

Biopolímeros a Partir de Desechos Orgánicos: Materiales Sostenibles para Limpiar el Agua

Verónica Margarita Álvarez-Mártir ¹, José Luis Rivera-Armenta ^{1,*} y Cynthia Graciela Flores-Hernández ²

¹ Tecnológico Nacional de México / Campus Madero, Centro de Investigación en Petroquímica, Doctorado en Ciencias de los Materiales, Madero, México.

² Tecnológico Nacional de México / Campus Querétaro, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Maestría en Ingeniería, Querétaro, México.

* Autor de correspondencia: jriveraarmenta@itcm.edu.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 12 de marzo de 2026

Aceptado: 24 de mayo de 2026

Publicado: 3 de junio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.689>

Resumen: La contaminación del agua por metales pesados, colorantes y otros contaminantes representa uno de los principales problemas ambientales actuales. Frente a esta situación, diversos residuos orgánicos como cáscara de ajo, residuos agrícolas y biomasa marina pueden transformarse en materiales útiles para remover contaminantes del agua. En este trabajo se presentan diferentes ejemplos de biopolímeros y materiales bio-basados obtenidos a partir de desechos orgánicos, destacando sus aplicaciones como adsorbentes, membranas y sistemas de filtración. Diversos estudios reportan que estos materiales pueden retener contaminantes mediante procesos de adsorción, filtración e interacción química superficial. Además, el aprovechamiento de residuos orgánicos contribuye a reducir desechos y promueve estrategias de economía circular. Finalmente, se discuten algunas tendencias actuales, como el desarrollo de materiales híbridos, membranas regenerables y redes poliméricas con mayor eficiencia y estabilidad para tratamiento de agua.

Palabras clave: biopolímeros, tratamiento de agua, residuos orgánicos, economía circular

Introducción

La contaminación del agua representa uno de los principales desafíos ambientales a nivel global debido al incremento sostenido de descargas industriales, escorrentía agrícola y vertido inadecuado de residuos urbanos. Diversos estudios han señalado que una proporción significativa de las aguas residuales generadas en el mundo no recibe un tratamiento adecuado antes de su descarga en cuerpos receptores, favoreciendo la acumulación de metales pesados, colorantes sintéticos, nutrientes y compuestos orgánicos persistentes en ríos, lagos y acuíferos (Dutta *et al.*, 2023). Estos contaminantes no solo deterioran los ecosistemas acuáticos, sino que representan un riesgo directo para la salud humana y la seguridad hídrica.

Entre los contaminantes industriales más problemáticos se encuentran los colorantes sintéticos y los metales pesados, debido a su estabilidad química y resistencia a la degradación natural. En este contexto, Shaikhiev *et al.* (2022) reportan que subproductos agroindustriales, como los residuos derivados del procesamiento de ajo, han sido investigados como materiales adsorbentes para la remoción de contaminantes en medios acuosos, evidenciando el potencial de la biomasa residual como recurso tecnológico.

Paralelamente, Dutta *et al.* (2023) destacan el crecimiento del desarrollo de materiales poliméricos diseñados para limpiar agua, lo que refleja la necesidad de optimizar tecnologías de purificación más eficientes y selectivas. Al mismo tiempo, el aumento de actividades agroindustriales genera grandes volúmenes de residuos orgánicos que suelen desaprovecharse.

Heredia Martín *et al.* (2025) señalan que los subproductos del cultivo y procesamiento del ajo constituyen una fracción considerable de biomasa residual cuyo manejo inadecuado puede generar impactos ambientales locales; no obstante, esta biomasa contiene componentes naturales de origen vegetal ricos en celulosa y fibras estructurales con alto potencial de valorización para la obtención de celulosa y otros biopolímeros funcionales.

En este escenario, los biopolímeros, materiales elaborados a partir de recursos naturales o renovables, han adquirido importancia como alternativas más amigables con el ambiente. Algunos ejemplos son materiales obtenidos de residuos agrícolas, cáscaras, algas o biomasa vegetal. Estos materiales pueden utilizarse para fabricar filtros, membranas o adsorbentes capaces de remover contaminantes presentes en el agua.

La celulosa y la nanocelulosa obtenidas de residuos agrícolas presentan propiedades favorables para su uso en sistemas de adsorción y membranas filtrantes (Qureshi *et al.*, 2024). Asimismo, el desarrollo de polímeros biodegradables y biocompuestos ha crecido debido a la necesidad de reducir la dependencia de materiales petroquímicos (Olonisakin *et al.*, 2025).

