

Biopolímeros para el Tratamiento de Aguas Residuales en el Área de Influencia de la Laguna de Tragadero, Provincia de Jauja, Departamento de Junín, Perú - 2024 Biopolymers for Wastewater Treatment in the Area of Influence of the Tragadero Lagoon, Jauja Province, Junín Department, Perú - 2024.

Luis Mathuass Hidalgo-Flores^{1†} , Ana María Urbina-Arana²  y
Steve Dann Camargo-Hinostroza¹ 

¹ Universidad Continental, Facultad de Ingeniería; (L.M.H.F), (S.D.C.H.). ² Carrera de Ingeniería Ambiental; (A.M.U.A.). Av. San Carlos 1980, Urb. San Antonio. 12000 Huancayo, Junín, Perú.

† Autor para correspondencia: luismathuasshf@gmail.com

RESUMEN

La aplicación de biopolímeros en procesos de depuración de aguas residuales representa una estrategia eficaz para mitigar el impacto ambiental derivado de las descargas agrícolas y domésticas. El objetivo de esta investigación fue analizar la efectividad de los biopolímeros para el tratamiento de aguas residuales en el área de influencia de la laguna de Tragadero de la provincia de Jauja - Junín, Perú. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos como el pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales y cromo. Utilizando el método de coagulación-floculación, se administraron dosis de pectina 1.2 mL y quitosano 1.2 g en 500 mL de agua residual con agitación mecánica a 120 rpm durante tres horas, seguida de una hora de sedimentación. Se adoptó un diseño experimental para interpretar los datos fisicoquímicos del efluente antes y después de la aplicación del biopolímero. Resultado: Primer análisis fisicoquímico del agua residual de la Laguna de Tragadero pH 7.30, DBO 146.6 mg L⁻¹, DQO 75.0 mg L⁻¹, SST 51.0 mg L⁻¹, Coliformes Fecales 1.3 × 10³ NMP/100 mL, Cromo 0.147 mg L⁻¹. Segundo análisis fisicoquímico del agua residual de la Laguna de Tragadero pH: 7.50, DBO 78.0 mg L⁻¹, DQO 48.50 mg L⁻¹, SST 42.0 mg L⁻¹, Coliformes Fecales 2.4 × 10² NMP/100 mL, Cromo < 0.001 mg L⁻¹. El uso de biopolímeros para el tratamiento de las aguas residuales en el área de influencia de la laguna de Tragadero podría ser una solución eficaz para reducir la contaminación y preservar su ecosistema. Los biopolímeros presentan ventajas sobre otros métodos de tratamiento de aguas residuales, como su eficacia para remover contaminantes, su carácter biodegradable y su bajo coste. La información obtenida en este estudio servirá para las entidades ambientales, autoridades y población local en la implementación de estrategias sostenibles de tratamiento de agua residual.



Cita recomendada:

Hidalgo-Flores, L. M., Urbina-Arana, A. D., & Camargo-Hinostroza, S. (2026). Biopolímeros para el Tratamiento de Aguas Residuales en el Área de Influencia de la Laguna de Tragadero, Provincia de Jauja, Departamento de Junín, Perú - 2024. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-12. e2355. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2355>

Recibido: 12 de julio de 2025.
Aceptado: 30 de octubre de 2025.
Artículo. Volumen 44.
Enero de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Luis Hernández Adame

Editor Técnico:
Dr. Gerardo Cruz Flores

Palabras clave: depuración, quitosano, pectina.

SUMMARY

The application of biopolymers in wastewater treatment processes represents an effective strategy for mitigating the environmental impact of agricultural and domestic discharges. The objective of this research was to analyse the effectiveness of biopolymers for wastewater treatment in the area of influence of the Tragadero Lagoon, in the province of Jauja, Junín, Peru. Physicochemical parameters such as pH, biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), faecal coliforms, and chromium were evaluated. Using the coagulation-flocculation method, doses of 1.2 mL of pectin and 1.2 g of chitosan were administered to 500 mL of wastewater, with mechanical agitation at 120 rpm for three hours, followed by one hour of sedimentation. An experimental design was adopted



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

to interpret the physicochemical data of the effluent before and after the application of the biopolymers. Results: The initial physicochemical analysis of wastewater from the Tragadero Lagoon showed pH 7.30, BOD 146.6 mg L⁻¹, COD 75.0 mg L⁻¹, TSS 51.0 mg L⁻¹, faecal coliforms 1.3×10^3 NMP/100 mL, and chromium 0.147 mg L⁻¹, whereas the second physicochemical analysis showed pH 7.50, BOD 78.0 mg L⁻¹, COD 48.5 mg L⁻¹, TSS 42.0 mg L⁻¹, faecal coliforms 2.4×10^2 NMP/100 mL, and chromium < 0.001 mg L⁻¹. The use of biopolymers for wastewater treatment in the area surrounding the Tragadero Lagoon could be an effective solution for reducing pollution and preserving its ecosystem, since biopolymers have advantages over other wastewater treatment methods, such as their effectiveness in removing contaminants, their biodegradable nature, and their low cost. The information obtained in this study will be useful for environmental entities, authorities, and the local population in implementing sustainable wastewater treatment strategies.

