

Nanotecnología al rescate del agua: innovación en la degradación de colorantes

Pamela Ortega Sánchez

Universidad Anáhuac de Querétaro

Brenda Itzel Jiménez Muñoz

Universidad Tecnológica de Tulancingo

Ing. Arlete Yuriana Vázquez García

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica CIDETEQ

Mtro. Alejandro López Amador

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

***Dra. Beatriz Liliana España Sánchez**

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica SC

lespana@cideteq.mx

Resumen

La contaminación del agua por colorantes de la industria textil es una grave amenaza ambiental y para la salud, porque estos compuestos son persistentes, tóxicos y difíciles de degradar. Esto afecta la biodiversidad y dificulta el acceso a agua limpia, especialmente en comunidades vulnerables. Se han utilizado membranas de filtración para enfrentar el problema, pero las membranas tradicionales suelen taparse rápidamente y duran poco. Ahora, la nanotecnología (manipulación de la materia a escala nanométrica, es decir, extremadamente pequeña) surge como una alternativa prometedora. Al integrarla en membranas poliméricas (hechas de materiales plásticos), se mejora la eficiencia y la selectividad de filtrado (capacidad de retener contaminantes específicos). Además, estas membranas adquieren propiedades antimicrobianas y se vuelven más duraderas. Materiales como nanopartículas metálicas, óxidos metálicos y nanomateriales de carbono permiten crear membranas “inteligentes” capaces de degradar los colorantes y eliminar microbios. Investigadores de CIDETEQ están desarrollando estas membranas avanzadas para lograr un tratamiento del agua contaminada más sostenible, accesible y eficaz, en beneficio del medio ambiente y la salud de las personas.

Introducción

El agua es una fuente vital para todos los seres vivos. Sin embargo, se ha convertido en el vertedero de numerosas industrias, especialmente la textil. ¿Sabías que cada prenda que usas podría estar contaminando litros de agua sin que lo sepas? Cada atuendo que utilizamos implica un complejo proceso de teñido que, en muchos casos, culmina con el vertido de aguas residuales directamente en ríos y lagos. Esta contaminación representa un serio problema ambiental, ya que afecta tanto a la flora como a la fauna, además de ser un riesgo importante para la salud humana [1].

Se estima que existen alrededor de cien mil tipos de tintes disponibles comercialmente, con una producción global superior a setenta mil toneladas anuales, de las cuales aproximadamente el 15 % se pierde durante el proceso de teñido [2], terminando en cuerpos de agua sin el tratamiento adecuado. Esto genera alteraciones como la reducción de la luz solar disponible para organismos fotosintéticos y toxicidad para diversas formas de vida acuática (Figura 1) [3]. Estos efectos comprometen los ciclos naturales, provocan la pérdida de biodiversidad y afectan principalmente a comunidades rurales cercanas a los vertederos, que se vuelven más vulnerables ante estas descargas. Por ello, es urgente desarrollar tecnologías eficientes que combatan esta problemática [4].



Figura 1. Contaminación del agua a partir del sector textil y su impacto en el ecosistema.

Tecnologías convencionales de tratamiento de aguas

Entre todas estas alternativas, el uso de membranas se destaca como una estrategia versátil y eficaz. Estas membranas funcionan como barreras selectivas que permiten el paso del agua limpia mientras retienen contaminantes físicos, químicos y biológicos [12]. Muchas de ellas operan sin necesidad de añadir productos químicos, presentan un bajo consumo energético y pueden adaptarse a distintos tipos de contaminantes. Se emplean en procesos como la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa (clasificados según el tamaño de sus poros [13]), logrando una purificación efectiva, tal como se representa en la Figura 2. Sin embargo, su implementación enfrenta retos, como el ensuciamiento que reduce su eficiencia y vida útil, además del costo de instalación.

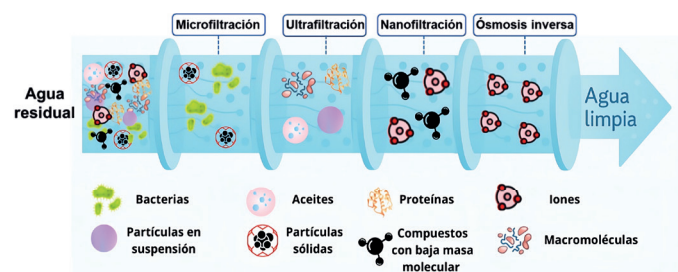


Figura 2. Esquema representativo de los diferentes procesos de separación a partir del uso de membranas para la obtención de agua limpia.

