

1 The Biologist (Lima), 2026, vol. 24 (2), XX-XX.

2 DOI: <https://doi.org/10.62430/rtb20262422165>

3 Este artículo es publicado por la revista The Biologist (Lima) de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática,
4 Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos
5 de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
6 [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier
7 medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



9 REVIEW ARTICLE / ARTÍCULO DE REVISIÓN

10 Emerging contaminants in Mexican waters: monitoring and regulation

11 Contaminantes emergentes en aguas Mexicanas: monitoreo y regulación

12 Coraquetzali Magdaleno-López¹, Diana Ibarra-Rodríguez^{2*}, I. Paz Hernández-Rosales³,

13 Juan Manuel Osuna-Cabanillas², José Antonio Cabello-Méndez⁴

14 ¹Tecnológico Nacional de México/ITS de Abasolo, Guanajuato, México.

15 ²Universidad Tecnológica de Escuinapa, Sinaloa, México.

16 ³Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Sanfadila, Querétaro,
17 México.

18 ⁴Instituto Mexicano del Transporte, Pedro Escobedo, Querétaro, México

19 *Corresponding author: dra.dianaibarra@gmail.com

20 Running Head: Emerging contaminants in Mexican waters

21 Magdaleno-López *et al.*

22 Coraquetzali Magdaleno-López:  <https://orcid.org/0000-0002-9756-5766>

23 Diana Ibarra-Rodríguez:  <https://orcid.org/0000-0003-1528-0714>

24 I. Paz Hernández-Rosales:  <https://orcid.org/0000-0002-9697-7822>

25 Juan Manuel Osuna-Cabanillas:  <https://orcid.org/0000-0002-3959-0592>

ABSTRACT

Emerging contaminants are a relevant environmental concern due to their increasing occurrence in aquatic matrices and the limited regulation for their monitoring in Mexico. Therefore, the objective of this systematic review was to analyze studies conducted mainly in Mexico between 2010 and 2025 on the detection and quantification of these compounds in water. For this purpose, scientific literature related to pharmaceutical compounds, personal care products, pesticides, endocrine disruptors, and other environmentally relevant contaminants was reviewed. The results show that the most widely used techniques are liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry (LC-MS/MS), gas chromatography coupled to tandem mass spectrometry (GC-MS/MS), and high-resolution mass spectrometry (HRMS). Likewise, solid-phase extraction (SPE) and solid-phase microextraction (SPME) stand out as preconcentration methods. However, a marked methodological disparity among regions and institutions was identified, which limits data comparability. Therefore, standardized analytical protocols, stronger collaborative networks, and updated Mexican regulations are required to improve environmental surveillance and risk management.

Keywords: wastewater – mass spectrometry – solid-phase extraction – environmental monitoring – nanomaterials – environmental regulation

RESUMEN

Los contaminantes emergentes constituyen un problema ambiental relevante debido a su presencia creciente en matrices acuáticas y a la limitada regulación para su monitoreo en

México. Por ello, el objetivo de esta revisión sistemática fue analizar estudios realizados principalmente en México entre 2010 y 2025 sobre la detección y cuantificación de estos compuestos en agua. Para ello, se revisó literatura científica relacionada con contaminantes farmacéuticos, productos de cuidado personal, plaguicidas, disruptores endocrinos y otros compuestos de interés ambiental. Los resultados muestran que las técnicas más empleadas son la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS), la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas en tándem (GC-MS/MS) y la espectrometría de masas de alta resolución (HRMS). Asimismo, la extracción en fase sólida (SPE) y la microextracción en fase sólida (SPME) destacan como métodos de preconcentración. Sin embargo, se identificó una marcada disparidad metodológica entre regiones e instituciones, lo que limita la comparabilidad de los datos. Por lo tanto, se requiere estandarizar protocolos analíticos, fortalecer redes de colaboración y actualizar la normativa mexicana para mejorar la vigilancia ambiental y la gestión de riesgos.

Palabras clave: agua residual - espectrometría de masas - extracción en fase sólida - monitoreo ambiental - nanomateriales - regulación ambiental

INTRODUCCIÓN

La crisis hídrica mundial afecta a más de 2.200 millones de personas sin agua potable y 3.500 millones sin saneamiento (World Health Organization, 2023). Esta situación se agrava por la presencia de contaminantes emergentes, sustancias químicas o biológicas no reguladas que suponen un riesgo para la salud humana y ambiental (Yadav *et al.*, 2021; Puri *et al.*, 2023). Los contaminantes emergentes incluyen una amplia gama de sustancias como productos farmacéuticos, de cuidado personal, pesticidas, hormonas, microplásticos, subproductos de desinfección, compuestos perfluorados, metales pesados y materiales nanoparticulados

(Khan, 2025). Muchos de ellos son compuestos conocidos cuyo impacto ambiental o cuyas vías de exposición han sido recientemente comprendidos, lo que ha motivado su clasificación como emergentes. Estas sustancias han sido detectadas en aguas superficiales, subterráneas, residuales y, en algunos casos, en agua potable (Rodríguez-Narváez *et al.*, 2017). Los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales no logran eliminarlos por completo, lo que provoca su persistencia en el ambiente (Parida *et al.*, 2021; Krishnan *et al.*, 2023).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud, están elaborando listas de contaminantes prioritarios, sin embargo, los avances regulatorios son lentos frente a la diversidad de sustancias que se liberan al agua (Meena *et al.*, 2025). Esta falta de regulación dificulta la implementación de tecnologías avanzadas, que podrían ofrecer soluciones (Mohapatra *et al.*, 2023).

En México, la presencia de contaminantes emergentes en las aguas representa una seria amenaza para la salud pública y los ecosistemas (Morin-Crini *et al.*, 2022; Acuña-Bedoya *et al.*, 2025). Estudios han documentado la presencia de contaminantes emergentes en todo el país (López-Velázquez *et al.*, 2021; Perera-Rios *et al.*, 2022).

Entre los contaminantes emergentes más detectados se encuentran el naproxeno, ibuprofeno, paracetamol, metformina, triclosán, 17- β estradiol y atenolol (Lesser *et al.*, 2018; Rivera-Jaimes *et al.*, 2018). El alto consumo y la inadecuada eliminación de medicamentos, contribuyen a estos niveles (Aguilar-Aguilar *et al.*, 2023) y se estima que más del 54% de las aguas residuales no reciben un tratamiento adecuado y las plantas de tratamiento convencionales muestran una eficiencia variable en la remoción de estos contaminantes (de Anda & Shear, 2021).

En México, se han documentado daños genéticos en fauna acuática, residuos de pesticidas

en tortugas marinas y la presencia de microplásticos en buitres negros de Campeche (Borges-Ramírez *et al.*, 2021). También se han observado efectos en humanos, como alteraciones epigenéticas y cambios celulares vinculados a daño neurodegenerativo (Reichert *et al.*, 2019). A pesar de que México ha realizado un 16% de los estudios sobre contaminantes emergentes en América Latina, la investigación sobre nanomateriales y microplásticos es aún incipiente.

Los contaminantes emergentes son sustancias químicas o materiales que en la actualidad han tomado relevancia debido a las afectaciones al ambiente y a la salud humana (Gomes *et al.*, 2020; Morin-Crini *et al.*, 2022). Se trata de compuestos de distinto origen y naturaleza química que antes no se monitoreaban; sin embargo, hoy en día pueden ser identificados gracias a los avances analíticos que permiten detectar concentraciones de trazas (ng/L o µg/L) (Rathi *et al.*, 2021). El número de compuestos considerados como contaminantes emergentes es indeterminado y amplio, sin embargo, en la literatura técnica los clasifican como: a) fármacos y productos de cuidado personal, que abarcan medicamentos y cosméticos; b) disruptores endócrinos, entre los que se encuentran hormonas sintéticas, compuestos como el bisfenol A y alquilfenoles; c) pesticidas; d) microcontaminantes emergentes orgánicos como retardantes de llama bromados, perfluoralquilados (PFAS), metales traza de interés reciente, etc. (Li *et al.*, 2024).