El aprovechamiento de desechos orgánicos para la síntesis de biopolímeros aplicables al tratamiento de agua integra la gestión sostenible de residuos con la remediación hídrica, alineándose con los principios de economía circular, donde los residuos se transforman en recursos con valor agregado (Heredia Martín *et al.*, 2025). Por ello, el presente trabajo analiza los principales biopolímeros derivados de desechos orgánicos y su aplicación en el tratamiento de agua, destacando sus fundamentos estructurales, mecanismos de interacción con contaminantes y perspectivas de desarrollo sostenible.

Desarrollo

Biopolímeros derivados de desechos orgánicos: de residuo a recurso funcional

La problemática de la contaminación hídrica ha impulsado la búsqueda de materiales capaces de remover contaminantes de manera eficiente sin generar impactos ambientales adicionales. En este contexto, los biopolímeros derivados de desechos orgánicos representan una alternativa estratégica al integrar la gestión de residuos con soluciones tecnológicas para la remediación del agua.

Diversos residuos agroindustriales contienen componentes naturales de origen vegetal ricos en celulosa, hemicelulosa y lignina que pueden transformarse en materiales funcionales. La valorización de residuos de ajo, por ejemplo, ha sido ampliamente documentada como una estrategia de economía circular. Heredia Martín *et al.* (2025) destacan que los subproductos del cultivo y procesamiento del ajo constituyen una biomasa residual significativa que, lejos de considerarse un desecho sin valor, puede convertirse en materia prima para aplicaciones tecnológicas. De manera complementaria, Adelpour *et al.* (2025) demostraron que procesos enzimáticos verdes permiten la delignificación eficiente de cáscara de ajo, facilitando la obtención de fracciones ricas en celulosa aprovechables para la fabricación de nuevos materiales.

Desde una perspectiva funcional, la celulosa y sus derivados poseen una elevada densidad de grupos hidroxilo capaces de interactuar con especies químicas presentes en agua. Qureshi *et al.* (2024) señalan que la nanocelulosa obtenida de biomasa agrícola presenta una alta área superficial y posibilidad de modificación química, lo que la convierte en un soporte ideal para sistemas adsorbentes y membranas filtrantes. Esta característica estructural permite diseñar materiales con afinidad hacia metales pesados, colorantes o compuestos orgánicos persistentes. De manera sencilla, estos materiales funcionan como una especie de “esponja química”. Algunos contaminantes quedan atrapados en su superficie mediante adsorción, mientras que otros pueden retenerse por filtración o por interacción química entre los grupos funcionales del material y los contaminantes presentes en el agua.

La evidencia experimental respalda esta aplicación. Shaikhiev *et al.* (2022) reportaron que el polvo de cáscara de ajo puede eliminar más del 80 % de compuestos fenólicos en condiciones controladas, evidenciando que la biomasa residual posee capacidad adsorbente significativa. Este tipo de resultados confirma que los residuos orgánicos no solo pueden reincorporarse al ciclo productivo, sino que además pueden desempeñar un papel activo en la descontaminación de recursos hídricos.

Con el fin de sintetizar los principales biopolímeros obtenidos a partir de desechos orgánicos y sus aplicaciones en tratamiento de agua, en la Tabla 1 se presentan algunos ejemplos representativos reportados en la literatura reciente, incluyendo el tipo de residuo, el material obtenido y el contaminante objetivo. Cabe señalar que algunos de los materiales reportados corresponden a biocompuestos, membranas o materiales bio-basados derivados parcialmente de residuos orgánicos, y no exclusivamente a biopolímeros obtenidos directamente del desecho original.

Más allá de la biomasa en estado particulado, el desarrollo de matrices poliméricas estructuradas ha ampliado el campo de aplicación. Dutta *et al.* (2023) describen cómo las redes poliméricas interpenetradas (IPN), las cuales pueden imaginarse como dos redes entrelazadas entre sí, similares a dos mallas superpuestas que trabajan juntas para

combinar resistencia mecánica y capacidad de captura de contaminantes, han ganado relevancia en procesos de desalación y remediación hídrica debido a su capacidad para combinar estabilidad mecánica con funcionalidad química. La incorporación de componentes bio-basados en este tipo de redes permite diseñar materiales combinados donde la fase natural aporta grupos activos y la fase sintética proporciona integridad estructural en ambientes acuosos.