Nanotecnología como solución innovadora

La nanotecnología es la ciencia que manipula materiales a escalas diminutas (miles de veces más pequeñas que el grosor de un cabello humano), logrando mejoras significativas en sus propiedades. Recientemente, la incorporación de nanomateriales en membranas de filtración ha demostrado ser una estrategia muy efectiva para tratar aguas contaminadas por la industria textil, mejorando tanto la eliminación de contaminantes como la durabilidad y funcionalidad del sistema [14].

Estos nuevos materiales, conocidos como nanocompuestos, combinan nanopartículas funcionales con matrices poliméricas resistentes, como la polisulfona (PPSU) o la polietersulfona (PES), con el objetivo de desarrollar membranas multifuncionales de capacidad superior [15]. Por ejemplo, al integrar óxidos metálicos como el óxido de zinc (ZnO) o el dióxido de titanio (TiO_2) en membranas poliméricas, se les confiere actividad fotocatalítica bajo luz ultravioleta o solar, permitiendo la degradación directa de colorantes como el naranja de metilo o el azul de metileno, los cuales son difíciles de eliminar por métodos convencionales [16,17].

Del mismo modo, la incorporación de puntos cuánticos de carbono (CQDs) en membranas de polisulfona ha demostrado potenciar tanto la adsorción de colorantes como la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS, moléculas altamente oxidantes), facilitando su fotodegradación [18].

Otro ejemplo relevante es el uso de nanopartículas de plata (AgNPs). Estas partículas no solo mejoran la resistencia antimicrobiana de la membrana —evitando el crecimiento bacteriano en el sistema— sino que también contribuyen a la eliminación de materia orgánica [19]. Además, materiales como el óxido de grafeno (GO) se han utilizado para fabricar membranas con mayor hidrofobicidad y resistencia al ensuciamiento, favoreciendo un flujo de agua más eficiente y prolongando la vida útil del sistema [20].

Estas combinaciones de nanomateriales permiten desarrollar membranas activas y multifuncionales, capaces de retener, degradar y desinfectar el agua en un solo paso. En otras palabras, se logra una solución avanzada, adaptable y sostenible frente a los desafíos de la contaminación textil. La Figura 3 ilustra el papel de estos nanomateriales incorporados en las membranas poliméricas para el tratamiento de efluentes de la industria textil. En este esquema se aprecia que, ya sea actuando como un filtro que permite el flujo del agua o simplemente estando sumergida en agua contaminada, la membrana logra degradar los colorantes mediante la generación de radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) que rompen sus moléculas contaminantes.

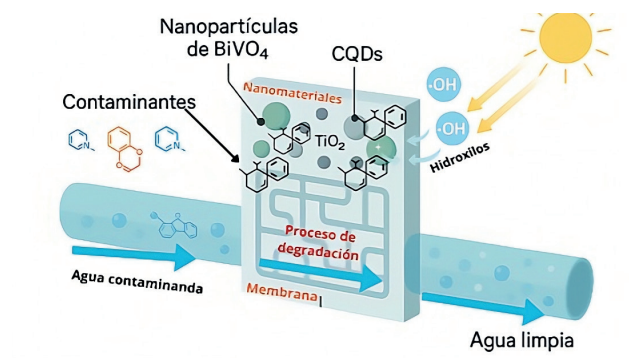


Figura 3. Representación esquemática del rol de los nanomateriales incorporados en membranas poliméricas para el tratamiento de efluentes de la industria textil.

Gracias a estas innovaciones, las membranas nanocompuestas ofrecen ventajas clave: mayor selectividad, eliminación activa de contaminantes, resistencia mecánica y química, y una vida útil prolongada. Aunque su fabricación inicial puede ser costosa, el bajo mantenimiento y la capacidad de autolimpieza de estas membranas compensan dicha inversión en el tratamiento de aguas residuales industriales [21,22].

Conclusión

El desarrollo de nuevas tecnologías representa un gran paso hacia soluciones de tratamiento del agua más eficientes y sostenibles. Gracias a los avances en la ciencia de materiales, hoy es posible crear membranas más duraderas, reutilizables y fáciles de fabricar sin dañar el ambiente [23]. Incluso se está investigando cómo darles funciones “inteligentes”, como la autolimpieza [24] o la generación de electricidad con el flujo del agua [25].

Estas tecnologías podrían aplicarse en comunidades que no cuentan con acceso a plantas de tratamiento de agua, ofreciendo una alternativa accesible, de bajo costo y amigable con el planeta. Así, la innovación en este campo no solo ayudaría a cuidar el agua, sino que también contribuiría a mejorar la calidad de vida de muchas personas.

