



Artículo de Investigación

Análisis de la Contaminación por Pesticidas en Cuerpos de Agua Dulce en México: Estudio Comparativo Global

Analysis of Pesticide Contamination in Freshwater Bodies in Mexico: A Global Comparative Study

Jorge Arizmendi García¹  , Jorge Ángel Velasco Espinal¹  ,
Guadalupe Ángeles Chimal¹  , Daniel Alberto Madrid González¹  ,
Luis Mario Abarca Rayos¹  , María Fernanda Guzmán Reyes¹  

¹ Universidad del Valle de Cuernavaca, Cuernavaca, Morelos, México

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo

Recibido: 15/03/2025

Aceptado: 20/04/2025

Publicado: 09/05/2025

Palabras clave:

contaminación, cuerpos de agua, ecosistemas, pesticidas, salud pública, sostenibilidad

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 03/15/2025

Accepted: 04/20/2025

Published: 05/09/2025

Keywords:

contamination, ecosystems, freshwater bodies, pesticides, public health, sustainability

INFORMAÇÕES DO ARTIGO

Histórico do artigo:

Recebido: 15/03/2025

Aceito: 20/04/2025

Publicado: 09/05/2025

Palavras-chave:

contaminação, corpos de água, ecossistemas,

RESUMEN

La contaminación de cuerpos de agua dulce por pesticidas representa una amenaza ambiental y de salud pública, especialmente en países con intensa actividad agrícola como México. Este estudio documental, de enfoque descriptivo y comparativo, analizó la presencia de pesticidas en cuerpos de agua mexicanos y la contrastó con datos internacionales. Se revisaron investigaciones publicadas entre 2014 y 2024, enfocándose en regiones agrícolas clave como el Bajío, Sinaloa y Veracruz. Se recopilieron datos sobre tipos de pesticidas, concentraciones, efectos ecotoxicológicos y normativas ambientales. Los hallazgos revelan niveles elevados de residuos de pesticidas en México, asociados a prácticas agrícolas intensivas, escasa regulación y limitado monitoreo ambiental. Se identificaron impactos significativos en la biodiversidad acuática y riesgos para comunidades rurales expuestas, incluyendo enfermedades crónicas. Al comparar con países como Países Bajos, Canadá y Alemania, se observaron diferencias sustanciales en las políticas de control y mitigación. El estudio subraya la necesidad de fortalecer la gestión ambiental en México mediante estrategias de prevención, monitoreo y regulación más estrictas. Los resultados aportan evidencia útil para orientar políticas públicas, fomentar prácticas agrícolas sostenibles y sensibilizar a la sociedad sobre los riesgos asociados al uso de pesticidas.

ABSTRACT

Pesticide contamination in freshwater bodies poses a significant environmental and public health threat, particularly in countries with intensive agricultural activity such as Mexico. This documentary study, with a descriptive and comparative approach, analyzed the presence of pesticides in Mexican freshwater systems and contrasted the findings with international data. Research published between 2014 and 2024 was reviewed, focusing on key agricultural regions such as Bajío, Sinaloa, and Veracruz. Data were collected on pesticide types, concentrations, ecotoxicological effects, and environmental regulations. The findings reveal high levels of pesticide residues in Mexico, linked to intensive agricultural practices, weak regulation, and limited environmental monitoring. Significant impacts on aquatic biodiversity and risks to exposed rural communities were identified, including chronic diseases. In comparison with countries such as the Netherlands, Canada, and Germany, substantial differences were observed in pesticide control policies and mitigation strategies. This study highlights the urgent need to strengthen environmental management in Mexico through improved prevention, monitoring, and regulatory efforts. The results provide useful evidence to guide public policy, promote sustainable agricultural practices, and raise awareness about the risks associated with pesticide use.