Index words: *depuration, chitosan, pectin.*

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales contienen una gran variedad de contaminantes y pueden comprometer significativamente la calidad ambiental. Estos contaminantes representan una amenaza tangible para la salud pública, especialmente cuando las aguas son vertidas sin tratamiento previo en ríos, lagos o mares. Es imperativo implementar sistemas de tratamiento eficaces que minimicen el impacto negativo en los ecosistemas acuáticos y prevengan riesgos sanitarios, asegurando así la protección del entorno y la salud de la población (Pérez-Negrón, 2022¹).

A nivel global, se ha demostrado que los biopolímeros son efectivos como adsorbentes para eliminar contaminantes del agua, incluyendo aquellos derivados de procesos industriales, prácticas agrícolas y desechos urbanos. Materiales como la celulosa, restos óseos animales, subproductos pesqueros y carbón mineral son ampliamente reconocidos por sus propiedades de adsorción (Burillo, González y Piñón, 2019b). En particular, el quitosano ha sido evaluado como coagulante-floculante en el tratamiento de aguas residuales, mostrando potencial para la remoción de sólidos suspendidos y la reducción del uso de coagulantes inorgánicos convencionales (Labastida-Nuñez, Velasco, Pablo, González y Beltrán, 2023). Específicamente, la quitina, extraída del exoesqueleto de crustáceos, es un adsorbente notable. En el laboratorio, la quitina puede ser convertida en quitosano mediante N-desacetilación alcalina, un material con mayor capacidad de adsorción (Rodríguez-Pedroso *et al.*, 2009). El quitosano, al combinarse con compuestos como el formaldehído, puede formar una estructura reticular que facilita la captura de contaminantes acuáticos. Esta estructura polimérica, al entrar en contacto con el agua, se hincha rápidamente, creando un hidrogel que se ajusta a variaciones de temperatura y pH, y es capaz de adsorber contaminantes tanto con cargas negativas como positivas (Burillo-Montúfar, Piñón, González y Pamila, 2019a).

La laguna de Tragadero, ubicada en los distritos de Marco y Acolla, provincia de Jauja, departamento de Junín, Perú, se encuentra contaminada por las aguas residuales que se vierten a ella desde las poblaciones aledañas. Estas aguas residuales contienen una gran cantidad de materia orgánica, nutrientes, metales pesados y otros contaminantes que están afectando la calidad del agua de la laguna y poniendo en peligro su ecosistema. Esta contaminación está provocando la eutrofización de la laguna, la reducción de la biodiversidad y el deterioro del ecosistema (Mowbray, 2022).

El tratamiento de las aguas residuales es una medida necesaria para reducir la contaminación de la laguna de Tragadero. Existen diferentes métodos de tratamiento de aguas residuales, como la filtración, la sedimentación, la cloración y la oxidación biológica (Baeza, 2018).

Los biopolímeros son materiales naturales que se pueden utilizar para el tratamiento de aguas residuales. Estos materiales tienen la capacidad de adsorber, degradar o precipitar los contaminantes presentes en el agua (Nieto-Orellana y Orellana-Ulloa, 2011²). El objetivo del presente trabajo fue analizar la efectividad de los biopolímeros para el tratamiento de aguas residuales en el área de influencia de la laguna de Tragadero de la provincia de Jauja - Junín, los resultados de este estudio buscan proporcionar información útil a las entidades ambientales, autoridades y población local, para promover alternativas sostenibles de remediación.

¹ Pérez-Negrón, I. (2022). *Producción de biomasa granular aerobia rica en polihidroxialcanoatos a partir del tratamiento de aguas residuales municipales*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Universidad Autónoma Metropolitana. México. <https://doi.org/10.24275/uami.1n79h446b>

² Nieto-Orellana, C. R., & Orellana-Ulloa, V. P. (2011). *Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante*. Tesis para obtener el grado de Doctor en ciencias. Universidad Politécnica Salesiana. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1510>

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología Aplicada para la Elaboración de los Biopolímeros

Recolección y Ubicación de la muestra El muestreo del agua residual se realizó en el punto clave donde ingresa el agua residual a la Laguna de Tragadero ubicada en el distrito de Marco, provincia de Jauja, departamento de Junín (Figura 1), entre las coordenadas UTM: 440028 X 8699899 Y. Se recolectó una muestra de agua residual con un volumen de 2.5 L, obtenida de forma manual y preservada siguiendo los protocolos de conservación brindados por parte de Ambiental Laboratorio S.A.C. para que las muestras no sufrieran alguna alteración.

