación sostenible del agua. *Journal of Environmental Sciences*, 26(11), 2178–2189. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.024>
- Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 29(029), 153-170. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2011.n029.232>
- Ferreira, V., Silva, I., Lopez, A., Ornaghi, D., Lopez, A., & Mambeli, R. (2018). Clarification of high-turbidity waters: a comparison of Moringa oleifera and virgin and recovered aluminum sulfate-based coagulants. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 4551–4562. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00397-2>
- Instituto Nacional de Calidad [INCAL]. (2021). *Calidad de agua. Agua potable. Requisitos (NTP 214.003)*. <https://es.scribd.com/document/717978153/32981-NTP-214-003-revisada-el-2021-CALIDAD-AGUA-POTABLE-2>
- Instituto Nacional de Calidad [INCAL]. (s.f.). *Sulfato de aluminio para tratamiento de agua (NTP 311.095)*. <https://es.scribd.com/document/381656404/Ntp-311-095-1999-Sulfato-de-Aluminio-Tratamiento-de-Agua-de-Agua-Requititos>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA]. (2004). *INIA 409 - Munay Angélica: Nueva variedad de haba para la sierra del Perú*. <https://repositorio.inia.gob.pe/items/38bcc2c2-096d-4996-a496-0bafba4fe220>
- Oliveira, F., Teixeira, R., & Oliveira, C. (2021). Efficacy of two natural tannins-based polymers in contrast to aluminum sulfate for drinking water production. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100099>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2017). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda*. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- Pérez, F., & Urrea, M., (2020). *Abastecimiento de aguas. Universidad Politécnica de Cartagena*. https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod_resource/content/1/Tema_06_COAGULACION_Y_FLOCULACION.pdf
- Taiwo, A., Adenike, K., & Aderonke, O. (2020). Efficacy of a natural coagulant protein from Moringa oleifera (Lam)

seeds in treatment of Opa reservoir water, Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, 6(1), e03335. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03335>

Talib, A., & Musawi, N. (2021). Water Treatment With Conventional and Alternative Coagulants: A Review. (2021). *Journal of Engineering*, 27(9), 20-28. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2021.09.02>

United States Environmental Protection Agency [EPA]. (1974). *Safe Drinking Water Act (SDWA)*. <https://www.epa.gov/sdwa>