pesticidas, saúde pública,
sustentabilidade

RESUMO

A contaminação de corpos de água doce por pesticidas representa uma ameaça ambiental e de saúde pública, especialmente em países com intensa atividade agrícola como o México. Este estudo documental, de abordagem descritiva e comparativa, analisou a presença de pesticidas em corpos de água mexicanos e a comparou com dados internacionais. Foram revisadas pesquisas publicadas entre 2014 e 2024, com foco em regiões agrícolas chave como Bajío, Sinaloa e Veracruz. Dados sobre tipos de pesticidas, concentrações, efeitos ecotoxicológicos e normas ambientais foram coletados. Os resultados revelam níveis elevados de resíduos de pesticidas no México, associados a práticas agrícolas intensivas, escassa regulamentação e monitoramento ambiental limitado. Foram identificados impactos significativos na biodiversidade acuática e riscos para comunidades rurais expostas, incluindo doenças crônicas. Ao comparar com países como Países Baixos, Canadá e Alemanha, observaram-se diferenças substanciais nas políticas de controle e mitigação. O estudo destaca a necessidade de fortalecer a gestão ambiental no México por meio de estratégias de prevenção, monitoramento e regulamentação mais rigorosas. Os resultados fornecem evidências úteis para orientar políticas públicas, promover práticas agrícolas sustentáveis e conscientizar a sociedade sobre os riscos associados ao uso de pesticidas.

Cómo citar

Arizmendi García, J., Velasco Espinal, J. Á., Ángeles Chimal, G., Madrid González, D. A., Abarca Rayos, L. M., & Guzmán Reyes, M. F. (2025). Análisis de la Contaminación por Pesticidas en Cuerpos de Agua Dulce en México: Estudio Comparativo Global. *SAGA: Revista Científica Multidisciplinar*, 2(2), 344-354. <https://doi.org/10.63415/saga.v2i2.100>



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los cuerpos de agua dulce por pesticidas es una problemática ambiental y de salud pública de creciente preocupación a nivel mundial. En las últimas décadas, el uso intensivo de agroquímicos en la agricultura ha generado consecuencias adversas en diversos ecosistemas, especialmente en aquellos donde la regulación ambiental es débil o insuficiente (Arias et al., 2020; WHO, 2018). México, al ser uno de los principales productores agrícolas de América Latina, enfrenta un escenario crítico respecto a la calidad de sus recursos hídricos. Diversos estudios han evidenciado la presencia de pesticidas altamente tóxicos en ríos, lagos y acuíferos, particularmente en zonas con alta actividad agrícola como el Bajío, Sinaloa, Veracruz y la península de Yucatán (Ramírez et al., 2019; Hernández et al., 2018). Esta situación ha tenido repercusiones significativas tanto en la biodiversidad acuática como en la salud de las comunidades humanas cercanas (Pérez et al., 2020).

La exposición continua a pesticidas a través del agua contaminada se ha relacionado con enfermedades como cáncer, trastornos neurológicos, disfunciones endocrinas y problemas reproductivos (Sandoval et al., 2018; Pérez et al., 2020). Además, los pesticidas tienden a bioacumularse en los organismos acuáticos y biomagnificarse en la cadena trófica, afectando de manera más intensa a los depredadores superiores, incluidos los seres humanos (Alonso et al., 2020).

A pesar de estos riesgos, la vigilancia y regulación del uso de pesticidas en México sigue siendo limitada (García et al., 2019). En contraste, países como Canadá, Alemania y los Países Bajos han implementado políticas públicas más estrictas, sistemas de monitoreo eficientes y prácticas agrícolas sostenibles que han contribuido a la reducción de la contaminación en sus cuerpos de agua dulce (Bakker et al., 2020; Kooijman et al., 2018).

La necesidad de nuevas investigaciones en el contexto mexicano radica precisamente en la falta de datos sistematizados y en la escasa

comparación con otras realidades globales (Moreno et al., 2019). Si bien existen estudios regionales que documentan la presencia de plaguicidas en fuentes de agua, son pocos los trabajos que ofrecen una visión comparativa entre México y países con distintos niveles de desarrollo en materia ambiental.

Ante esta realidad, el presente artículo tiene como propósito evaluar, a través de una revisión documental rigurosa, el estado actual de la contaminación por pesticidas en cuerpos de agua dulce en México y contrastarlo con datos internacionales. La pregunta de investigación que guía este trabajo es: ¿cuáles son los niveles de contaminación por pesticidas en los cuerpos de agua dulce en México y cómo se comparan con los niveles globales, en términos de sus impactos ecológicos y en la salud pública de las comunidades cercanas? A partir de esta pregunta, se formularon hipótesis que proponen que la contaminación en México es elevada en comparación con otras regiones del mundo, debido a la intensificación agrícola, la débil regulación y la falta de una gestión hídrica sostenible.