Análisis del Agua Residual

La muestra recolectada fue llevada al laboratorio químico, donde se midió el pH, DBO, DQO, SST, Coliformes Fecales y Cromo que se analizaron en el laboratorio, Ambiental Laboratorio S.A.C.

Extracción de los Biopolímeros

Extracción de la Pectina. La metodología utilizada se adaptó a la descrita por (Molina-Soler, 2016³), para la extracción de la pectina se han empleado las cascarás de cocona (*Solanum sessiliflorum*), manzana (*malus domestica*) y naranja (*Citrus sinensis*). En la selección y pesaje de la materia prima de 2 kg de cocona se obtuvo 228 g de cáscara, de 1kg de manzanas se aislaron 82 g de piel y finalmente de 1 kg de naranjas se recuperaron 166 g de albedo y flavedo. Estos fueron pesados por una balanza analítica AS 220.X2 – RADWAG. En el tratamiento térmico inicial las cáscaras separadas fueron sumergidas en agua a 95 °C por 15 min, con el objetivo de ablandar el tejido celular y desactivar las enzimas pectinolíticas. Posteriormente se traspasó a un recipiente con agua a una temperatura ambiente (24 °C) para detener la acción térmica y facilitar la remoción manual de la cáscara, semillas y restos de pulpa adheridos. Las muestras de cáscara fueron deshidratadas en una estufa 50 °C por 24 h (Figuras 2-5) con el fin de eliminar completamente el agua residual sin comprometer la integridad de la pectina. El material seco se sometió a molienda y posteriormente se tamizó para uniformizar el tamaño de partícula, asegurando así una materia prima homogénea y libre de contaminantes.



Figura 1. Punto de Monitoreo del área de estudio.
Figure 1. Monitoring point of the study area.

³ Molina-Soler, D. E. (2016). *Extra* Molina-Soler, D. E. (2016). *Extracción de pectina de frutos amazónicos mediante un proceso asistido por microondas*. Tesis para obtener el grado en Doctor en Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Tesis para obtener el grado en Doctor en Ciencias. Universidad Nacional de Colombia.



Figura 2. Cáscaras de cocona, naranja y manzana.

Figure 2. Cocona, orange, and apple peels.



Figura 3. Secado de las cáscaras de cocona, naranja y manzana.

Figure 3. Drying of cocona, orange and apple peels.



Figura 4. Molienda de las cáscaras de cocona, naranja y manzana.

Figure 4. Grinding of cocona, orange and apple peels.

Para poder maximizar la solubilización y liberación de pectina de la pared celular vegetal se utilizó una solución compuesta por agua potable mezclada con ácido clorhídrico (HCl) 1 M, obteniendo un pH de 2.5, puesto que en un medio ácido se hace una mejor extracción de la pectina, la solución se mezcló con las cáscaras secas y molidas, al calentar mediante un sistema abierto cerca del punto de ebullición 95.5 °C se aumenta la movilidad de las moléculas de agua y debilitan las paredes celulares, facilitando la extracción de los polisacáridos (Figuras 6-7). El tiempo prolongado de 60 min garantiza un contacto suficiente entre el solvente ácido y el material vegetal, incrementando el rendimiento de la pectina sin degradarla excesivamente.

Finalmente se filtró con una tela 100% poliéster la cual elimina el material sólido no disuelto (fibras de cáscaras) obteniéndose un extracto líquido rico en pectina, al producto filtrado se vertió alcohol etílico al 96% y se dejó reposar por 2 horas a una temperatura ambiente (Figuras 8-10). Puesto que la pectina es insoluble en etanol, al mezclar el extracto acuoso con alcohol la pectina se precipita o flota formando un gel blanco. Permitiendo así, que la pectina salga a flote, la cual se filtró nuevamente con una tela de 100% poliéster. A la pectina obtenida se realizaron 3 lavados con etanol (v/v) empleando 60 mL por cada lavado para ser purificada. En conjunto este proceso de precipitación y múltiples lavados con alcohol permite obtener una pectina de alto grado de pureza.



Figura 5. Tamizado de las cáscaras de cocona, naranja y manzana.

Figure 5. Sieving of cocona, orange and apple peels.



Figura 6. Solutio HCl para crear un medio ácido.

Figure 6. HCl solution used to create an acidic medium.



Figura 7. Contacto y reposo entre el solvente ácido y el material vegetal.

Figure 7. Contact and resting period between the acidic solvent and the plant material.

