



Concientifica

Eliminación de contaminantes emergentes de las masas de agua; un largo río por recorrer

Elimination of emerging pollutants from water bodies; a long river to travel

Carlos Nek Hernández Martínez*
Daniel Alejandro Vergara Solís

Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México.

*Autor para la correspondencia:
chernandezm1303@alumno.ipn.mx

Resumen

Los contaminantes emergentes son un problema que afecta a los cuerpos de agua nacionales y podría estar contribuyendo a aumentar problemas de salud y medio ambiente. Se han tratado de eliminar de distintas maneras y este trabajo busca dar un contexto social sobre los diferentes contaminantes emergentes encontrados en cuerpos de agua alrededor del mundo e informar sobre estos intentos de saneamiento a lo largo de la investigación científica.

Palabras clave: Tratamientos de agua, remoción de contaminantes, contaminantes emergentes.

Summary

Emerging contaminants are a problem affecting national water bodies and may be contributing to increased health and environmental problems. There have been attempts to eliminate them in different ways and this paper seeks to provide a social context on the different emerging contaminants found in water bodies around the world and to report on these attempts at cleanup through scientific research.

Keywords: Water treatment, removal of contaminants, emerging contaminants.

¿Estás tomando agua con antibióticos?

La población mexicana en los últimos 20 años ha crecido en 28.5 millones de habitantes [3], y con esto surgen problemas de salud pública como el consumo desmedido de antibióticos y una negligente disposición final dentro de las aguas residuales, que ya de antemano vienen cargadas con otros contaminantes emergentes (fármacos en general, hormonas, pesticidas, aditivos alimentarios y plastificantes, principalmente) (Figura 1).

Se estima que, globalmente, la mitad de los medicamentos se prescriben, se dispensan y se consumen de forma inadecuada. Por ejemplo, en México simplemente para el tratamiento de Infecciones Respiratorias Agudas y Enfermedades Diarreicas Agudas en 2008, se justificaba tan sólo en 10 a 15% de los casos, por lo que del 85% al 90% se hacía uso no recetado de antibióticos [1], lo que ha derivado en que en los últimos años se observara una mayor presencia de contaminantes antibióticos en distintos cuerpos de agua. Resuenan mucho los casos, en México, que reporta Hernández donde se destaca la presencia de diclofenaco e ibuprofeno en aguas de Jalisco, surfactantes



Figura 1. Consumo irracional de antibióticos, vertimiento y descarga de agua residual con antibióticos e impactos negativos que esto genera.

carbono total menos el carbono inorgánico en una sola masa. Con este parámetro si bien se puede inferir la cantidad de carbono orgánico, esta determinación no nos muestra qué compuestos orgánicos están presentes, por ende, no se puede saber cuáles son los impactos ambientales, ni la forma en la que se puede remover del agua residual. En conclusión, no se expresa en ningún momento de manera directa a los “Contaminantes emergentes”, “Fármacos” o “Antibióticos” ni se mencionan en las tablas de límites permisibles [1, 2, 3, 4, 5].

Tecnologías para la eliminación de Contaminantes Emergentes en Agua Residual

Sobre toda la superficie terrestre existen diferentes contaminantes del agua, algunos son ampliamente conocidos: metales pesados, patógenos, materia orgánica biodegradable y no biodegradable, grasas, aceites, tintas, sólidos suspendidos o solubles, es decir existen contaminantes físicos, químicos y biológicos (Figura 2).

Estos contaminantes han sido ampliamente estudiados, normados, caracterizados y tratados, pero en los últimos años los métodos analíticos han mejorado su alcance y es ahí donde técnicas como la Espectrometría de Masas nos conduce al descubrimiento de los llamados Contaminantes Emergentes que son una gran variedad de sustancias recalcitrantes, que vienen en cantidades muy pequeñas dentro de volúmenes muy grandes y que podrían presentar potenciales daños a la salud humana y en general a los ecosistemas.

En este tenor es vital desarrollar tecnologías para la eliminación de estos contaminantes de las aguas residuales. El avance en la investigación ha crecido de manera multidisciplinaria, trabajando colaborativamente las áreas de genética, biotecnología, ingeniería ambiental e ingeniería civil, por mencionar algunas. A continuación, te presentaremos seis de las técnicas más utilizadas en la investigación que han evaluado la remoción de contaminantes emergentes y dos casos puntuales donde se ha hecho una combinación de estas técnicas para

en agua de pozo en Baja California y plastificantes en agua de río en Nuevo León [15].