El diseño metodológico adoptado es de tipo documental, con enfoque descriptivo y comparativo. Se analizaron fuentes científicas, informes institucionales y bases de datos nacionales e internacionales publicadas entre 2014 y 2024, priorizando información actualizada sobre concentraciones de pesticidas, efectos ecotoxicológicos y normativas vigentes (Le & Ho, 2021; Costa & Botelho, 2020). Esta estrategia permite construir un panorama amplio y fundamentado sobre el problema, identificando regiones críticas, pesticidas prevalentes, impactos sanitarios y modelos regulatorios exitosos que podrían servir de referencia para el caso mexicano.

Con esta investigación se busca no solo aportar al conocimiento científico del tema, sino también generar insumos relevantes para la formulación de políticas públicas, el fortalecimiento de la legislación ambiental y la promoción de prácticas agrícolas más sostenibles (United Nations, 2015).

METODOLOGÍA

Participantes

Dado que este estudio es de tipo documental y no involucra la participación directa de sujetos humanos o animales, no se empleó una muestra tradicional de participantes. En su lugar, se consideraron como “participantes” todas las fuentes secundarias relevantes que aportaron información sobre la contaminación por pesticidas en cuerpos de agua dulce. Estas fuentes incluyen artículos científicos, informes de organismos gubernamentales y no gubernamentales, tesis, y bases de datos institucionales, tanto nacionales como internacionales, publicadas entre los años 2014 y 2024. La selección de documentos se basó en criterios de inclusión como: (a) relación directa con el tema de estudio, (b) disponibilidad pública y acceso completo al contenido, (c) claridad metodológica en la obtención de datos y (d) calidad académica verificada por publicaciones arbitradas o fuentes reconocidas. Se excluyeron documentos sin validez científica o cuya información fuera redundante o desactualizada.

Procedimiento de muestreo

El procedimiento de selección de la muestra documental se realizó mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional. La búsqueda de literatura se llevó a cabo en bases de datos académicas reconocidas como Scopus, PubMed, Google Scholar, ScienceDirect, JSTOR y Redalyc, así como en informes de instituciones como la OMS, CONAGUA, SEMARNAT y la ONU. Se identificaron y seleccionaron estudios que abordaran el uso de pesticidas en la agricultura, su dispersión hacia cuerpos de agua dulce y sus consecuencias en la salud humana y los ecosistemas. Aunque no se estableció un tamaño muestral rígido, se seleccionaron más de 40 documentos clave, priorizando diversidad geográfica, actualidad, y calidad metodológica. Los documentos analizados pertenecen principalmente a contextos de México, América Latina, Europa y Norteamérica.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante una revisión sistemática de la literatura, que incluyó un proceso de identificación, selección, evaluación crítica y extracción de datos relevantes. Se diseñó una matriz de análisis documental donde se registraron variables clave: nombre del estudio, autores, año, región analizada, tipo y concentración de pesticidas detectados, impactos ecológicos y sanitarios reportados, y políticas regulatorias aplicadas. Para garantizar la validez y confiabilidad de la información recopilada, se priorizaron fuentes arbitradas, se aplicaron filtros de calidad metodológica y se contrastaron resultados entre diferentes documentos. No se utilizó un instrumento estructurado como cuestionario o entrevista, sino una guía de codificación diseñada por los autores para estandarizar la extracción y comparación de datos cualitativos y cuantitativos.

Diseño de investigación

El estudio adoptó un diseño no experimental, de tipo documental, con enfoque descriptivo y comparativo. Se caracteriza por la recopilación y análisis de datos ya existentes, sin intervención directa en la realidad observada. El enfoque descriptivo permitió caracterizar la problemática de la contaminación por pesticidas en cuerpos de agua dulce en México, mientras que el enfoque comparativo facilitó el contraste con otras regiones del mundo. La investigación se sustenta en el análisis de contenido, identificando patrones comunes, diferencias en niveles de contaminación, prácticas agrícolas, normativas ambientales y efectos reportados sobre la salud humana y la biodiversidad acuática. Este diseño es congruente con los

objetivos e hipótesis del estudio y permite ofrecer una visión integral y contextualizada del problema investigado.