Los contaminantes emergentes llegan al ambiente a través de diferentes fuentes antropogénicas: efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, descargas industriales, escorrentía y lixiviación agrícola, aguas residuales hospitalarias y lixiviados de rellenos sanitarios (Qin *et al.*, 2025). En México se han realizado diversos estudios donde se documenta la presencia de contaminantes emergentes en aguas superficiales, aguas residuales y subterráneas (Jacobo-Marín & Santacruz de León, 2021; Reynoso-Camargo *et*

121 *al.*, 2023; Torres *et al.*, 2023; Bracamontes-Ruelas *et al.*, 2025). Si bien, muchos de los
122 contaminantes no provocan toxicidad del agua, la exposición crónica a estos puede originar
123 efectos subletales, como disrupción endocrina, alteraciones en la reproducción y cambios en
124 el comportamiento de organismos acuáticos (Yadav *et al.*, 2021; Padmachandran *et al.*,
125 2023).

126 La detección y cuantificación de contaminantes emergentes requieren técnicas analíticas con
127 alta sensibilidad, capaces de identificar estos compuestos a concentraciones traza en
128 diferentes matrices ambientales. Algunas de las herramientas instrumentales con mayor uso
129 son la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS/MS), la
130 cromatografía de gases acoplada a masas y, en años más recientes, se ha implementado la
131 espectrometría de alta resolución (HRMS) (International Organization for Standardization,
132 2018; Shyamalagowri *et al.*, 2023).

133 En México, la técnica más utilizada es LC-MS/MS, particularmente para la detección de
134 fármacos, pesticidas y hormonas en aguas superficiales y residuales (Rivera-Jaimes *et al.*,
135 2018). Además, con frecuencia también se aplica la técnica GC-MS/MS para estudios que
136 requieren derivatización previa, como el análisis de retardantes de llama, alquilfenoles, entre
137 otros (Félix-Cañedo *et al.*, 2013). Antes del análisis instrumental, es requerida una etapa de
138 pretratamiento y preconcentración, cuya finalidad consiste en mejorar los límites de
139 detección. El método más común es la extracción en fase sólida (SPE). Asimismo, también
140 se ha empleado microextracción en fase sólida (SPME) para estudios analíticos de
141 compuestos volátiles (Peña-Álvarez & Castillo-Alanís, 2015).

142 Derivado de la complejidad de algunas técnicas, han surgido nuevos métodos de análisis con
143 enfoques innovadores como lo es el uso de sensores. Aunque su uso es limitado respecto a
144 las técnicas espectrométricas, el uso *in situ* representa una ventaja importante (Flores-

Contreras *et al.*, 2022). También, el uso de nanomateriales funcionalizados (como MOFs, óxidos metálicos o carbono poroso), ha sido explorado como una alternativa para la mejora de la selectividad en la fase de extracción en fase sólida y como base de sensores electroquímicos (Morin-Crini *et al.*, 2022).

A pesar de que hay estudios reportados sobre las capacidades analíticas para el monitoreo de contaminantes emergentes, en México existe una alta heterogeneidad metodológica. Esta situación genera dificultades para realizar una comparativa de resultados entre instituciones y regiones, lo que limita la posibilidad de construir un diagnóstico coherente a nivel nacional (Jacobo-Marín & Santacruz de León, 2021).

En cuanto a las regulaciones de contaminantes emergentes, estas se encuentran en desarrollo a nivel mundial. En Estados Unidos de América, la Agencia de Protección al Ambiente propuso métodos analíticos para la detección de fármacos, hormonas y esteroides, por medio de HPLC-MS/MS y GC-HRMS, sin embargo, estas técnicas no son obligatorias (US EPA, 2007; EPA, 2009). Asimismo, en Europa, la Directiva Marco del Agua (DMA) estableció una lista de vigilancia de contaminantes emergentes, esta lista es utilizada para el monitoreo de los países miembros de la DMA con la premisa de utilizar metodologías armonizadas (European Union, 2013). Bajo este marco, la norma ISO 21676:2018 establece algunos procedimientos que se encuentran estandarizados para la detección de compuestos farmacéuticos presentes en agua mediante la técnica de LC-MS/MS (International Organization for Standardization, 2018).

En México, algunos autores han planteado la importancia de la armonización de protocolos analíticos, asimismo, implementar ejercicios de intercalibración entre laboratorios y la creación de una red de monitoreo nacional (Hernández-Ramírez *et al.*, 2021; Jacobo-Marín & Santacruz de León, 2021).

Además de la creación de estas redes, resulta urgente crear Normas Oficiales Mexicanas específicas para contaminantes emergentes, ya que actualmente los contaminantes emergentes no se contemplan explícitamente en la presencia, los límites máximos permisibles ni en los métodos de análisis (Sánchez-Ocampo *et al.*, 2022).

Por lo anterior, el objetivo de esta revisión fue analizar el estado actual de la detección y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas mexicanas, con énfasis en compuestos ya reportados, técnicas analíticas, métodos de preconcentración, propuestas de monitoreo basadas en biosensores y nanomateriales, así como las principales limitaciones metodológicas y regulatorias que condicionan la comparabilidad de los resultados y la vigilancia ambiental en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración de este artículo se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica en las bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO y Redalyc, abarcando publicaciones entre 2010 y 2025. Se utilizaron como palabras clave combinaciones de términos como “contaminantes emergentes”, “detección en agua”, “materiales avanzados” y “México”; se incluyeron artículos originales, revisiones, reportes técnicos relacionados con la detección y cuantificación de contaminantes emergentes en cuerpos de agua mexicanos.

Se excluyeron documentos duplicados, artículos no revisados por pares, y estudios que no aportan información específica sobre técnicas analíticas o aplicaciones de materiales avanzados. La selección final comprendió 74 estudios, que fueron analizados y categorizados según la técnica empleada, el tipo de contaminante y la ubicación geográfica del estudio.

Para la organización y gestión bibliográfica se utilizó el software Mendeley.

Aspectos éticos

Este estudio corresponde a una revisión sistemática que se sustenta en la literatura científica publicada y documentos de acceso público, por lo que no se realizaron experimentos con seres humanos, animales, muestras biológicas ni se emplearon datos personales o información confidencial; por lo tanto, no fue necesaria la aprobación por un comité de ética ni la obtención de consentimiento informado. De igual manera, la información analizada fue tratada bajo principios de integridad científica, mediante citas adecuadas de las fuentes consultadas, la aplicación de criterios explícitos de búsqueda, selección y exclusión de estudios ya reportados, así como la presentación objetiva de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Técnicas de detección y cuantificación aplicadas en México

El tema de contaminantes emergentes en México es relativamente nuevo, sin embargo, han surgido investigaciones robustas sobre las técnicas avanzadas de detección en agua (Peña-Guzmán *et al.*, 2019). En el trabajo reportado por Peña-Álvarez & Castillo-Alanís (2015), utilizaron la técnica de microextracción en fase sólida acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas (SPME-GC-MS, por sus siglas en inglés). La metodología propuesta para este estudio fue la identificación y cuantificación simultáneas de cinco productos farmacéuticos y de cuidado personal (ibuprofeno, naproxeno, triclosán, clorofeno y bisfenol A, en muestras de aguas residuales. Esta técnica destaca debido a que no se requieren solventes en el proceso de extracción, además de su alta precisión en la detección de compuestos volátiles.

El trabajo realizado por Rivera-Jaimes *et al.* (2018) reporta el uso de la técnica (HPLC-ESI-MS/MS) en la cual se analizaron 35 productos farmacéuticos en muestras de aguas superficiales y aguas residuales; entre los cuales se encontraron analgésicos y

antiinflamatorios como naproxeno, acetaminofén y diclofenaco. De igual manera, detectaron la presencia de bezafibrato, atenolol y carbamazepina.

Algunos autores reportan el uso de la Extracción en Fase Sólida (SPE), que es frecuentemente utilizada como una etapa previa al análisis HPLC-MS/MS, ya que permite concentrar los analitos que se encuentran presentes en concentraciones bajas (regularmente en ng/L), lo cual es primordial para alcanzar los límites de detección (Ramírez-Morales *et al.*, 2021). Es imperativo mencionar que el uso de SPE permite estandarizar el tratamiento de muestras; por lo tanto, aumenta la reproducibilidad del análisis.

Galindo-Miranda *et al.* (2019) elaboraron una revisión detallada de las metodologías analíticas empleadas para la detección de contaminantes emergentes. En este trabajo, los autores destacaron la extracción en fase sólida como una técnica acoplada a HPLC-MS/MS para la detección de diclofenaco y naproxeno en el río Apatlaco. El estudio también menciona el potencial de tecnologías como GC-MS/GC-MS/MS, aunque aún en México esta tecnología es incipiente (Félix-Cañedo *et al.*, 2013).