Extracción del Quitosano. Se empleó la metodología descrita por (Del Valle, 2017⁴) el biopolímero quitosano se obtuvo a partir de 2 kg de camarón (*Litopenaeus vannamei*) de los cuales solo se extrajo del exoesqueleto (Figuras 10-11). Se procedió a lavar el exoesqueleto de los camarones la cual elimina los restos de músculo, sangre y otras impurezas orgánicas adheridas al exoesqueleto reduciendo el contenido de materia orgánica no quitínica, después, se dejó escurriendo y secando en papel aluminio alrededor de 2 semanas a temperatura ambiente puesto que al descender el contenido de agua se inhibe el crecimiento microbiano y la actividad enzimática no deseada, protegiendo la quitina de degradaciones prematuras (Figuras 12-13). A lo largo de ese tiempo, se agitó continuamente para lograr que seicara de manera homogénea, además al remover periódicamente el material se va acelerando la deshidratación.

Pasado el tiempo de secado, se procedió a realizar un tratamiento alcalino suave con la finalidad de eliminar las proteínas y restos de materia orgánica aún adheridos a la quitina del exoesqueleto (Figuras 14-16). Estos fueron triturados hasta obtener un material particulado homogéneo, el cual sirvió como materia prima para la etapa de desproteínización. A continuación, se vertió en carbonato de sodio al 4 %, el producto obtenido a 40 °C y por 3 horas, las moléculas proteicas se desnaturalizan dejando una fase sólida más pura de quitina. (Figuras 17-18).



Figura 8. Proceso de filtración para eliminar las fibras de cáscaras.
Figure 8. Filtration process to remove peel fibers.

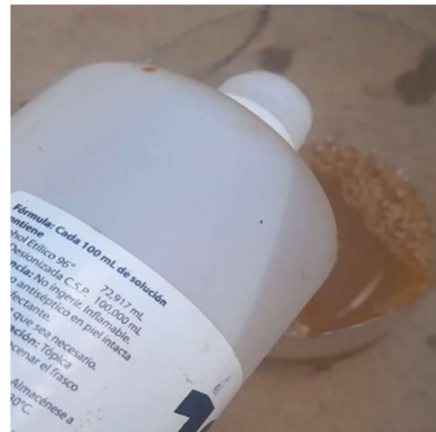


Figura 9. Vertido de alcohol etílico al extracto líquido de pectina.
Figure 9. Addition of ethyl alcohol to the liquid pectin extract.



Figura 10. Pectina obtenida de coloración blanquecina saliendo a flote. Camarón (*Litopenaeus vannamei*).
Figure 10. Whitish pectin obtained, floating to the surface. Shrimp (*Litopenaeus vannamei*).

⁴Del Valle, M. (2017). *Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos mediante el uso de biopolímeros en agua turbia del estero salado*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Universidad de Guayaquil.



Figura 11. Extracción del exoesqueleto del Camarón (*Litopenaeus vannamei*)
Figure 11. Extraction of the exoskeleton from shrimp (*Litopenaeus vannamei*).



Figura 12. Exoesqueletos limpios de los camarones (*Litopenaeus vannamei*).
Figure 12. Clean shrimp exoskeletons (*Litopenaeus vannamei*).



Figura 13. Secado de los exoesqueletos en papel aluminio.
Figure 13. Drying of the exoskeletons on aluminum foil.



Figura 14. Exoesqueletos previamente secados sobre papel de aluminio.
Figure 14. Exoskeletons previously dried on aluminum foil.



Figura 15. Exoesqueletos antes de la molienda.
Figure 15. Exoskeletons before grinding



Figura 16. Material molido.
Figure 16. Ground material.



Figura 17. Vertido de Carbonato de sodio para la desproteínización.
Figure 17. Addition of sodium carbonate for deproteinization.



Figura 18. Reposo del carbonato de sodio con el exoesqueleto.
Figure 18. Resting period of sodium carbonate with the exoskeleton.

Posteriormente, se procedió a disgregar la cáscara al realizar el filtrado y lavado del producto. En seguida, se sometió a la desmineralización, vertiendo en ácido clorhídrico al 5%, el producto, a temperatura ambiente aproximadamente de 12 a 24 horas (Figuras 19-20). En este paso el HCl disuelve las sales inorgánicas principalmente el carbonato de calcio que constituyen la matriz mineral del exoesqueleto. Finalmente, se realizaron dos lavados consecutivos con agua destilada y un filtrado, con el fin de eliminar tanto el exceso de ácido como las sales generadas, dejando una quitina prácticamente libre de componentes minerales.

Para realizar el blanqueamiento necesario al producto, se hizo una inmersión en carbonato de sodio al 4% a temperatura ambiente durante 4 días. Después, lo obtenido se filtró y calentó a 30 °C, con la intención de acelerar la evaporación del exceso de humedad y favorecer a las reacciones químicas residuales de blanqueamiento, reduciendo tiempos sin dañar la estructura polímera (Figuras 21-22). Al finalizar, se obtuvo el producto en forma de polvo blanquecino (Figura 23).



Figura 19. Desmineralización vertiendo ácido clorhídrico.
Figure 19. Demineralization by adding hydrochloric acid.



Figura 20. Reposo del exoesqueleto en contacto con el ácido clorhídrico.
Figure 20. Resting period of the exoskeleton in contact with hydrochloric acid.