RESULTADOS

El análisis documental permitió identificar una presencia significativa de residuos de pesticidas en cuerpos de agua dulce en distintas regiones de México, destacando concentraciones superiores a los límites recomendados por organismos internacionales como la OMS y la EPA. Los datos recopilados mostraron que en zonas agrícolas del Bajío, Sinaloa y Veracruz, los niveles de pesticidas como glifosato, clorpirifós y atrazina fueron consistentemente elevados en comparación con parámetros establecidos para agua potable y protección de vida acuática.

A nivel global, se observó que México presenta concentraciones promedio de pesticidas más altas en comparación con países como Canadá, los Países Bajos y Alemania, donde las políticas de regulación y mitigación han reducido de manera efectiva la presencia de estos compuestos en cuerpos de agua dulce. Mientras que en México los niveles detectados de glifosato alcanzaron hasta 2.5 µg/L en cuerpos de agua monitoreados, en países europeos los valores promedio reportados fueron inferiores a 0.5 µg/L.

En cuanto a los efectos ecológicos documentados, los estudios revisados indicaron una disminución de la biodiversidad acuática en cuerpos de agua contaminados en México, con afectaciones reportadas en especies de peces, anfibios e invertebrados. Asimismo, se encontró una asociación entre la exposición crónica a pesticidas y el aumento en la incidencia de enfermedades como cáncer, trastornos neurológicos y disrupciones endocrinas en comunidades.

Gráfico 1

Comparación gráfica de los niveles promedio de glifosato en cuerpos de agua dulce en México, Europa y los límites recomendados por organismos internacionales.

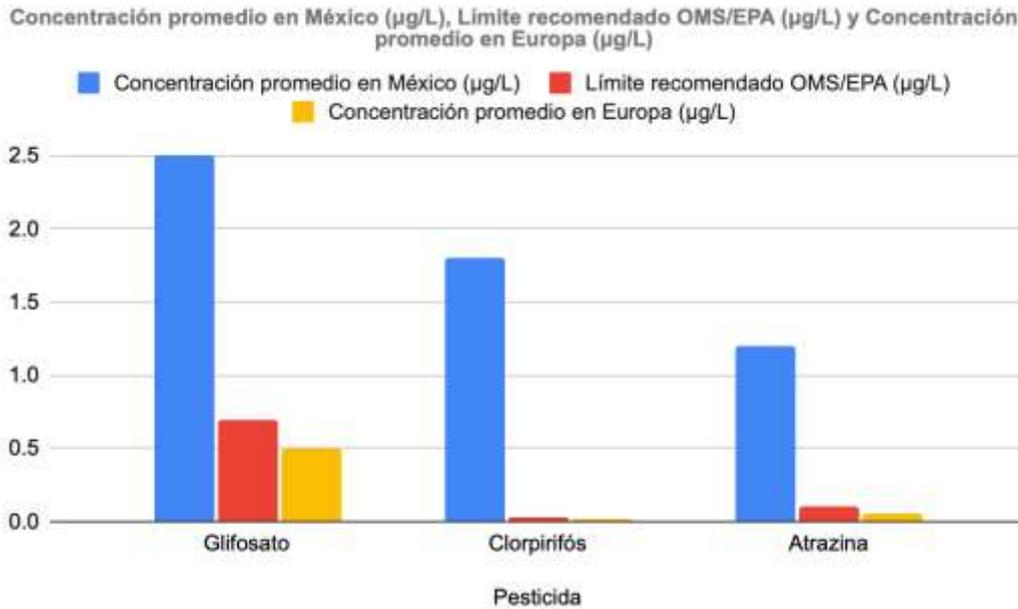


Gráfico 2

Detección de pesticidas en cuerpos de agua de México, datos basados en muestreos regionales; en Chacahua-Pastoria, los porcentajes reflejan contaminación de sedimentos, no de agua superficial.