En una planta de tratamiento de aguas residuales en Acapulco, evaluaron la presencia y remoción de contaminantes emergentes utilizando LC-HRMS. Con esta técnica lograron identificar la presencia de sulfonamidas y fluoroquinolonas, carbamazepina, levofloxacin y trimetoprima antes y después del tratamiento (Martínez-Orgániz *et al.*, 2021).

Se ha usado la técnica SPE-LC-MS/MS o SPE-HPLC-MS/MS, con la que se logró una alta sensibilidad, adecuada para la cuantificación de contaminantes emergentes. Ramírez-Morales identificó 70 fármacos en agua superficial, mientras que Bracamontes logró la identificación de 13 compuestos a lo largo de un proceso de tratamiento de aguas residuales. En este sentido, ambos estudios evidencian que estas técnicas no solo detectan una amplia gama de contaminantes, sino que también resultan fundamentales para el monitoreo y la

eficiencia en el tratamiento de aguas residuales (Ramírez-Morales *et al.*, 2021; Bracamontes-Ruelas *et al.*, 2025).

Asimismo, la técnica GC-MS ha sido empleada en la detección de contaminantes emergentes en México, como se muestra en los trabajos de Félix-Cañedo *et al.* (2013) y Galindo-Miranda *et al.* (2019), donde identificaron ftalatos, fenoles y fármacos. Aunque la técnica requiere derivatización y presenta limitaciones respecto a la técnica LC-MS/MS, sigue siendo viable para la detección de compuestos semivolátiles. Cuando la técnica GC-MS se combina con la extracción en fase sólida, resulta útil para la detección de contaminantes en agua, donde los recursos técnicos son limitados.

Una de las pocas investigaciones que se han realizado en México donde se aplica la técnica con el uso de electroforesis (SPE-LVSS-CE) para la detección de contaminantes emergentes, específicamente para edulcorantes artificiales. La metodología combinada con la extracción en fase sólida permite que la detección sea eficiente con bajo consumo de solventes y los autores mencionan que es de bajo costo. Sin embargo, se requiere optimización detallada antes y durante el análisis, resulta una metodología prometedora para laboratorios con recursos limitados (Medrano *et al.*, 2019).

En el caso de uso de biosensores para la detección de contaminantes emergentes, en México las investigaciones sobre estos dispositivos ambientales fueron implementadas a mediados de los 2000 (Castro-Ortíz *et al.*, 2007). La IUPAC describe un biosensor como un dispositivo que utiliza reacciones bioquímicas mediadas por componentes biológicos para detectar compuestos químicos, generalmente a través de señales ópticas, eléctricas o térmicas (Rebollar-Pérez *et al.*, 2016). Por ejemplo, en la UNAM desarrollaron biosensores ópticos luminiscentes para monitorear pesticidas organofosforados, glifosato y fitohormonas usadas en la agricultura (Santillán, 2023). Asimismo, en la Universidad de Sonora, se reportó la

elaboración de un sensor electroquímico para la detección de residuos de fármacos en aguas residuales (Espinoza, 2025).

En este sentido, aunque la detección de contaminantes emergentes por medio de materiales avanzados ha sido poco explorada en México, resulta imperativo implementar alternativas con métodos menos costosos y de menor complejidad tanto en la preparación de la muestra como en la interpretación de los resultados, lo que representa un campo de innovación para la vigilancia de estos contaminantes, complementando los métodos tradicionales.

Materiales avanzados para el monitoreo de contaminantes emergentes

Los nanomateriales de carbono (NM_sC) son una alternativa prometedora para la remediación de contaminantes farmacéuticos en agua (Figura 1), gracias a sus propiedades fisicoquímicas excepcionales. Destacan los nanotubos de carbono (NTC), el grafeno y los puntos de carbono. Los NTC adsorben contaminantes por fuerzas de van der Waals e interacciones π – π . El grafeno y sus derivados ofrecen propiedades catalíticas y adsorbentes que se potencian con funcionalización (Shabnum *et al.*, 2025). Los puntos de carbono son eficaces en la fotodegradación al generar especies reactivas de oxígeno bajo luz (Tian *et al.*, 2024).

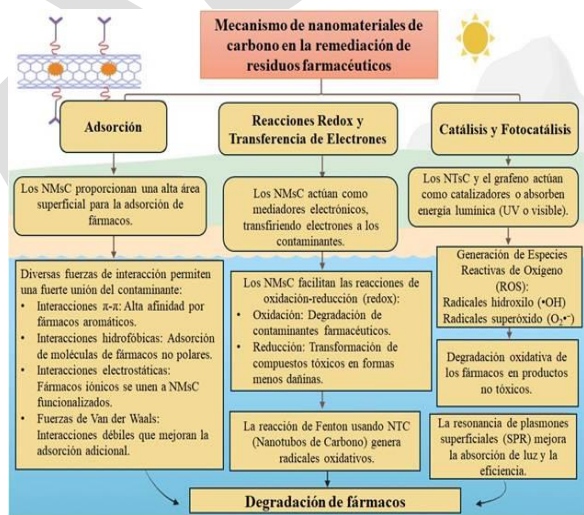


Figura 1. Mecanismo de NM_sC en la remediación de residuos farmacéuticos

(Mahalakshmi *et al.*, 2025).

Desde 2020, se han desarrollado nuevos compuestos que integran NM_sC con óxidos metálicos, polímeros y materiales biológicos para aumentar su eficiencia (Roshtkhari & Entezari, 2024). Un ejemplo son los nanocompuestos NiCo/NC, que logran la degradación total del azul de metileno en 60 minutos (Yang *et al.*, 2024). También han surgido nuevas generaciones de NM_sC como el grafeno dopado con heteroátomos, materiales de carbono mesoporosos y estructuras bioinspiradas, con mejoras en capacidad catalítica y de adsorción (Parambath *et al.*, 2023). Los NM_sC mesoporosos y los materiales bioinspirados de celulosa o lignina son opciones sostenibles y eficientes. La fotocatalisis basada en NM_sC es una estrategia sustentable para la degradación de residuos farmacéuticos, mejorando la eficiencia bajo luz visible (Harun-Ur-Rashid *et al.*, 2024). Los NM_sC son altamente adaptables para eliminar contaminantes específicos como antiinflamatorios, antibióticos y disruptores endocrinos.

En cuanto a aplicaciones, nanotubos de carbono funcionalizados con quitosano magnético han eliminado hasta el 98.1% de acetaminofén (Nabatian *et al.*, 2022), y también mostraron eficacia con diclofenaco y triclosán (Hu *et al.*, 2017). Membranas de NTC-Va exhibieron buena adsorción de 17 β -estradiol (Nguyen *et al.*, 2024), y perlas de quitosano-NTC eliminaron amoxicilina, ciprofloxacino y sulfametoxazol (Khumalo *et al.*, 2024). Membranas dopadas con óxido de grafeno (OG) lograron una eficiencia del 77% en la extracción de ibuprofeno (Ahmad *et al.*, 2021). La combinación de OG y MOFs (UiO-66) eliminó más del 90% de carbamazepina (Chen *et al.*, 2020).

El biocarbón es un adsorbente prometedor para contaminantes orgánicos e inorgánicos (Oliveira *et al.*, 2017), potenciado por la presencia de radicales libres que activan oxidantes (Ruan *et al.*, 2019). Aunque su capacidad de adsorción es limitada sin modificar, las

modificaciones químicas y físicas mejoran sus propiedades (Sivarasan *et al.*, 2023). Se ha investigado ampliamente su uso para antibióticos como norfloxacin y oxitetraciclina (Luo *et al.*, 2018; Peiris *et al.*, 2017). Además, el biocarbón modificado puede reducir la abundancia de genes de resistencia a antibióticos (Sun *et al.*, 2018). La adsorción con biocarbón es una técnica eficaz, de bajo costo y ecológica para eliminar CE, con investigaciones en curso sobre materiales derivados de residuos agrícolas y biomásas para buscar alternativas más económicas al carbón activado (Chen *et al.*, 2025).