Tabla 1. Biopolímeros derivados de desechos orgánicos aplicados al tratamiento de agua

Residuo orgánico	Biopolímero / Material obtenido	Forma del material	Contaminante objetivo	Referencia
Cáscara de ajo	Biomasa lignocelulósica	Adsorbente particulado	Compuestos fenólicos	Shaikhiev <i>et al.</i> , 2022
Cáscara de ajo	Fracción celulósica delignificada	Precursor para materiales funcionales	Aplicaciones en biorrefinería y potencial adsorbente	Adelpour <i>et al.</i> , 2025
Residuos agrícolas	Nanocelulosa	Soporte para membranas y adsorbentes	Metales pesados y contaminantes orgánicos	Qureshi <i>et al.</i> , 2024
Celulosa (derivados)	Acetato de celulosa /PU	Membrana	Pb(II)	Iqhrammullah <i>et al.</i> , 2020
Biomasa de alga roja	Poliuretano bio-basado	Membrana	Amonio	Nurman <i>et al.</i> , 2021

En esta línea, Iqhrammullah *et al.* (2020) evaluaron películas basadas en acetato de celulosa y poliuretano para la remoción de Pb(II), demostrando que la combinación de biopolímeros con matrices reticuladas mejora la estabilidad y eficiencia de captura. De manera similar, Nurman *et al.* (2021) desarrollaron membranas de poliuretano derivadas de biomasa de alga roja para la filtración de amonio, evidenciando que los polímeros bio-basados pueden integrarse exitosamente en tecnologías de separación.

Tendencias actuales en biopolímeros para tratamiento de agua

El desarrollo reciente en esta área no se limita únicamente a la utilización directa de residuos, sino que incorpora estrategias de ingeniería molecular y diseño estructural. Una tendencia clara es la formación de materiales combinados y redes interpenetradas que permiten ajustar propiedades como porosidad, hidrofiliidad y selectividad. Según Dutta *et al.* (2023), la investigación en IPNs orientadas a tratamiento de agua ha crecido considerablemente en la última década, impulsada por la necesidad de materiales más durables y regenerables.

Otra tendencia relevante es la modificación superficial de biopolímeros para incrementar su afinidad hacia contaminantes específicos. Qureshi *et al.* (2024) resaltan que la funcionalización química de nanocelulosa permite incorporar grupos cargados o quelantes que mejoran la captura de metales pesados.

Asimismo, Taher *et al.* (2024) demostraron que redes poliuretánicas derivadas de aceites vegetales pueden diseñarse con enlaces dinámicos reversibles, favoreciendo la regenerabilidad del material. Estas estrategias tecnológicas se resumen en la Tabla 2, donde se muestran las principales tendencias estructurales aplicadas a biopolímeros para remediación hídrica.

El análisis comparativo de los estudios revisados muestra que el valor de los biopolímeros en tratamiento de agua no depende exclusivamente de su origen renovable, sino de la manera en que su estructura puede adaptarse a distintos entornos de operación. Mientras que los materiales lignocelulósicos particulados ofrecen soluciones de bajo costo y rápida implementación, los sistemas tipo membrana y redes interpenetradas permiten un mayor control sobre la estabilidad y selectividad del proceso.

Tabla 2. Tendencias tecnológicas en biopolímeros para tratamiento de agua

Estrategia	Aplicación en agua	Ventaja principal	Referencia
Redes interpenetradas (IPN)	Desalación y remediación	Mayor estabilidad y selectividad	Dutta <i>et al.</i> , 2023
Funcionalización de nanocelulosa	Adsorción de metales pesados	Incremento de afinidad química	Qureshi <i>et al.</i> , 2024
Poliuretano bio-basado con enlaces dinámicos	Membranas regenerables	Reutilización y sostenibilidad	Taher <i>et al.</i> , 2024
Valorización de residuos agroindustriales	Producción de biopolímeros adsorbentes	Economía circular	Heredia Martín <i>et al.</i> , 2025

Los trabajos de Dutta *et al.* (2023) evidencian que las IPNs amplían el rango de aplicaciones al permitir la combinación de fases con propiedades complementarias, lo que resulta particularmente relevante en sistemas de desalación y separación selectiva. Por su parte, Qureshi *et al.* (2024) subrayan que la posibilidad de funcionalizar nanocelulosa abre un panorama hacia materiales diseñados específicamente para contaminantes determinados, lo que representa una transición desde adsorbentes generales hacia sistemas de captura dirigida.