Cuidar el agua es cuidar la vida. Apostar por estas nuevas tecnologías es una manera de acercarnos a un futuro más justo, donde todas las personas puedan acceder a este recurso vital sin poner en riesgo su salud ni la del entorno.

En esta línea, el Laboratorio de Polímeros del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ) trabaja activamente en el desarrollo de membranas nanoestructuradas multifuncionales, combinando polímeros de alto desempeño con nanomateriales estratégicos. Por ejemplo, una membrana de polietersulfona modificada con óxido de grafeno demostró, en un sistema de filtración, la capacidad de adsorber el colorante azul de metileno en cuanto entró en contacto con el agua contaminada, con una efectividad superior a la del carbón activado, demostrando así su eficacia tanto en la remoción de contaminantes como en la actividad bactericida [15].

También se están investigando membranas elaboradas mediante electrohilado (una técnica de fabricación de nanofibras), las cuales ofrecen nuevas oportunidades para el tratamiento eficiente del agua [26]. Estos avances buscan brindar soluciones sostenibles adaptadas a condiciones reales de operación, con procesos de fabricación más limpios y accesibles.

Referencias

- [1] S. Sudarshan, S. Harikrishnan, G. Rathibhuvaneswari, V. Alamelu, S. Aanand, A. Rajasekar, M. Govarthanan, Impact of textile dyes on human health and bioremediation of textile industry effluent using microorganisms: current status and future prospects, *J. Appl. Microbiol.* 134 (2023). <https://doi.org/10.1093/JAMBIO/LXAC064>.
- [2] S. Dutta, S. Adhikary, S. Bhattacharya, D. Roy, S. Chatterjee, A. Chakraborty, D. Banerjee, A. Ganguly, S. Nanda, P. Rajak, Contamination of textile dyes in aquatic environment: Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation, *J. Environ. Manage.* 353 (2024) 120103. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120103>.
- [3] Y. Ahmed, K.R. Dutta, S.N.C. Nepu, M. Prima, H. AlMohamadi, P. Akhtar, Optimizing photocatalytic dye degradation: A machine learning and metaheuristic approach for predicting methylene blue in contaminated water, *Results in Engineering* 25 (2025) 103538. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.103538>.
- [4] T. Islam, M.R. Repon, T. Islam, Z. Sarwar, M.M. Rahman, Impact of textile dyes on health and ecosystem: a review of structure, causes, and potential solutions, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 30 (2023) 9207–9242. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-24398-3>.
- [5] G.A. Kallawar, B.A. Bhanvase, A review on existing and emerging approaches for textile wastewater treatments: challenges and future perspectives, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 31 (2024) 1748–1789. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-31175-3>.
- [6] C. Djilani, R. Zaghdoudi, F. Djazi, B. Boucekima, A. Lallam, A. Modarressi, M. Rogalski, Adsorption of dyes on activated carbon prepared from apricot stones and commercial activated carbon, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 53 (2015) 112–121. <https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2015.02.025>.
- [7] C. Zaharia, C.P. Musteret, M.A. Afrasinei, The Use of Coagulation–Flocculation for Industrial Colored Wastewater Treatment—(I) The Application of Hybrid Materials, *Applied Sciences* 14 (2024) 2184. <https://doi.org/10.3390/AP14052184>.
- [8] Z.U. Zango, K.S. Khoo, A.F. Ali, A.Z. Abidin, M.U. Zango, J.W. Lim, I.A. Wadi, M.H. Eisa, R. Alhathloul, S. Abu Alrub, O. Aldaghri, S. Suresh, K.H. Ibnaouf, Development of inorganic and mixed matrix membranes for application in toxic dyes-contaminated industrial effluents with in-situ treatments, *Environ. Res.* 256 (2024) 119235. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2024.119235>.
- [9] V. Singh, C. Pandit, A. Roy, S. Pandit, A.K. Rai, A. Rani, N. Ranjan, S. Rustagi, S. Malik, Degradation of food dyes via biological methods: A state-of-the-art review, *Bioresour. Technol. Rep.* 25 (2024) 101780. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2024.101780>.
- [10] S. Khan, T. Noor, N. Iqbal, L. Yaqoob, Photocatalytic Dye Degradation from Textile Wastewater: A Review, *ACS Omega* 9 (2024) 21751–21767. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.4C00887>.
- [11] A.M. Zafar, A. Naeem, M.A. Minhas, M.J. Hasan, S. Rafique, A. Ikhlaiq, Removal of reactive dyes from textile industrial effluent using electrocoagulation in different parametric conditions of aluminum electrodes, *Total Environment Advances* 9 (2024) 200087. <https://doi.org/10.1016/J.TEADVA.2023.200087>.
- [12] G.P.S. Ibrahim, A.M. Isloor, B. Lakshmi, Synthetic polymer-based membranes for dye and pigment removal, in *Synthetic Polymeric Membranes for Advanced Water Treatment, Gas Separation, and Energy Sustainability* (2020) 39–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818485-1.00003-4>.
- [13] S. Robinson, S.Z. Abdullah, P. Bérubé, P. Le-Clech, Ageing of membranes for water treatment: Linking changes to performance, *J. Membr. Sci.* 503 (2016) 177–187. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2015.12.033>.
- [14] Y. Wei, Y. Zhang, X. Gao, Z. Ma, X. Wang, C. Gao, Multilayered graphene oxide membranes for water treatment: A review, *Carbon* 139 (2018) 964–981. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2018.07.040>.
- [15] A. López Amador, A.F. Martínez Ávila, Z.P. Aranda Barrera, M.A. González Reyna, R. Castellanos Espinoza, B.L. España Sánchez, Synthesis of graphene oxide and their incorporation in nanostructured polyethersulfone membranes: Study of antibacterial and dyes adsorption properties, *Polym. Compos.* 44 (2023) 4309–4323. <https://doi.org/10.1002/PC.27411>.
- [16] Y. Sun, W. Zhang, Q. Li, H. Liu, X. Wang, Preparations and applications of zinc oxide based photocatalytic materials, *Advanced Sensor and Energy Materials* 2 (2023) 100069. <https://doi.org/10.1016/J.ASEMS.2023.100069>.
- [17] N. Madkhali, C. Prasad, K. Malkappa, H.Y. Choi, V. Govinda, I. Bahadur, R.A. Abumousa, Recent update on photocatalytic degradation of pollutants in waste water using TiO₂-based heterostructured materials, *Results in Engineering* 17 (2023) 100920. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.100920>.
- [18] S. Korkut, V. Vatanpour, I. Koyuncu, Carbon-based quantum dots in fabrication and modification of membranes: A review, *Sep. Purif. Technol.* 326 (2023) 124876. <https://doi.org/10.1016/J.SEP-PUR.2023.124876>.