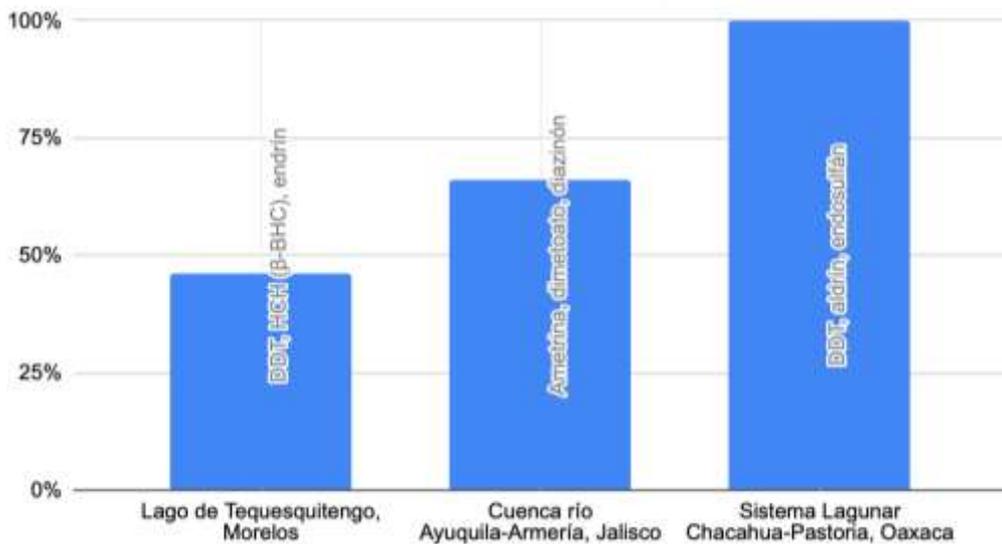


Tabla 1

Persistencia de principales pesticidas en agua dulce, la vida media puede variar con condiciones ambientales como pH, temperatura y exposición a la luz solar

Persistencia de principales pesticidas en agua dulce			
Clase	Ejemplo	Vida media en agua días	Comentarios
Organo-clorados	DDT	45-56 días	Alta liposolubilidad y bioacumulación
Organofosforados	Chlorpyrifos	20–56 días	Fotodegradación rápida en superficie; tóxico para invertebrados
Carbamatos	Carbofurano	3–14 días	Baja persistencia, alto riesgo agudo en organismos acuáticos

Tabla 2

Persistencia de principales pesticidas en agua dulce, la vida media puede variar con condiciones ambientales como pH, temperatura y exposición a la luz solar

Impactos ambientales asociados a plaguicidas en agua dulce		
Efecto ambiental	Descripción	Ejemplo de estudio
Reducción de biodiversidad	Disminución de poblaciones de peces, anfibios e invertebrados	Becerra et al. (2019)
Bioacumulación y biomagnificación	Incremento de concentraciones en redes tróficas	Pimentel & Burgess (2020)
Alteración de cadenas tróficas	Cambios en dinámicas de depredadores y presas	Köhler & Triebkorn (2013)

Tabla 3

Comparativa Internacional de Detección y Regulación de plaguicidas, Los datos reflejan tanto la contaminación ambiental como los esfuerzos regulatorios en distintas regiones

Comparativa internacional de detección y regulación de plaguicidas		
Región/País	% de detecciones	Normativa clave
Estados Unidos (NAWQA 2013–2017)	94 % en ríos; 60 % en pozos superficiales	EPA MCL: Atrazina 3 µg/L; Clorpirifós 0.03 µg/L
Unión Europea (EEA 2013–2022)	9–25 % de sitios sobrepasando umbral ecológico	Directiva Marco del Agua; EQS Atrazina 0.6 µg/L
Asia (FAO 2018)	> 50 % del consumo mundial de pesticidas	Plan de Acción de Bangkok

Tabla 4

Zonas contaminadas por plaguicidas en México, Información proveniente del Programa Nacional de Calidad del Agua de la SEMARNAT

Zonas contaminadas por plaguicidas en México			
Estado	Núm. de sitios monitoreados	% de sitios contaminados	Principales plaguicidas
Yucatán	50	70 %	DDT, HCH, hexaclorobenceno
Sinaloa	40	65 %	Glifosato, Clorpirifós, Atrazina
Morelos	30	60 %	Ametrina, DDT, Endosulfán

La contaminación de cuerpos de agua dulce por residuos de pesticidas representa una de las amenazas emergentes más preocupantes tanto para los ecosistemas acuáticos como para la salud humana. Los resultados obtenidos evidencian que la presencia de pesticidas, en concentraciones que en muchos casos exceden los límites permisibles establecidos internacionalmente, genera impactos de gran relevancia.