Normatividad en México en Materia de Aguas Residuales

En nuestro país, aún no están bajo la lupa estos llamados contaminantes emergentes. Tanto la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) como la SEMARNAT (Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales), no han reflejado su preocupación por la detección y caracterización de los contaminantes emergentes en las medidas, criterios y/o límites máximos permisibles en las normas vigentes. En la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-1996 a la NOM-001-SEMARNAT-2021, donde establecen límites permisibles de contaminación en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua propiedad de la nación, pasaron más de 20 años para dejar de utilizar la DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días), que es un parámetro para la estimación de la contaminación del agua con base en el consumo de oxígeno que las bacterias presentes en el agua utilizan para oxidar la materia orgánica presente en el agua residual, pues se produce un falso registro del nivel de contaminación, ya que la prueba no puede detectar contaminantes orgánicos no biodegradables ni tóxicos presentes en el agua (que son justamente donde están clasificados los contaminantes emergentes: orgánicos y tóxicos). La nueva norma marca un límite de carbón orgánico total (COT), que ha sido definido como un indicador de la materia orgánica presente en el agua; la diferencia del

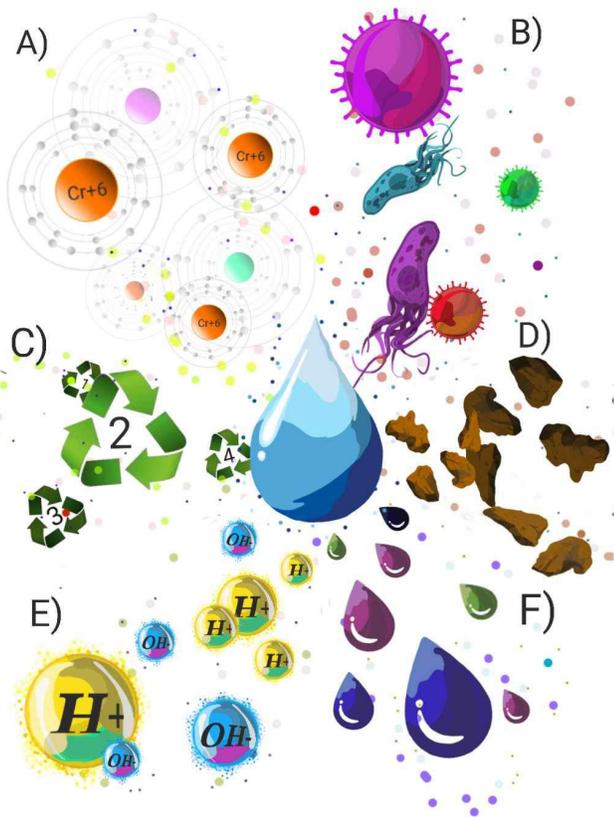


Figura 2. Contaminantes del agua; A) Metales pesado, B) Patógenos, C) Microplásticos, D) Sólidos y material particulado, E) pH, F) Tintas, aceites, grasas y otras sustancias.

aumentar su efectividad en la remoción de contaminantes emergentes (figura 3).

Filtración por membrana

Es un proceso en el cual una corriente de aguas residuales pasa a través de una membrana semipermeable, que permite selectivamente el paso de ciertos componentes mientras retiene otros contaminantes [6].

Proceso de Fenton

En estos procesos se crean las condiciones dentro de un recipiente para llevar a cabo una reacción química entre el peróxido de hidrógeno y el hierro (II), esta reacción genera radicales hidroxilos capaces de descomponer diversos contaminantes orgánicos [6].

Oxidación electroquímica

En este tratamiento los contaminantes orgánicos de las aguas residuales se degradan mediante reacciones electroquímicas en la superficie de materiales anódicos [7].

Procesos de membrana Fotocatalítica

Consisten en hacer pasar los efluentes a través de una membrana integrada con fotocatalizadores, estos son materiales capaces de generar especies reactivas como huecos (h^+), radicales superóxidos ($-O_2$) y radicales hidroxilos ($\bullet OH$) bajo la irradiación de luz que ayudan a descomponer los compuestos orgánicos más recalcitrantes [8].

Ultrafiltración

Aquí se utiliza un sistema de ultrafiltración de acero inoxidable que utiliza una membrana compuesta de muchos microtúbulos que impiden el paso de macromoléculas [9].

Humedales artificiales

Son sistemas que incorporan el uso de especies de plantas nativas como parte integral del proceso de tratamiento, promoviendo simultáneamente la restauración y conservación de los ecosistemas locales [11].