Asimismo, los enfoques de regenerabilidad descritos por Taher *et al.* (2024) indican que la sostenibilidad de estos materiales no solo debe evaluarse en términos de origen biológico, sino también en su desempeño a lo largo de múltiples ciclos de uso. En este sentido, la convergencia entre valorización de residuos y diseño de materiales sugiere que el desarrollo futuro de biopolímeros para tratamiento de agua deberá centrarse en optimizar simultáneamente eficiencia, estabilidad y reutilización.

Conclusiones

El tratamiento de agua enfrenta actualmente el reto de combinar eficiencia tecnológica con sostenibilidad ambiental. En este escenario, los biopolímeros derivados de desechos orgánicos emergen como una alternativa capaz de integrar la remediación hídrica con los principios de economía circular. La transformación de residuos agroindustriales, como cáscaras de ajo, biomasa marina o residuos vegetales, en materiales funcionales demuestra que los desechos pueden convertirse en recursos con aplicaciones ambientales útiles.

La evidencia científica reciente confirma que materiales basados en celulosa, nanocelulosa y polímeros bio-basados pueden emplearse como adsorbentes, membranas o sistemas de filtración para la remoción de metales pesados, colorantes y otros contaminantes presentes en agua. Además, algunos de estos materiales pueden actuar como una especie de “esponja química”, atrapando contaminantes mediante procesos de adsorción y filtración.

Más allá de su eficiencia técnica, estos materiales contribuyen a reducir residuos orgánicos y disminuir la dependencia de materiales petroquímicos, favoreciendo el desarrollo de tecnologías más sostenibles.

Las tendencias actuales se enfocan en desarrollar materiales más eficientes, regenerables y estables, así como en avanzar hacia estudios de escalamiento y aplicación en sistemas reales de tratamiento de agua.

Bibliografía

- Adelpour, T., Mojtabavi, S., Mahmoudabadi-Arani, Z., *et al.* (2025). Green valorization of garlic peel waste using halophilic laccase for efficient biomass delignification and biorefinery applications. *Scientific Reports*, 15, 15885. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99715-0>
- Dutta, S., Gupta, R. S., Pathan, S., & Bose, S. (2023). Interpenetrating polymer networks for desalination and water remediation: A comprehensive review of research trends and prospects. *RSC Advances*, 13(9), 6087–6107. <https://doi.org/10.1039/D2RA07843K>
- Heredia Martín, J. P., Ramírez, D. A., & Camargo, A. B. (2025). Overview of garlic waste management, circular economy and upcycling. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 57(1), 215–231. <https://doi.org/10.48162/rev.39.165>
- Iqhrammullah, M., Marlina, M., Khalil, H. P. S. A., Kurniawan, K. H., Suyanto, H., Hedwig, R., Karnadi, I., Olaiya, N. G., Abdullah, C. K., & Abdulmadjid, S. N. (2020). Characterization and performance evaluation of cellulose acetate–polyurethane film for lead(II) ion removal. *Polymers*, 12(6), 1317. <https://doi.org/10.3390/polym12061317>

- Nurman, S., Saiful, S., Ginting, B., Rahmi, R., Marlina, M., & Wibisono, Y. (2021). Synthesis of polyurethane membranes derived from red seaweed biomass for ammonia filtration. *Membranes*, 11(9), 668. <https://doi.org/10.3390/membranes11090668>
- Olonisakin, K., Mohanty, A. K., Thimmanagari, M., & Misra, M. (2025). Recent advances in biodegradable polymer blends and their biocomposites: A comprehensive review. *Green Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/D5GC01294E>
- Qureshi, S. S., Nizamuddin, S., Xu, J., et al. (2024). Cellulose nanocrystals from agriculture and forestry biomass: Synthesis methods, characterization and industrial applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 58745–58778. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35127-3>
- Shaikhiev, I. G., Kraysman, N. V., & Svergzova, S. V. (2022). Use of garlic processing by-products to remove pollutants from aqueous media. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(4), 4518–4528. <https://doi.org/10.33263/BRIAC124.45184528>
- Taher, M. A., Su, Y., Wang, X., Xu, X., Habib, M. A., Zhu, J., & Chen, J. (2024). Castor oil-derived polyurethane networks multiple recyclability based on reversible dynamic acetal bond. *Materials Advances*, 5(1), 199–208. <https://doi.org/10.1039/D3MA00464C>