Los materiales fotocatalíticos semiconductores, como los óxidos metálicos, son eficientes por su estabilidad y baja toxicidad (Saravanan *et al.*, 2017). El óxido de zinc (OZn) es destacado por su amplia brecha de banda (Mirzaei *et al.*, 2016). Las nanopartículas de OZn biogénicas sintetizadas ecológicamente han demostrado alta pureza y eficacia en la degradación de amoxicilina y paracetamol (Mohamed Isa *et al.*, 2021). Las nanopartículas de dióxido de titanio dopadas con cerio (Ce-TiO₂) también han explorado su actividad fotocatalítica para degradar antibióticos como la espiramicina (Khan, 2025).

Los materiales celulósicos también son relevantes. La nanocelulosa obtenida por oxidación de celulosa ha mostrado un 27% de adsorción de ciprofloxacina, evidenciando su potencial en tratamientos terciarios de agua (Sulbarán-Rangel *et al.*, 2019).

Otros materiales incluyen el peryodato (PI), un oxidante prometedor por su estabilidad y seguridad (Figura 2) (Merouani & Hamdaoui, 2021). Los Procesos de Oxidación Avanzada con Peryodato (POA-PI) son una tecnología eficaz para eliminar contaminantes emergentes, ya que activan el PI para generar especies reactivas que degradan los contaminantes sin subproductos tóxicos, operando eficientemente en un amplio rango de pH (Chen *et al.*, 2025).



Figura 2. Diagrama esquemático del método de activación del peryodato (Chen *et al.*, 2025).

Además, un nuevo material compuesto de alginato de sodio y arcilla montmorillonita ha logrado una alta eficiencia (91%) en la adsorción de paracetamol, con una capacidad máxima de 122 mg/g y alcanzando el equilibrio en una hora (Allaoui *et al.*, 2025).

Distribución geográfica y estado actual del monitoreo de contaminantes emergentes en México

La infraestructura para el análisis de contaminantes en México se concentra en centros de investigación con sedes en las zonas metropolitanas de Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Guanajuato y San Luis Potosí. Estos laboratorios cuentan con capacidad para aplicar técnicas como LC-MS/MS y, en menor medida, LC-HRMS y biosensores. Esta representación geográfica permite identificar las regiones con mayor desarrollo tecnológico, así como la necesidad de fortalecer las capacidades regionales para el fortalecimiento del monitoreo ambiental equitativo y descentralizado. La Tabla 1 muestra la capacidad de cada institución para el análisis de contaminantes emergentes y su localización. Cabe mencionar que los estados que alojan estos laboratorios de cuantificación, independientemente del método empleado, han liderado los esfuerzos del monitoreo.

346 **Tabla 1.** Técnicas reportadas para la cuantificación de contaminantes emergentes por
347 institución.

Institución / Laboratorio	Ubicación	Técnicas reportadas	Aplicaciones / Contaminantes
IMTA-Laboratorio de Calidad del Agua	Jiutepec, Morelos	LC-MS/MS, GC-MS, HPLC-UV, ICP-OES	Fármacos, hormonas, antibióticos en agua superficial y residual
INECC-Laboratorio de Química Ambiental y Bioensayos	CDMX	GC-MS, GC-MS/MS, HPLC-MS/MS, ICP-MS, bioensayos	Pesticidas, VOCs, residuos farmacéuticos, metales
CINVESTAV-IPN-Laboratorio de Metabolómica y EM	CDMX	LC-MS/MS, HRMS, CE-MS, metabolómica	Análisis avanzado de compuestos orgánicos y fármacos
IPICYT-LANBAMA / LINAN	San Luis Potosí	SPE-GC-MS, ICP-MS, análisis	Contaminantes emergentes y de materiales avanzados nanomateriales, sensores
UANL-Facultad de Ciencias Químicas	Monterrey, NL	SPE + LC-MS/MS, GC-MS	Antibióticos en aguas hospitalarias
UNAM-Facultad de Química / ICyQS	CDMX	HPLC, GC, desarrollo de métodos	Plaguicidas, fármacos, disruptores endocrinos contaminantes
Tecnológico de Monterrey - MARTEC	Monterrey, NL	LC-MS/MS, sensores ópticos y biosensores	Monitoreo ambiental, desarrollo de sensores
CIATEJ-Unidad Guadalajara	Guadalajara, Jalisco	SPME-GC-MS, análisis	Contaminantes en sistemas acuáticos urbanos
Universidad de Guanajuato- DCI	Guanajuato, Gto.	GC-MS, SPE, análisis de compuestos en agua residual	Evaluación de contaminantes en aguas residuales municipales

La bibliografía consultada muestra que los CE han sido detectados en prácticamente todos los tipos de aguas en el país. En aguas superficiales se han encontrado fármacos de uso común como antibióticos, antiinflamatorios, parabenos, entre muchos otros. Por ejemplo, analgésicos como el paracetamol se han encontrado en concentraciones de hasta 11,7 µg/L en ríos del centro de México (Rivera-Jaimes *et al.*, 2018). Otros contaminantes frecuentes en ríos y cuerpos de agua receptores son los antiinflamatorios no esteroideos, por ejemplo, en naproxeno y diclofenaco, con concentraciones de µg/L (Vázquez-Tapia *et al.*, 2022). Asimismo, se ha reportado la aparición de disruptores endocrinos como el 4-nonilfenol en cauces de ríos en concentraciones de ng/L y en embalses de presas donde este compuesto se cuantificó en decenas de µg/L (Isaac-Olivé & Navarro-Frómeta, 2017; Rivera-Jaimes *et al.*, 2018).

Las fuentes de agua residuales, como las municipales y las hospitalarias, son focos importantes de contaminantes emergentes. Diversos estudios realizados en México reportan una amplia gama de fármacos y compuestos químicos en concentraciones de cientos a miles de ng/L, como se muestra en la Tabla 2. Estos hallazgos son fundamentales para confirmar que las aguas residuales actúan como una fuente primaria de introducción de estos contaminantes a los medios acuáticos.

Respecto a las aguas subterráneas, los hallazgos demuestran la presencia de residuos de pesticidas y alquilfenoles (niveles superiores a los 2.7 µg/L) en pozos destinados al de regiones agrícolas áridas de Baja California (González-Acevedo *et al.*, 2019). En el estado de Hidalgo, reportan la infiltración de contaminantes derivada del riego con aguas residuales, lo que ha llevado a concentraciones elevadas en el acuífero del Valle del Mezquital (107,000 ng/L de metformina) (Lesser *et al.*, 2018). Los cenotes y pozos de Yucatán también presentan vulnerabilidad, ya que se han encontrado plaguicidas organoclorados y compuestos

373 orgánicos volátiles en concentraciones, respectivamente. Este trabajo muestra, que incluso
374 en ecosistemas costeros y marinos, son alcanzados por el estos compuestos traza (Perera-
375 Rios *et al.*, 2022).

376

ASAP

Tabla 2. Contaminantes emergentes y concentraciones encontradas en distintos estados de México

Estado	Contaminante(s)	Concentración (ng/L)	Matriz de muestreo	Método analítico	Referencia / Autor(es)
Estado de México	Paracetamol	3–11,660	Agua superficial	HPLC-MS/MS	(Rivera-Jaimes <i>et al.</i> , 2018; Pérez-Coyotl <i>et al.</i> , 2019)
Baja California	Alquilfenoles, pesticidas	>2700	Pozos agrícolas	GC-MS	(González-Acevedo <i>et al.</i> , 2019)
Morelos	Naproxeno (4,880 ng/L), Acetaminofén (4,460 ng/L), Bezafibrato (2,100 ng/L), Diclofenaco (1,398 ng/L), etc.	Concentraciones específicas mencionadas	Agua superficial	HPLC-MS/MS	(Rivera-Jaimes <i>et al.</i> , 2018)
Hidalgo	Paracetamol	612–67,200	Aguas subterráneas y residuales	HPLC-MS/MS	(Lesser <i>et al.</i> , 2018)
	Metformina	10.3–107,000			
Morelos	Atenolol	400–4,600	Aguas residuales	HPLC-MS/MS	(Rivera-Jaimes <i>et al.</i> , 2018)
Morelos	EE2 (etinilestradiol), 4-	EE2: hasta 320	Río Apatlaco	GC-MS	(Rivera-Jaimes <i>et al.</i> , 2018)

	nonilfenol					
Jalisco	Diclofenaco, Ibuprofeno, Naproxeno	3600–5600		Aguas residuales urbanas y agrícolas	HPLC-MS/MS	(Arguello-Pérez <i>et al.</i> , 2019)
Ciudad de México	Ibuprofeno, triclosán, bisfenol A, estradiol	ND–400		Aguas superficiales y residuales	SPE + HPLC-MS/MS	(Vázquez-Tapia <i>et al.</i> , 2022)
Estado de México	Penicillin, Glibenclamida	272; 1584		Aguas residuales	HPLC-MS/MS	(Pérez-Coyotl <i>et al.</i> , 2019)
Hidalgo	Carbamazepina	3.21–42,800		Efluente de PTAR	HPLC-MS/MS	(Garduño-Jiménez <i>et al.</i> , 2023)
Guerrero	Sulfametoxazol, Ciprofloxacina, Norfloxacin, Ofloxacina	SMX: 153–232 ng/L; CIP: 1,717–2,733 ng/L; NOR: 43–46; OFL: 292–339 ng/L		Aguas influentes/efluente PTAR	SPE + LC-MS/MS	(Martínez-Organiz <i>et al.</i> , 2021)