Figura 21. Inmersión de exoesqueletos de camarón en carbonato de sodio. Mezcla durante la inmersión.
Figure 21. Inmersión de exoesqueletos de camarón en carbonato de sodio. Mezcla durante la inmersión.



Figura 22. Material posterior al tratamiento. Tras el tiempo establecido, el material se filtró y calentó.
Figure 22. Material after treatment. After the established time, the material was filtered and heated.



Figura 23. Obtención del quitosano en forma de polvo blanquecino.
Figure 23. Chitosan obtained as a whitish powder.

Prueba de Jarras/ Coagulación - Floculación

La prueba de jarras es uno de los procesos más importantes, donde se simula a escala de laboratorio el proceso de coagulación y floculación que se usa en plantas de tratamiento de agua, también se utilizan diversas concentraciones de coagulantes o floculantes, esto con el objetivo de reducir la materia orgánica y coloides en suspensión (Fúquene y Yate, 2018).

En este estudio se realizó un único ensayo en el cual se empleó una concentración de 1.2 mL de pectina y 1.2 g de quitosano, correspondientes a cada biopolímero, en un vaso precipitado de 1000 mL se midieron 500 mL de agua residual a tratar. A estos 500 mL se añadieron directamente los 1.2 mL de pectina y los 1.2 g de quitosano disuelto en 250 mL de agua destilada, logrando una concentración homogénea al total de 750 mL de suspensión (Figuras 24-26). Se empleó un agitador mecánico a 120 rpm, velocidad suficientemente intensa para dispersar rápidamente los polímeros y favorecer el choque entre partículas, pero no tan elevada como para deshacer los flóculos nacientes. El ensayo se mantuvo durante tres horas, tiempo el cual se monitoreo visualmente la formación y tamaño de los flóculos, así como la clarificación.

En esta etapa final, la suspensión tratada se dejó en reposo durante una hora para permitir la sedimentación natural de los flóculos, de modo que las partículas agregadas se depositaron en el fondo y el sobrenadante quedara lo más claro posible. A continuación, se procedió a realizar los mismos análisis de los parámetros descritos previamente, las cuales fueron pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales en Suspensión (STS), Coliformes Fecales y Cromo (Cr). Estos análisis fisicoquímicos están acreditados por Ambiental Laboratorio S.A.C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la obtención de los resultados se tomó en consideración un punto de muestreo. Se realizaron monitoreos de parámetros fisicoquímicos como: pH, Demanda bioquímica de Oxígeno, Demanda química de Oxígeno, Sólidos Totales en Suspensión, coliformes fecales y cromo detallados en el Cuadro 1.

Los resultados del análisis fisicoquímico en el área de influencia de la Laguna de Tragadero indican una condición interesante del cuerpo de agua que se ve afectado por la descarga de aguas residuales. Un pH de 7.30 es bastante neutro y sugiere que el agua no es ni demasiado ácida ni alcalina, lo cual es favorable para la mayoría de los procesos biológicos. Sin embargo, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) es significativamente alta con 146.6 mg L^{-1} , lo que implica una considerable cantidad de materia orgánica biodegradable en el agua que requiere oxígeno para ser descompuesta por microorganismos. En contraste, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 75.0 mg L^{-1} , aunque también indica contaminación, es menor que la DBO, lo que podría sugerir la presencia de compuestos orgánicos más resistentes a la degradación química.



Figura 24. Se muestra el agua a tratar mezclada con los biopolímeros.
Figure 24. Wastewater to be treated mixed with the biopolymers is shown.



Figura 25. La suspensión se agita en un agitador mecánico.
Figure 25. The suspension is stirred using a mechanical stirrer.



Figura 26. Se deja en reposo para observar la formación los flóculos.
Figure 26. The suspension is left to stand to observe floc formation.

Cuadro 1. Resultados de los análisis fisicoquímicos del agua residual.
Table 1. Results of the physicochemical analyses of the wastewater.

Parámetros	Resultado	Unidad
pH	7.30	pH
Demanda Bioquímica de Oxígeno	146.6	O ₂ mg L ⁻¹
Demanda Química de Oxígeno	75.0	mg L ⁻¹
Sólidos Totales en Suspensión	51.0	mg L ⁻¹
Coliformes Fecales	1.3 × 10 ³	NMP 100 mL ⁻¹
Cromo	0.147	mg L ⁻¹

Los Sólidos Totales en Suspensión (STS) a 51.0 mg L⁻¹ están dentro de un rango que podría considerarse normal para aguas residuales no tratadas, pero aun así representan una preocupación para la vida acuática y la posible utilización de estas aguas para riego o actividades recreativas. La presencia de coliformes fecales a 1.3 × 10³ NMP 100 mL⁻¹ es un indicador de contaminación fecal y un riesgo potencial para la salud pública, ya que estos microorganismos pueden ser patógenos o indicar la presencia de otros patógenos. El Cromo detectado a una concentración de 0.147 mg L⁻¹ es preocupante, ya que este metal pesado es tóxico y puede acumularse en los organismos vivos, causando diversos problemas de salud.