Existen también la combinación de diferentes tratamientos que buscan ya sea la economía del proceso, como también mejorar la capacidad de remoción de contaminante como son los siguientes escenarios:

Sistema biológico-adsorción

Xiaoyun Dai et. al. (2023). mediante un acoplamiento biológico-adsorción para la remoción de antibióticos de agua residual contaminada con antibióticos de Sulfonamida, donde lograron disminuir los contaminantes en agua residual con los siguientes valores obtenidos DQO (demanda química de oxígeno) 95.68%, FT (fosforo total) 66%, $N-NH_3$ (nitrógeno amoniacal) 97.8%, Sulfodiamina (antibiótico) 88.2%, sulfometaxazona (antibiótico) 96.7%. Así mismo identificaron las bacterias con mayor participación (mediante un método metagenómico) las cuales fueron *Plasticicumulans*, *Nakamurella* y *Pseudomonas*, dichas bacterias degradaron el fármaco por procesos metabólicos como la desnitrificación, nitrificación y nitrato reducción, principalmente, mien-

Filtración por membrana

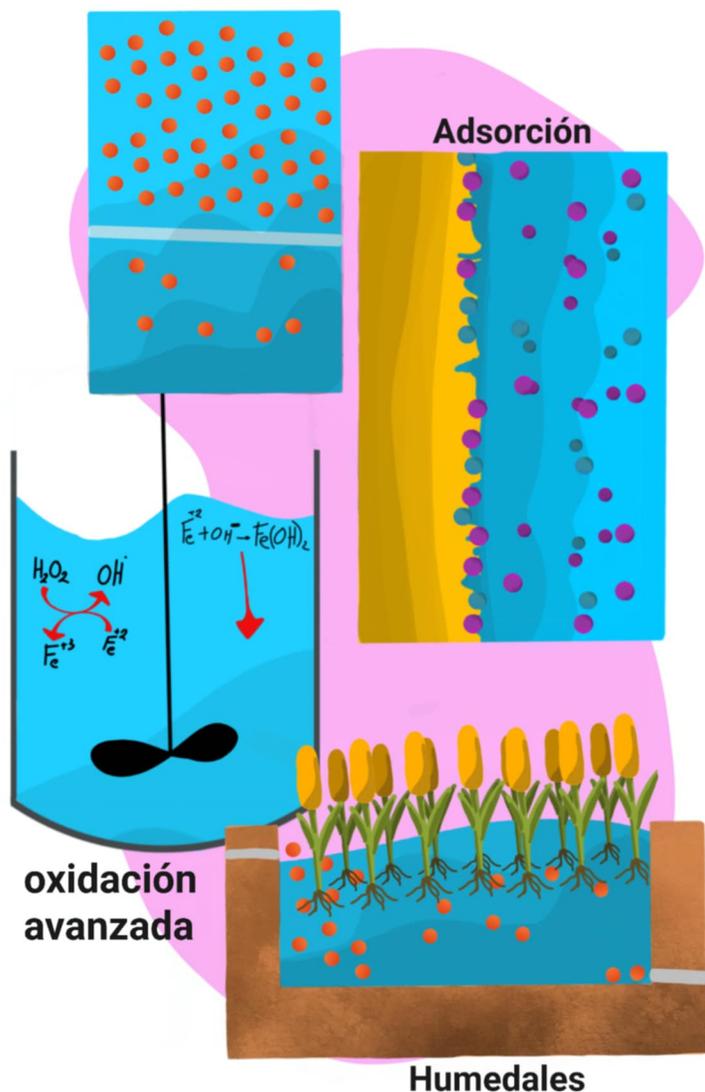


Figura 3. Tecnologías de remoción de contaminantes de aguas residuales.

tras que para el adsorbente se utilizó coque, el cual fungió como sostén de la biopelícula, así como el captador de los nutrientes para el crecimiento del consorcio microbiano [9]. Por lo que el sistema aprovecha las ventajas de un sistema biológico y las características del adsorbente (el coque es un material bituminoso que es muy poroso, con gran área superficial y gran capacidad de adsorción) para potenciar el poder de remoción y mineralización de contaminantes emergentes.

Proceso biológico aerobio + Fenton

Por otro lado, tenemos la investigación realizada por Carolina Morim et. al. (2024) donde se acopló un proceso biológico aeróbico (lodo activado) seguido de Fenton con la fi-

nalidad de encontrar las condiciones óptimas para la eliminación de AOX (Haluros Orgánicos Adsorbibles) donde se utilizó Agua residual del blanqueo de pulpa en una fábrica de papel en Portugal, mientras que para el proceso Fenton se utilizaron peróxido de hidrógeno (H_2O_2), sulfato de hierro ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), sulfito de sodio (Na_2SO_3), hidróxido de sodio ($NaOH$) y ácido nítrico (HNO_3). El estudio logró una eliminación de AOX del 89.5% y una eliminación de DQO del 82.5%. aunque presenta la desventaja de ser costosa debido a la demanda de productos químicos, el acoplamiento de procesos de oxidación avanzada busca la formación de fuertes especies oxidativas como los radicales $\bullet OH$, como lo es el proceso Fenton, el cual se basa en la generación de estos radicales a partir del peróxido en presencia de un catalizador. Considerando las ventajas de ambos procesos se opta por investigar el funcionamiento mediante el acoplamiento de ambos (Fenton y proceso biológico aerobio) para así minimizar la generación de subproductos y los costos de operación, maximizar la remoción de la DQO y la remoción de AOX, por lo que se probaron las dos combinaciones posibles, tratamiento biológico aerobio seguido del proceso Fenton, y viceversa, concretando que las mayores remociones de DQO y AOX se lograron cuando se llevó a cabo el proceso biológico seguido por el Fenton. A pesar de que esta secuencia demostró un rendimiento superior, su costo operativo fue más del doble que el costo de la secuencia de tratamiento inversa [12].