Guerrero	Carbamazepina, Oxcarbazepina, Levofloxacina, Nalidíxico, Lidocaína, Tridemorf Acetaminofén, ampicilina, atenolol, cafeína, enalapril, ketoprofeno, loratadina, losartan, omeprazol, oxcarbamazepina, sulfametoxazol,	Detectados cualitativamente	Aguas influentes/efluen te PTAR	LC-HRMS (SWATH non-target)	(Martínez-Organiz <i>et al.</i> , 2021)
Nuevo León	ibuprofeno y naproxeno	370- 51,220	Agua residual de hospital	LC-MS/MS	(Hernández-Ramírez <i>et al.</i> , 2021)
Querétaro	Naproxeno	1–62,500	Organismo (Xenopus laevis)	Estudio toxicológico laboratorio	(Islas-Flores <i>et al.</i> , 2019) en

Quintana Roo	Cafeína, triclosán, paracetamol	Cafeína: hasta 5,000	Cenotes y sistemas costeros	Muestreo pasivo + LC-MS	(Leal-Bautista <i>et al.</i> , 2011)
Yucatán	Plaguicidas organoclorados endosulfán, VOCs cloroformo, bromoformo)	Tolueno: 21.4 µg/L; Cloroformo: 96.1 µg/L; Bromoformo: 103.2 µg/L	Agua subterránea (cenotes, pozos), agua superficial	GC-MS / GC-HRMS	(Hernández-Ramírez <i>et al.</i> , 2021; Perera-Ríos <i>et al.</i> , 2022; Polanco Rodríguez <i>et al.</i> , 2022)
Tlaxcala / Puebla	Nonilfenol, pesticidas	Entre 310 y 15320 ng/L	Aguas superficiales de ríos y presas	LC-MS/MS and LC-MS	(Isaac-Olivé & Navarro-Frómata, 2017)
Durango	Ibuprofeno, paracetamol, naproxeno, acesulfame-K, sulfametoxazol, trimetoprim,	Concentraciones en efluentes	Aguas residuales en una PTAR	SPE + UPLC-MS/MS	(Bracamontes-Ruelas <i>et al.</i> , 2025)

propilparabeno,

isopropilparabeno,

etilparabeno, cafeína,

DEET, Ciprofloxacino,

triclosán

ASAP

Limitaciones metodológicas y propuesta de estandarización para el análisis de contaminantes emergentes

Las investigaciones realizadas en México revelan una notable heterogeneidad respecto a los métodos analíticos utilizados en la detección y cuantificación de CE en los distintos cuerpos de agua (Torres *et al.*, 2023).

Paralelamente, algunos grupos de investigación han aplicado métodos no convencionales. Por ejemplo, el uso de la microextracción en fase sólida acoplada a GC-MS (SPME-GC-MS), esto para la determinación simultánea de diversos fármacos y productos de cuidado personal presentes en aguas residuales (Peña-Álvarez & Castillo-Alanís, 2015). Incluso, en investigaciones más recientes, se ha propuesto el uso de biosensores e inmunoensayos *in situ* para la detección rápida de estos compuestos, aprovechando que se trata de una técnica portátil y específica (Flores-Contreras *et al.*, 2022). Asimismo, algunas estrategias analíticas emplean la espectrometría de masas de alta resolución sin separación cromatográfica previa, es decir, infusión directa acoplada a espectrómetros de tiempo de vuelo, lo que ofrece un análisis general de los contaminantes emergentes, sin embargo, se ve comprometida la selectividad (Kelly, 2012).

En la actualidad no existe un protocolo analítico unificado a nivel nacional para la detección y cuantificación de contaminantes emergentes, lo que ha originado una notable disparidad entre los diferentes estudios reportados; esto dificulta la comparabilidad de resultados entre regiones o instituciones. Asimismo, aunque se empleen técnicas similares, las condiciones experimentales varían. Por lo tanto, esta heterogeneidad metodológica, dificulta la integración de datos generados, la construcción de diagnósticos nacionales y regionales sólidos, por lo que se reduce la utilidad de la información para la gestión ambiental y decisiones regulatorias, ya que México no cuenta con lineamientos normativos específicos

para los contaminantes emergentes, ni criterios de desempeño analítico estandarizados (Acuña-Bedoya *et al.*, 2025).

Aunque México aún carece de un marco regulatorio, a nivel internacional existen metodologías estandarizadas que sirven de referencia técnica. Por ejemplo, la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) desarrolló métodos para la detección de fármacos y hormonas en diferentes matrices ambientales con técnicas como HPLC-MS/MS y HRGC/HRMS, respectivamente (US EPA, 2007; EPA, 2009). Estos marcos publicados por la EPA no son obligatorios y tampoco cuentan aún con validación amplia; sin embargo, fungen como base técnica en algunos países.

La ausencia de un marco técnico, normativo-regulatorio en México, tiene varias consecuencias. En primer lugar, se compromete la reproducibilidad de los hallazgos científicos, es decir, existen variaciones en el acondicionamiento de muestras, en condiciones instrumentales y en los procedimientos de calibración. En segundo lugar, se limita a realizar una comparativa entre regiones, lo que complica analizar el panorama nacional sobre la presencia, distribución y comportamiento de los distintos contaminantes emergentes. Desde el punto de vista regulatorio, la fragmentación y distribución de datos, generan en gran medida incertidumbre para definir criterios o límites permisibles para contaminantes emergentes, lo que, retrasa la incorporación en la Normas Oficiales Mexicanas (Jacobo-Marín & Santacruz de León, 2021).

Se recomienda implementar programas de intercalibración periódicos entre los laboratorios del territorio nacional para la evaluación de la consistencia de los resultados, la identificación de áreas de oportunidad y el fortalecimiento de las competencias técnicas del personal involucrado. Dadas estas razones, resultaría benéfico fomentar la colaboración entre laboratorios académicos, instituciones gubernamentales y privados involucrados en el tema

de contaminantes emergentes; esto permitiría intercambio de información (métodos, materiales de referencia y datos de fondo) con la finalidad de evitar la duplicidad de esfuerzos. Asimismo, la colaboración de este tipo facilita la sincronización de campañas de monitoreo, elaboración de bases de datos comparables y, en consecuencia, el fortalecimiento de un sistema nacional de vigilancia confiable y eficiente.

El análisis se basó en estudios publicados y documentos de acceso público, por lo que la disponibilidad de información pudo condicionar la representatividad de los hallazgos, especialmente en regiones del país con menor producción científica sobre contaminantes emergentes. Asimismo, la heterogeneidad entre los estudios revisados, relacionada con las matrices ambientales evaluadas, los métodos de extracción, las técnicas instrumentales empleadas y las unidades de reporte, limita la comparación directa de los resultados. Además, algunos trabajos no proporcionan información completa sobre parámetros de validación analítica, como límites de detección, límites de cuantificación, recuperación de analitos o control de calidad, lo que restringe la posibilidad de realizar una síntesis cuantitativa más robusta. No obstante, la revisión permite reconocer tendencias generales, identificar vacíos metodológicos y establecer necesidades prioritarias para fortalecer el monitoreo de contaminantes emergentes en México.