En el contexto de los biopolímeros para el tratamiento de aguas residuales, estos resultados sugieren que sería necesario un tratamiento robusto que no solo reduzca la materia orgánica y los sólidos en suspensión, sino que también aborde la eliminación de patógenos y metales pesados. Los biopolímeros podrían ser efectivos en la aglutinación y precipitación de sólidos, así como en la mejora de la eficiencia de los procesos de biofiltración para reducir la DBO y DQO. Además, ciertos biopolímeros tienen la capacidad de quelar metales pesados, lo que podría ser beneficioso para tratar la contaminación por cromo.

Es crucial realizar más estudios para determinar la eficacia de los biopolímeros específicos en las condiciones particulares de la Laguna de Tragadero. También sería recomendable investigar el impacto a largo plazo del uso de biopolímeros en el ecosistema acuático y su interacción con la flora y fauna local. La implementación de biopolímeros como parte de una estrategia integral de tratamiento podría contribuir significativamente a la recuperación y mantenimiento de la calidad del agua en la Laguna de Tragadero, beneficiando así a la comunidad y al medio ambiente.

Para la obtención de los resultados se tomó en consideración un punto de muestreo. Se realizaron monitoreos de parámetros fisicoquímicos como: pH, demanda bioquímica de oxígeno, Demanda química de oxígeno, Sólidos Totales en Suspensión, coliformes fecales y cromo detallados en el Cuadro 2.

El análisis de los resultados obtenidos del segundo estudio fisicoquímico en el área de influencia de la Laguna de Tragadero tras la aplicación de biopolímeros para el tratamiento de aguas residuales revela datos significativos. Un pH de 7.50 indica que el agua está en un estado neutro, lo cual es favorable para la mayoría de los ecosistemas acuáticos.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de 78.0 mg L⁻¹ sugiere que ha disminuido en casi 47% una cantidad considerable de materia orgánica biodegradable en el agua, lo que podría indicar que el efluente necesitará menor cantidad de oxígeno para su descomposición biológica. Por otro lado, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 48.50 mg L⁻¹ refleja que ha disminuido en 35% de materia orgánica total, lo que indica que los biopolímeros fueron capaces de eliminar también parte de los contaminantes más complejos, solo los biodegradables.

Los Sólidos Totales en Suspensión (STS) disminuyeron 18% hasta 42.0 mg L⁻¹ lo cual se traduce en menor turbidez y menor carga de sedimentos, mejorando la calidad del agua, puesto que al tener menor concentración permiten la penetración de la luz y ayudan a la fotosíntesis de las plantas acuáticas. Asimismo, los coliformes fecales disminuyeron en 81% hasta 2.4 × 10² NMP 100 mL⁻¹ lo que evidencia la eficacia de los biopolímeros en la disminución de la carga microbiana, lo que representa una disminución en el riesgo para la salud pública y la vida acuática.

La presencia de coliformes fecales se reduce de 1.3 × 10³ NMP 100 mL⁻¹ a 2.4 × 10² NMP 100 mL⁻¹, lo que demuestra la capacidad del tratamiento con biopolímeros para disminuir la carga microbiana y, por tanto, el riesgo sanitario y ecológico. Asimismo, el cromo, un metal pesado tóxico, presenta una disminución significativa, pasando de 0.147 mg L⁻¹ a menos de 0.001 mg L⁻¹, lo cual representa un resultado positivo, ya que concentraciones elevadas de cromo son perjudiciales para la vida acuática y la salud humana.

Cuadro 2. Resultados de los análisis fisicoquímicos del agua residual postratamiento.
Table 2. Results of the physicochemical analyses of the wastewater after treatment.

Parámetros	Resultado	Unidad
pH	7.50	pH
Demanda Bioquímica de Oxígeno	78.0	O ₂ mg L ⁻¹
Demanda Química de Oxígeno	48.5	mg L ⁻¹
Sólidos Totales en Suspensión	42.0	mg L ⁻¹
Coliformes Fecales	2.4 × 10 ²	NMP 100 mL ⁻¹
Cromo	< 0.001	mg L ⁻¹

En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque el tratamiento con biopolímeros ha logrado neutralizar el pH, aún existen desafíos significativos en cuanto a la reducción de la materia orgánica y los contaminantes. Sería recomendable realizar un seguimiento continuo y considerar medidas adicionales para mejorar la calidad del agua en el área de influencia de la Laguna de Tragadero, como la implementación de tratamientos secundarios o terciarios que complementen la acción de los biopolímeros, así como políticas de gestión y educación ambiental que reduzcan la fuente de contaminación.