- [19] Y. Yu, Z. Zhou, G. Huang, H. Cheng, L. Han, S. Zhao, Y. Chen, F. Meng, Purifying water with silver nanoparticles (AgNPs)-incorporated membranes: Recent advancements and critical challenges, *Water Res.* 222 (2022) 118901. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2022.118901>.
- [20] M. Alberto, C. Skuse, M. Tamaddondar, P. Gorgojo, Immobilized graphene oxide-based membranes for improved pore wetting resistance in membrane distillation, *Desalination* 537 (2022) 115898. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2022.115898>.
- [21] Z. Hashmi, I.M. Idriss, F. Gapsari, N. Samsuddin, M.R. Bilad, The role of nanomaterials in enhancing membrane-based treatment for emerging contaminants: A review, *Sustainable Chemistry for Climate Action* 7 (2025) 100092. <https://doi.org/10.1016/J.SCCA.2025.100092>.
- [22] L.N. Nthunya, L. Gutierrez, S. Derese, E.N. Nxumalo, A.R. Verliefe, B.B. Mamba, S.D. Mhlanga, A review of nanoparticle-enhanced membrane distillation membranes: membrane synthesis and applications in water treatment, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 94 (2019) 2757–2771. <https://doi.org/10.1002/JCTB.5977>.
- [23] A. K. Y. Devarajan, Nanomaterials-Based Wastewater Treatment: Addressing Challenges and Advancing Sustainable Solutions, *Bionanoscience* 15 (2025) 1–14. <https://doi.org/10.1007/S12668-024-01780-8>.
- [24] V. Vatanpour, H. Rezaei, M. Al-Shaeli, A. Khataee, Advances in self-cleaning membranes for effective water and wastewater treatment, *Sep. Purif. Technol.* 373 (2025) 133539. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2025.133539>.
- [25] S.T. Ahmad, R. Ahmad, H. Shaukat, P.R. Rout, T. Fazal, A. Dumfort, Bioenergy production from wastewater using cost-effective ceramic membranes: a review, *Environmental Chemistry Letters* 23 (2025) 463–490. <https://doi.org/10.1007/S10311-025-01822-X>.
- [26] R. Castellanos-Espinoza, N. Arjona, B.L. España-Sánchez, Advances in Electrospun Nanostructured Membranes for Wastewater Treatments: Challenges and Opportunities, *Environmental Science and Engineering Part F* 65 (2025) 119–138. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48150-5_7.