Conclusiones

Los contaminantes emergentes por su característica recalcitrante representan un riesgo a los ecosistemas y a la salud humana, por ejemplo, algunos estudios han indicado que los EC pueden bioacumularse en tejidos de organismos vivos, causando daño a los sistemas endócrinos (propiciando cáncer de próstata, testicular y de pecho, producción huevos frágiles en aves, reducción en cuenta de esperma) y sumado a esto, la contaminación de tejidos por EC también aumenta la propagación de la famosa resistencia antimicrobiana [14].

Es de preocupación la presencia de 160

compuestos orgánicos en 90 efluentes de aguas europeas pues los tratamientos convencionales de agua residuales actualmente no muestran eficiencia total en la remoción de este tipo de contaminantes y aquellos tratamientos avanzados, aunque requieren una alta inversión tampoco logran los resultados deseados [6].

Aún queda mucho camino que recorrer en la optimización y escalabilidad de estas tecnologías, pero este camino debe ser recorrido de la mano de la identificación, caracterización y legislación de los contaminantes emergentes. **iBIO**

Referencias

[1] Dreser A, Wirtz VJ, Corbett KK, Echániz G. Uso de antibióticos en México: revisión de problemas y políticas. *Salud Publica Mex* 2008;50 supl 4:S480-S487.

[2] Rodríguez-Ganen O, Asbun-Bojalil J. Vigilancia del consumo de antimicrobianos en hospitales de México: situación actual y guía práctica para su implementación. *Rev Panam Salud Publica*. 2012;32(5):381-6.

[3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Estructura del gobierno. <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>

[4] Diario Oficial de la Federación. (2022, 11 de marzo). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

[5] Lidia Favier, Andrei-Ionuț Simion, et. Al. (2024). Intensification of the photodegradation efficiency of an emergent water pollutant: A study on advanced oxidation processes. *Journal of Environmental Science*, 45(3), 250-265. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.01.015>

[6] Morim, C., Liu, S., Torres, E., Oliveira, A., & Kim, C. (2023). Two-stage treatment of pulp bleaching wastewater by Fenton and biological processes to remove recalcitrant pollutants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109787>

[7] Vergara Solis, D. A., & Hernández Martínez, C. N. (2024). Más allá de lo visible: el creciente desafío de los contaminantes emergentes en el agua que usamos. *Revista De divulgación científica iBIO*, 6(3), 186. <https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/186>

[8] Ang, W. J., et al. (2024). Innovative ceramic membrane plate filtration system for sustainable semiconductor industry wastewater treatment: A pilot scale study. *Chemical Engineering Journal*, 496, 153767.

Chemical Engineering Journal, 496, 153767.

[9] Xiaoyun Dai, Chengyuan Su, Ruxin Nong, Xinjie Huang, Yaqi Xie, Bocai Liang, Shu Gao, Menglin Chen, Performance, microbial community, and metabolism pathway in adsorption-biological coupling reactor treating sulfonamide antibiotics wastewater: Effect of influent frequency and aeration rate. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 2023, 103732. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103732>.

[10] Jamil, T. (2024). Role of advanced oxidation processes (AOPs) in textile wastewater treatment: A critical review. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100387>

[11] Matovelle, C., Quinteros, M., & Ochoa-García, S. A. (2014). Performance of Equisetum spp and Zantedeschia aethiopica on the evaluation of artificial wetlands as an alternative for wastewater treatment in rural areas of the Ecuadorian Andes. *Current Research in Environmental Sustainability*, 7, 100243. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2024.100243>

[12] Peng, Y., Yan, Y., Ma, X., Jiang, B., Chen, R., Feng, H., & Xia, Y. (2024). Efficient electrochemical oxidation of antibiotic wastewater using a graphene-loaded PbO₂ membrane anode: Mechanisms and applications. *Environmental Research*, 259, 119517. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119517>

[13] Santos, R. F., Pires, E. C., & Oliveira, M. A. (2014). A novel bioprocess combining anaerobic co-digestion followed by ultra-filtration and microalgae culture for optimal olive mill wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 145, 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.06.017>

[14] Ahmed, S. F., Mofijur, M., & Samiha, N. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125912 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>

[15] Hernández E.M. (2022). Contaminantes emergentes: incidencia en cuerpos de agua y percepción de riesgo en la población. *Química e ingeniería verde para la sostenibilidad*, 454-455:109-118