El análisis comparativo de los resultados fisicoquímicos del agua en el área de influencia de la Laguna de Tragadero, antes y después de la aplicación de biopolímeros, revela cambios significativos en varios parámetros. El pH del agua, que refleja su acidez o alcalinidad, ha mostrado un ligero aumento de 7.30 a 7.50, indicando un cambio hacia condiciones más alcalinas. Este cambio puede tener implicaciones en la disponibilidad de nutrientes y metales pesados en el agua, así como en la vida acuática. Estos resultados concuerdan parcialmente con lo reportado por (Montero y Martínez, 2014) quienes registraron un pH de 6.5 ± 0.1 en el manantial Pozo Azul, valores próximos a la neutralidad. En contraste, la diferencia entre ambos resultados puede explicarse por factores locales, influencia de efluentes y las descargas puntuales presentes en cada área de influencia.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), que mide la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para descomponer la materia orgánica presente, se redujo de 146.6 mg L⁻¹ a 78 mg L⁻¹. Esto sugiere que la cantidad de materia orgánica biodegradable ha variado significativamente con el tratamiento tal como lo señalan en su estudio (Rodríguez, Mañunga y Cárdenas, 2012) quienes observaron una reducción del 91% en la DBO total, pasando de 1108 mg L⁻¹ a 83 mg L⁻¹. Por otro lado, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que indica la cantidad total de oxígeno necesario para oxidar tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable, ha disminuido ligeramente de 75.0 mg L⁻¹ a 48.5 mg L⁻¹, resultado similar a lo topado por (Acosta-Fernández y García, 2019) en su estudio, mostrando que el tratamiento con biopolímeros también removió compuestos orgánicos resistentes.

En cuanto a los Sólidos Totales en Suspensión (STS), se observa una disminución de 51.0 mg L⁻¹ a 42.0 mg L⁻¹, lo cual es un indicativo positivo de que el tratamiento con biopolímeros ha ayudado a clarificar el agua al precipitar y aglutinar los sólidos. La reducción de los STS es beneficiosa para la salud de los ecosistemas acuáticos, ya que mejora la penetración de la luz y reduce la carga de patógenos y contaminantes asociados a las partículas en suspensión.

El conteo de Coliformes Fecales bajo de 1.3×10^3 NMP 100 mL⁻¹ a 2.4×10^2 NMP 100 mL⁻¹. Esta disminución contribuyó a la remoción de carga microbiana y redujo el riesgo sanitario (Araujo, 2021⁵). Los coliformes fecales son un importante indicador de la calidad sanitaria del agua y su presencia en cantidades elevadas es motivo de preocupación para la salud pública.

Finalmente, el nivel de Cromo ha disminuido drásticamente de 0.147 mg L⁻¹ a menos de 0.001 mg L⁻¹, lo cual es un resultado extremadamente positivo, ya que el cromo es un metal pesado tóxico y su presencia en el agua representa un riesgo para la salud humana y la vida acuática tal como lo señala (Mérida-Baglietto, 2020⁶). Esta notable reducción puede atribuirse a la capacidad de los biopolímeros para quelar o precipitar metales pesados, haciéndolos menos disponibles y reduciendo su toxicidad.

⁵ Araujo, L. A. (2021). *Evaluación del desempeño de un floculante orgánico para el tratamiento de las aguas de producción del campo B a nivel de laboratorio tomando como referencia la Resolución 631 de 2015*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero. Institucion Lumieres. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8625>

⁶ Mérida-Baglietto, S. (2020). *Características inorgánicas, biológicas y toxicológicas del Cromo*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias. Universidad Complutense. Madrid, España.

El tratamiento con biopolímeros ha mostrado ser efectivo en la reducción de la turbidez y los niveles de metales pesados en el agua del área de influencia de la Laguna de Tragadero. Además, ha tenido un impacto significativo positivo en la reducción de la materia orgánica biodegradable y en la disminución de coliformes fecales. Estos resultados subrayan la importancia de un enfoque integral en el tratamiento de aguas residuales, que no solo considere la eliminación de contaminantes químicos, sino también la reducción de patógenos para garantizar la seguridad y la calidad del agua tal como lo señalan en su estudio (Duany-Timosthe, Arias, Bessy y Rodríguez, 2022)

Estos análisis sugieren que, si bien existen indicios de mejora en la calidad del agua. Es crucial continuar monitoreando estos parámetros y tomar medidas correctivas para proteger el ecosistema acuático y la salud de las comunidades cercanas. La implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, políticas de gestión de residuos y educación ambiental son esenciales para mejorar la calidad del agua en la laguna. Además, es importante investigar las fuentes de contaminación y trabajar en conjunto con las partes interesadas para desarrollar estrategias sostenibles de remediación y conservación