En este contexto, la revisión evidencia avances importantes en México en el monitoreo de contaminantes emergentes en cuerpos de agua, particularmente mediante técnicas analíticas como LC-MS/MS y GC-MS/MS. Sin embargo, la falta de lineamientos nacionales estandarizados limita la comparabilidad de los estudios y dificulta la construcción de diagnósticos integrados. Por ello, resulta necesario armonizar los protocolos analíticos, fortalecer las capacidades técnicas del país y generar información confiable que apoye la vigilancia ambiental y la toma de decisiones regulatorias.

Por otro lado, las tecnologías emergentes, como los biosensores y los materiales aplicados en plataformas de detección, muestran un amplio potencial para complementar el monitoreo convencional y ampliar el acceso a herramientas de vigilancia ambiental. La sistematización de la evidencia recopilada en esta revisión constituye una base de consulta útil para orientar nuevas investigaciones, fortalecer las capacidades analíticas existentes y avanzar hacia una gestión más eficiente, preventiva y equitativa de los riesgos asociados a los contaminantes emergentes en México.

Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

CML = Coraquetzali Magdaleno-López

DIR = Diana Ibarra-Rodríguez

IPHR = I. Paz Hernández-Rosales

JMOC = Juan Manuel Osuna-Cabanillas

JACM = José Antonio Cabello-Méndez

Conceptualization: CML, DIR

Data curation: CML, DIR, IPHR

Formal Analysis: CML, DIR, IPHR

Funding acquisition: CML, DIR, IPHR, JMOC, JACM

Investigation: CML, DIR, IPHR, JMOC, JACM

Methodology: CML, DIR, IPHR

Project administration: CML, DIR

Resources: DIR, JMOC, JACM

Software: CML, DIR, IPHR, JMOC, JACM

Supervision: DIR, JMOC

Validation: DIR, JMOC, JACM

Visualization: CML, DIR, IPHR

Writing – original draft: CML, DIR, IPHR

AGRADECIMIENTOS

Los autores no reportan fuentes de financiamiento externo y agradecen el respaldo institucional recibido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña-Bedoya, J. D., Borja-Maldonado, F., Herrera-Domínguez, M., & López Zavala, M. Á. (2025). Current situation of emerging contaminants in Mexican waters and treatment perspectives. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 46, 100636.
- Aguilar-Aguilar, A., de León-Martínez, L. D., Forgionny, A., Acelas Soto, N. Y., Mendoza, S. R., & Zárate-Guzmán, A. I. (2023). A systematic review on the current situation of emerging pollutants in Mexico: A perspective on policies, regulation, detection, and elimination in water and wastewater. *Science of The Total Environment*, 905, 167426.
- Ahmad, A. L., Ebenezer, O. I., Shoparwe, N. F., & Ismail, S. (2021). Graphene oxide-doped polymer inclusion membrane for remediation of pharmaceutical contaminant of emerging concerns: ibuprofen. *Membranes*, 12, 24.
- Allaoui, I., Et-Tanteney, R., Barhdadi, I., Elmourabit, M., Arfoy, B., Draoui, Y., Hadri, M., & Draoui, K. (2025). Development and characterization of pyrolyzed sodium alginate–montmorillonite composite for efficient adsorption of emerging pharmaceuticals: experimental and theoretical insights. *Ceramics*, 8, 60.

- Arguello-Pérez, M. Á., Mendoza-Pérez, J. A., Tintos-Gómez, A., Ramírez-Ayala, E., Godínez-Domínguez, E., & Silva-Bátiz, F. de A. (2019). Ecotoxicological Analysis of emerging contaminants from wastewater discharges in the coastal zone of Cihuatlán (Jalisco, Mexico). *Water*, *11*, 1386.
- Borges-Ramírez, M. M., Escalona-Segura, G., Huerta-Lwanga, E., Iñigo-Elias, E., & Osten, J. R. (2021). Organochlorine pesticides, polycyclic aromatic hydrocarbons, metals and metalloids in microplastics found in regurgitated pellets of black vulture from Campeche, Mexico. *Science of The Total Environment*, *801*, 149674.
- Bracamontes-Ruelas, A. R., Ibarra-Rodríguez, D., Rodríguez-Campos, J., Velázquez-Fernández, J. B., Reyes-Vidal, Y., & Reynoso-Cuevas, L. (2025). Evaluation of the presence of emerging contaminants in a municipal wastewater treatment plant in Durango, Mexico. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *11*, 101218.
- Castro-Ortíz, P., Luna-Pabello, V. M., & Villalobos-Pietrini, R. (2007). Estado del arte y perspectivas del uso de biosensores ambientales en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *23*, 35–45.
- Chen, D., Sun, H., Wang, Y., Quan, H., Ruan, Z., Ren, Z., & Luo, X. (2020). UiO-66 derived zirconia/porous carbon nanocomposites for efficient removal of carbamazepine and adsorption mechanism. *Applied Surface Science*, *507*, 145054.
- Chen, X., Zhuo, Y., Huang, X., Qin, T., Peng, H., Yang, J., & Zhou, Y. (2025). Applications of periodate activation for emerging contaminants treatment in water: Activation methods, reaction parameters and mechanism. *Environmental Research*, *271*, 121088.
- de Anda, J., & Shear, H. (2021). Sustainable Wastewater Management to Reduce Freshwater Contamination and Water Depletion in Mexico. *Water*, *13*, 2307.

- EPA. (2009). *United States Environmental Protection Agency Occurrence of Contaminants of Emerging Concern in Wastewater From Nine Publicly Owned Treatment Works*.
- Espinoza, B. (2025). *Desarrollan sensor detector de contaminantes de aguas por residuos de medicamentos*. Universidad de Sonora.
- European Union. (2013). *Directive 2013/39/EU amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC*.
- Félix-Cañedo, T. E., Durán-Álvarez, J. C., & Jiménez-Cisneros, B. (2013). The occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources. *Science of The Total Environment*, 454–455, 109–118.
- Feng, G., Huang, H., & Chen, Y. (2021). Effects of emerging pollutants on the occurrence and transfer of antibiotic resistance genes: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126602.
- Flores-Contreras, E. A., González-González, R. B., González-González, E., Melchor-Martínez, E. M., Parra-Saldívar, R., & Iqbal, H. M. N. (2022). Detection of Emerging Pollutants Using Aptamer-Based Biosensors: Recent Advances, Challenges, and Outlook. *Biosensors*, 12, 1078.
- Galindo-Miranda, J. M., Guízar-González, C., Becerril-Bravo, E. J., Moeller-Chávez, G., León-Becerril, E., & Vallejo-Rodríguez, R. (2019). Occurrence of emerging contaminants in environmental surface waters and their analytical methodology – a review. *Water Supply*, 19, 1871–1884.
- Garduño-Jiménez, A.-L., Durán-Álvarez, J.-C., Ortori, C. A., Abdelrazig, S., Barrett, D. A., & Gomes, R. L. (2023). Delivering on sustainable development goals in wastewater reuse for agriculture: Initial prioritization of emerging pollutants in the Tula Valley, Mexico. *Water Research*, 238, 119903.

- Gomes, I. B., Maillard, J.-Y., Simões, L. C., & Simões, M. (2020). Emerging contaminants affect the microbiome of water systems—strategies for their mitigation. *Npj Clean Water*, 3, 39.
- González-Acevedo, Z. I., García-Zarate, M. A., & Flores-Lugo, I. P. (2019). Emerging contaminants and nutrients in a saline aquifer of a complex environment. *Environmental Pollution*, 244, 885–897.
- Harun-Ur-Rashid, M., Pal, K., & Imran, A. Bin. (2024). Hybrid Nanocomposite Fabrication of Nanocatalyst with Enhanced and Stable Photocatalytic Activity. *Topics in Catalysis*, 67, 17–45.
- Hernández-Ramírez, A., Hernández-Tenorio, R., Hinojosa-Reyes, L., Ramos-Delgado, N., & Guzmán-Mar, J. L. (2021). Determination of Pharmaceuticals Discharged in Wastewater from a Public Hospital Using LC-MS/MS Technique. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 65, 94-108.
- Hernández-Vargas, G., Sosa-Hernández, J., Saldarriaga-Hernández, S., Villalba-Rodríguez, A., Parra-Saldivar, R., & Iqbal, H. (2018). Electrochemical Biosensors: A Solution to Pollution Detection with Reference to Environmental Contaminants. *Biosensors*, 8, 29.
- Hu, X., Cheng, Z., Sun, Z., & Zhu, H. (2017). Adsorption of Diclofenac and Triclosan in Aqueous Solution by Purified Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26, 87–95.
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 21676:2018. *Water quality- Determination of the dissolved fraction of selected active pharmaceutical ingredients, transformation products and other organic substances in water and treated waste water- Method using high performance liquid chromatography and mass spectrometric detection*

- (HPLC-MS/MS or-HRMS) after direct injection. International Organization for Standardization, Geneva.
- Isaac-Olivé, K., & Navarro-Frómata, A. E. (2017). *Detection of Pharmaceuticals in the Environment*. The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 66. Springer, Cham, pp. 57-74.
- Islas-Flores, H., Pérez-Alvarez, I., Gómez-Oliván, L. M., & Juan-Reyes, N. S. (2019). Embryotoxicity and Teratogenicity Induced by Naproxen in *Xenopus laevis*, Species of Ecological Interest in Mexico. *Pollution of Water Bodies in Latin America*. Springer International Publishing, Cham, pp. 55-66.
- Jacobo-Marín, D., & Santacruz de León, G. (2021). Emerging contaminants in water: Regulation in Mexico, precautionary principle and comparative perspective. *Revista de Derecho Ambiental (Chile)*, 15, 51–75.
- Kelly, T. (2012). Clarke's analysis of drugs and poisons. Fourth edition. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 44, 213–214.
- Khan, H. (2025). Cerium-Doped Titanium Dioxide (CeT) Hybrid Material, Characterization and Spiramycin Antibiotic Photocatalytic Activity. *Catalysts*, 15, 512.
- Khumalo, S. M., Bakare, B. F., & Rathilal, S. (2024). Single and multicomponent adsorption of amoxicillin, ciprofloxacin, and sulfamethoxazole on chitosan-carbon nanotubes hydrogel beads from aqueous solutions: Kinetics, isotherms, and thermodynamic parameters. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 13, 100404.
- Krishnan, R. Y., Manikandan, S., Subbaiya, R., Karmegam, N., Kim, W., & Govarthan, M. (2023). Recent approaches and advanced wastewater treatment technologies for mitigating emerging microplastics contamination – A critical review. *Science of The Total Environment*, 858, 159681.

- Leal-Bautista, R. M., Hernández-Zárate, G., Jaime M, N. A., Cuevas R, G., & Velázquez Oliman, G. (2011). Tropical and Subtropical Agroecosystems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 211–219.
- Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlknecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios-Piña, H. (2018). Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198, 510–521.
- Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., & Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420.
- López-Velázquez, K., Guzmán-Mar, J. L., Saldarriaga-Noreña, H. A., Murillo-Tovar, M. A., Hinojosa-Reyes, L., & Villanueva-Rodríguez, M. (2021). Occurrence and seasonal distribution of five selected endocrine-disrupting compounds in wastewater treatment plants of the Metropolitan Area of Monterrey, Mexico: The role of water quality parameters. *Environmental Pollution*, 269, 116223.
- Luo, J., Li, X., Ge, C., Müller, K., Yu, H., Huang, P., Li, J., Tsang, D. C. W., Bolan, N. S., Rinklebe, J., & Wang, H. (2018). Sorption of norfloxacin, sulfamerazine and oxytetracycline by KOH-modified biochar under single and ternary systems. *Bioresource Technology*, 263, 385–392.
- Mahalakshmi, D., J, N., Karthikeyan, E., Karthik, K. K., Sujaritha, J., Vandhana, V., & Lokeshwar, R. (2025). Carbon nanomaterials for emerging contaminant remediation: Addressing pharmaceutical pollution in the water cycle with precision. *Water Cycle*, 6, 449–472.

- Martínez-Organiz, Á., Bravo, J. E. B., Llompart, M., Dagnac, T., Pablo Lamas, J., Vázquez, L., & Sampedro-Rosas, L. (2021). Emerging pollutants and antibiotics removed by conventional activated sludge followed by ultraviolet radiation in a municipal wastewater treatment plant in Mexico. *Water Quality Research Journal*, 56, 167–179.
- Medrano, L. C., Flores-Aguilar, J. F., Islas, G., Rodríguez, J. A., & Ibarra, I. S. (2019). Solid-Phase Extraction and Large-Volume Sample Stacking-Capillary Electrophoresis for Determination of Artificial Sweeteners in Water Samples. *Food Analytical Methods*, 12, 526–533.
- Meena, V., Swami, D., Chandel, A., Joshi, N., & Prasher, S. O. (2025). Selected emerging contaminants in water: Global occurrence, existing treatment technologies, regulations and associated risk. *Journal of Hazardous Materials*, 483, 136541.
- Merouani, S., & Hamdaoui, O. (2021). UV/Periodate Advanced Oxidation Process: Fundamentals and Applications. *Applied Water Science*. Wiley, pp. 215–248
- Mirzaei, A., Chen, Z., Haghighat, F., & Yerushalmi, L. (2016). Removal of pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds from water by zinc oxide-based photocatalytic degradation: A review. *Sustainable Cities and Society*, 27, 407–418.
- Mohamed Isa, E. D., Shameli, K., Ch'ng, H. J., Che Jusoh, N. W., & Hazan, R. (2021). Photocatalytic degradation of selected pharmaceuticals using green fabricated zinc oxide nanoparticles. *Advanced Powder Technology*, 32, 2398–2409.
- Mohapatra, S., Yutao, L., Goh, S. G., Ng, C., Luhua, Y., Tran, N. H., & Gin, K. Y.-H. (2023). Quaternary ammonium compounds of emerging concern: Classification, occurrence, fate, toxicity and antimicrobial resistance. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130393.
- Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Fourmentin, M., Ribeiro, A. R. L., Noutsopoulos, C., Mapelli, F., Fenyvesi, É., Vieira, M. G. A., Picos-Corrales, L. A., Moreno-Piraján, J. C.,

- Giraldo, L., Sohajda, T., Huq, M. M., Soltan, J., Torri, G., Magureanu, M., Bradu, C., & Crini, G. (2022). Removal of emerging contaminants from wastewater using advanced treatments. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 1333–1375.
- Nabatian, E., Dolatabadi, M., & Ahmadzadeh, S. (2022). Application of experimental design methodology to optimize acetaminophen removal from aqueous environment by magnetic chitosan multi-walled carbon nanotube composite: Isotherm, kinetic, and regeneration studies. *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, 5, 61–74.
- Nguyen, M. N., Jue, M. L., Buchsbaum, S. F., Park, S. J., Vollnhals, F., Christiansen, S., Fornasiero, F., & Schäfer, A. I. (2024). Interplay of the forces governing steroid hormone micropollutant adsorption in vertically-aligned carbon nanotube membrane nanopores. *Nature Communications*, 15, 1114.
- Oliveira, F. R., Patel, A. K., Jaisi, D. P., Adhikari, S., Lu, H., & Khanal, S. K. (2017). Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, 246, 110–122.
- Padmachandran, A. V., Sreethu, N., Nasrin, F., Muthuchamy, M., & Muthukumar, A. (2023). Presence of microplastics in estuarine environment: a case study from Kavvayi and Kumbala backwaters of Malabar Coast, Kerala, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 41342–41354.
- Parambath, J. B. M., Abila, F., Arooj, M., & Mohamed, A. A. (2023). Doping matters in carbon nanomaterial efficiency in environmental remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 124921–124933.
- Parida, V. K., Saidulu, D., Majumder, A., Srivastava, A., Gupta, B., & Gupta, A. K. (2021). Emerging contaminants in wastewater: A critical review on occurrence, existing

- legislations, risk assessment, and sustainable treatment alternatives. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 105966.
- Peiris, C., Gunatilake, S. R., Mlsna, T. E., Mohan, D., & Vithanage, M. (2017). Biochar based removal of antibiotic sulfonamides and tetracyclines in aquatic environments: A critical review. *Bioresource Technology*, 246, 150–159.
- Peña-Álvarez, A., & Castillo-Alanís, A. (2015). Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas (MEFS-CG-EM). *TIP*, 18, 29–42.
- Peña-Guzmán, C., Ulloa-Sánchez, S., Mora, K., Helena-Bustos, R., Lopez-Barrera, E., Alvarez, J., & Rodriguez-Pinzón, M. (2019). Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. *Journal of Environmental Management*, 237, 408–423.
- Perera-Rios, J., Ruiz-Suarez, E., Bastidas-Bastidas, P. de J., May-Euán, F., Uicab-Pool, G., Leyva-Morales, J. B., Reyes-Novelo, E., & Pérez-Herrera, N. (2022). Agricultural pesticide residues in water from a karstic aquifer in Yucatan, Mexico, pose a risk to children's health. *International Journal of Environmental Health Research*, 32, 2218–2232.
- Pérez-Coyotl, I., Galar-Martínez, M., García-Medina, S., Gómez-Oliván, L. M., Gasca-Pérez, E., Martínez-Galero, E., Islas-Flores, H., Pérez-Pastén, B. R., Barceló, D., López de Alda, M., Pérez-Solsona, S., Serra-Roig, M. P., Montemurro, N., Peña-Herrera, J. M., & Sánchez-Aceves, L. M. (2019). Polluted water from an urban reservoir (Madín dam, México) induces toxicity and oxidative stress in *Cyprinus carpio* embryos. *Environmental Pollution*, 251, 510–521.