CONCLUSIONES

El uso de biopolímeros para el tratamiento de las aguas residuales en el área de influencia de la laguna de Tragadero demostró ser una solución eficaz para reducir la contaminación y mejorar de forma integral la calidad del efluente. Tras la aplicación de los biopolímeros el pH se mantuvo en un rango óptimo 7.30-7.50 compatible con la salud del ecosistema acuático. La DBO se redujo 146.66-78.0 mg L⁻¹, aliviando la demanda de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica biodegradable. La DQO disminuyó de 75.0-48.5 mg L⁻¹ lo que indica eliminación de compuestos orgánicos tanto biodegradables como resistentes. Los SST disminuyeron en 18% traduciéndose en menor turbidez y mayor penetración lumínica para la fotosíntesis. Los coliformes fecales se redujeron de 1.3×10^3 - 2.4×10^2 NMP/100 mL. evidenciando la capacidad de coagulación - floculación y reducción de carga microbiana. Finalmente, el cromo se redujo a < 0.001 mg L⁻¹ confirmando la eficacia quelante de los biopolímeros sobre los metales pesados.

Los biopolímeros ofrecen varias ventajas sobre otros métodos de tratamiento de aguas residuales, como su eficacia en la eliminación de una amplia gama de contaminantes, su carácter biodegradable y su bajo coste. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que su aplicación puede ser una alternativa sostenible para mejorarla calidad del agua. En comparación con las tecnologías actuales de tratamiento físico-químico, los biopolímeros presentan un desempeño competitivo especialmente en la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica, reduciendo la dependencia de coagulantes sintéticos como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico. Para optimizar aún más el proceso, se recomienda incluir tratamiento biológico y de desinfección para garantizar la calidad del agua de la laguna de Tragadero y la protección de su ecosistema.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Sin financiamiento externo. Los autores declaran que no recibieron ningún tipo de financiamiento externo para la realización de este estudio.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Metodología: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Software: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Validación: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Análisis formal: L.M.H.F.; Investigación: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Recursos: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Curación de datos: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Escritura - preparación del borrador original: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Escritura - revisión y edición: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Visualización: L.M.H.F.; Supervisión: S.D.C.H.; Administración del proyecto: L.M.H.F. y A.M.U.A.; Adquisición de fondos: L.M.H.F. y A.M.U.A.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al Mg. Steve Camargo Hinostrero por su valioso asesoramiento académico, sus sugerencias metodológicas y su constante apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Fernández, R. A., & García-Murcia, Y. (2019). *Procesamiento de café en cereza y riesgos ambientales asociados a la contaminación de fuentes hídricas: Estudio de caso. Análisis comparativo del proceso de beneficio seco y húmedo tradicional en fincas productoras del municipio de San Gil (Santander)*. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás. <https://doi.org/10.15332/dt.inv.2020.01508>
- Baeza, E. (2018). *Técnicas y métodos de tratamiento para diferentes tipos de aguas residuales*. Santiago, Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Burillo-Montúfar, J. C., Piñón-Carmona, I. L., González-Cantú, J., & Pamela-Tecuautzin, I. (2019a). Biopolímero en el Tratamiento de Aguas. *Finguach*, 6(20), 12-13.
- Burillo, J., González, J., & Piñón, I. (2019b). Evolución del uso del quitosano en el tratamiento de agua. *Finguach*, 6(21), 6-7.
- Duany-Timosthe, S., Arias-Lafargue, T., Bessy-Horruitiner, T., & Rodríguez-Heredia, D. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 42(1), 94-113.
- Fúquene, D., & Yate, A. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Ecapma*, 1(1), 1-7.
- Labastida-Nuñez, I., Velasco-Perez, M., Pablo-Reyes, E. P., González-Aragón, A., & Beltrán-Villavicencio, M. (2023). Evaluation of Wastewater Coagulation/Flocculation with Chitosan from Shrimp Exoskeletons Waste and Aluminum Sulfate. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1743>
- Montero, R. L., & Martínez, M. (2014). Composición físico-química de aguas ácidas procedentes de dos minas de carbón: Lobatera, estado Táchira, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(4), 55-66.
- Mowbray, S. (2022). Nuevo informe revela la cadena de daños que provocan las aguas residuales al planeta. Mongabay. Consultado el 19 de Febrero, 2023, desde <https://es.mongabay.com/2022/02/nuevo-informe-revela-cadena-de-danos-que-provocan-las-aguas-residuales-al-planeta/>
- Rodríguez, J., Mañunga, T., & Cárdenas, C. (2012). Influencia de las fracciones de materia orgánica sobre el desempeño de un sistema de tratamiento de agua residual de una industria papelera. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 15(2), 447-455. <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n2.2012.846>
- Rodríguez-Pedroso, A. T., Ramírez-Arrebató, M. A., Rivero-González, D., Bosquez-Molina, E., Barrera-Necha, L. L., & Bautista-Baños, S. (2009). Propiedades químico-estructurales y actividad biológica de la quitosana en microorganismos fitopatógenos. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 15(3), 307-317.