- Polanco Rodríguez, A. G., Araujo León, J. A., López Cetz, R., Long, D., Álvarez Cervera, F. J., Barache, U., & Rosas Sánchez, D. H. (2022). Organochlorine pesticides in the drinking water of Merida and its Metropolitan Zone, a Karst Region. *Urban Water Journal*, 19, 40–50.
- Puri, M., Gandhi, K., & Kumar, M. S. (2023). Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. *Journal of Environmental Management*, 332, 117344.
- Qin, R.-X., Fu, C.-Z., Zhuo, L., Zhang, S.-Y., Cai, F.-S., Wu, K.-Y., Yan, X., Luo, W.-K., Li, M., Shi, Y.-G., & Tang, B. (2025). Estimating wastewater emissions and environmental levels of typical organic contaminants based on regionalized modelling. *Environmental Research*, 270, 120965.
- Ramírez-Morales, D., Masís-Mora, M., Montiel-Mora, J. R., Cambronero-Heinrichs, J. C., Pérez-Rojas, G., Tormo-Budowski, R., Méndez-Rivera, M., Briceño-Guevara, S., Gutiérrez-Quirós, J. A., Arias-Mora, V., Brenes-Alfaro, L., Beita-Sandí, W., & Rodríguez-Rodríguez, C. E. (2021). Multi-residue analysis of pharmaceuticals in water samples by liquid chromatography- mass spectrometry: Quality assessment and application to the risk assessment of urban-influenced surface waters in a metropolitan area of Central America. *Process Safety and Environmental Protection*, 153, 289–300.
- Rathi, B. S., Kumar, P. S., & Show, P.-L. (2021). A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124413.
- Rebollar-Pérez, G., Campos-Terán, J., Ornelas-Soto, N., Méndez-Albores, A., & Torres, E. (2016). Biosensors based on oxidative enzymes for detection of environmental pollutants. *Biocatalysis*, 1, 118-129.

- Reichert, G., Hilgert, S., Fuchs, S., & Azevedo, J. C. R. (2019). Emerging contaminants and antibiotic resistance in the different environmental matrices of Latin America. *Environmental Pollution*, 255, 113140.
- Reynoso-Camargo, E. C., Chavarín-Pineda, Y., & Torres-Ramírez, E. (2023). Estudio sobre los contaminantes emergentes en México. *Revista MIX-TEC*, 3, 120-129.
- Rivera-Jaimes, J. A., Postigo, C., Melgoza-Alemán, R. M., Aceña, J., Barceló, D., & López de Alda, M. (2018). Study of pharmaceuticals in surface and wastewater from Cuernavaca, Morelos, Mexico: Occurrence and environmental risk assessment. *Science of The Total Environment*, 613–614, 1263–1274.
- Rodríguez-Narváez, O. M., Peralta-Hernández, J. M., Goonetilleke, A., & Bandala, E. R. (2017). Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chemical Engineering Journal*, 323, 361–380.
- Roshtkhari, M. B. M., & Entezari, M. H. (2024). Graphite/carbon-doped TiO₂ nanocomposite synthesized by ultrasound for the degradation of diclofenac. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 15105–15125.
- Ruan, X., Sun, Y., Du, W., Tang, Y., Liu, Q., Zhang, Z., Doherty, W., Frost, R. L., Qian, G., & Tsang, D. C. W. (2019). Formation, characteristics, and applications of environmentally persistent free radicals in biochars: A review. *Bioresource Technology*, 281, 457–468.
- Sánchez-Ocampo, E. M., Téllez-López, A. M., Islas-Flores, H., & Gómez-Oliván, L. M. (2022). Environmental laws and politics, the relevance of implementing regulation of the presence of emerging pollutants in Mexico: a systematic review. In *Water Emerging Contaminants and Nanoplastics* (Vol. 1, Issue 2). OAE Publishing Inc.
- Santillán, M. L. (2023). *Biosensores útiles en la detección de contaminantes emergentes*. UNAM.

- Saravanan, R., Gracia, F., & Stephen, A. (2017). *Basic Principles, Mechanism, and Challenges of Photocatalysis. Nanocomposites for Visible Light-Induced Photocatalysis*. Springer International Publishing, Cham, pp. 19-40
- Shabnum, S. S., Siranjeevi, R., Raj, C. K., Nivetha, P., & Benazir, K. (2025). A Comprehensive review on recent progress in carbon nanotubes for biomedical application. *Environmental Quality Management*, 34, e70040.
- Shyamalagowri, S., Shanthi, N., Manjunathan, J., Kamaraj, M., Manikandan, A., & Aravind, J. (2023). Techniques for the detection and quantification of emerging contaminants. *Physical Sciences Reviews*, 8, 2191–2218.
- Sivarasan, G., Manikandan, V., Periyasamy, S., AlSalhi, M. S., Devanesan, S., Murphin Kumar, P. S., Pasupuleti, R. Liu, X.R., & Lo, H.M. (2023). Iron-engineered mesoporous biocarbon composite and its adsorption, activation, and regeneration approach for removal of paracetamol in water. *Environmental Research*, 227, 115723.
- Sulbarán-Rangel, B. C., Madrigal Oliveira, A. E., Romero Arellano, V. H., & Guzmán González, C. A. (2019). Nanomateriales celulósicos para la adsorción de contaminantes emergentes. *Tecnura*, 23, 13–20.
- Sun, W., Gu, J., Wang, X., Qian, X., & Tuo, X. (2018). Impacts of biochar on the environmental risk of antibiotic resistance genes and mobile genetic elements during anaerobic digestion of cattle farm wastewater. *Bioresource Technology*, 256, 342–349.
- Tian, P., Tang, L., Teng, K.-S., & Lau, S.-P. (2024). Graphene quantum dots: preparations, properties, functionalizations and applications. *Materials Futures*, 3, 022301.
- Torres, A., Rodríguez, H. A., & Ayala, M. (2023). Contaminantes emergentes en México: panorama actual, retos y una posible solución biotecnológica. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 26, 1-20.

US EPA. (2007). *Method 1694: Pharmaceuticals and Personal Care Products in Water, Soil, Sediment, and Biosolids by HPLC/MS/MS*. <http://www.epa.gov/waterscience>

Vázquez-Tapia, I., Salazar-Martínez, T., Acosta-Castro, M., Meléndez-Castolo, K. A., Mahlknecht, J., Cervantes-Avilés, P., Capparelli, M. V., & Mora, A. (2022). Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review. *Chemosphere*, 308, 136285.

World Health Organization. (2023). *Drinking-water*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.

Yadav, D., Rangabhashiyam, S., Verma, P., Singh, P., Devi, P., Kumar, P., Hussain, C. M., Gaurav, G. K., & Kumar, K. S. (2021). Environmental and health impacts of contaminants of emerging concerns: Recent treatment challenges and approaches. *Chemosphere*, 272, 129492.

Yang, Z., Chen, Y.-W., Jin, Y.-F., Jin, Z., Xie, H.-S., Cong, X.-S., & Teng, D.-G. (2024). Ni, Co-Embedded MOF-Derived N-Doped Bimetallic Porous Carbon for Adsorption–Photocatalytic Degradation of Organic Dyes and Antibiotics. *ACS Omega*, 9, 11356–11365.

Received June 16, 2026

Accepted July 4, 2026.