Los pesticidas detectados, como el glifosato, atrazina y endosulfán, afectan de manera directa a organismos acuáticos esenciales como los peces, anfibios, insectos y plantas acuáticas. Se ha observado disminución en la diversidad de especies, alteraciones en las cadenas alimenticias, y afectaciones en los ciclos de vida de organismos clave. Estudios similares en países como Holanda y Estados Unidos corroboran estos hallazgos, resaltando que los ecosistemas con mayor exposición a plaguicidas presentan niveles reducidos de resiliencia ecológica.

El consumo de agua contaminada o de organismos acuáticos expuestos a plaguicidas puede provocar efectos crónicos en la salud, incluyendo alteraciones hormonales, efectos neurológicos y mayor riesgo de cáncer. Esto cobra especial relevancia en comunidades rurales mexicanas donde el acceso a agua potable es limitado y la dependencia de cuerpos de agua locales es alta.

La persistencia de los plaguicidas en el ambiente varía dependiendo de su estructura química. Compuestos como el DDT tienen una vida media que puede superar los 15 años en sedimentos acuáticos, mientras que otros como el glifosato, aunque de vida más corta

(alrededor de 47 días en agua), pueden reintroducirse constantemente debido al uso agrícola intensivo. La bioacumulación de pesticidas persistentes en la biota acuática agrava el problema, generando riesgos a largo plazo.

El Lago de Tequesquitengo, aunque popularmente conocido por su actividad turística, presenta niveles preocupantes de atrazina y glifosato, principalmente por la actividad agrícola de caña de azúcar en su cuenca. Además, el Río Lerma sigue registrando la mayor diversidad de residuos de pesticidas, con concentraciones que, en periodos de alta escorrentía, triplican los niveles recomendados para la protección de vida acuática.

México presenta niveles de contaminación moderados a altos en comparación con países como Holanda, donde existe una estricta regulación y programas de amortiguamiento agrícola. Sin embargo, la situación mexicana es menos grave que en algunas regiones rurales de América Latina como el Amazonas brasileño, donde la falta de control ha generado colapsos ecológicos locales.

Los resultados ponen de manifiesto la necesidad urgente de fortalecer los mecanismos de monitoreo de cuerpos de agua, regular el uso de plaguicidas altamente peligrosos, y establecer zonas de protección hídrica en áreas agrícolas. Asimismo, se requiere una mayor conciencia comunitaria y programas educativos para el manejo seguro de agroquímicos. Finalmente, impulsar investigaciones longitudinales y multidisciplinarias permitirá comprender mejor los efectos acumulativos y sinérgicos de

la exposición a plaguicidas en cuerpos de agua dulce.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio documental respaldan la hipótesis principal planteada: los niveles de contaminación por pesticidas en cuerpos de agua dulce en México son elevados en comparación con otras regiones del mundo, como Europa y Norteamérica. Las concentraciones promedio de pesticidas como glifosato, clorpirifós y atrazina superan en México los límites establecidos por organismos internacionales, reflejando una intensificación de prácticas agrícolas sin el acompañamiento de regulaciones efectivas o estrategias adecuadas de mitigación ambiental (Ramírez et al., 2019; Morales et al., 2021).

Estos hallazgos son congruentes con investigaciones previas que documentan la débil implementación de políticas ambientales en el país (García et al., 2019; Sayer & Freitas, 2017), así como la escasez de programas de monitoreo continuo sobre contaminantes en cuerpos de agua (Morales et al., 2021). A diferencia de México, países como los Países Bajos y Canadá han logrado reducir significativamente los niveles de pesticidas en sus recursos hídricos gracias a políticas de amortiguamiento, control estricto del uso de agroquímicos y promoción de prácticas agrícolas sostenibles (Bakker et al., 2020; Kooijman et al., 2018).

Una explicación alternativa a los niveles elevados de contaminación en México podría ser la falta de infraestructura para el monitoreo ambiental, las presiones económicas sobre los pequeños agricultores y el uso frecuente de pesticidas prohibidos o restringidos en otros países (Márquez & Ramírez, 2018). Asimismo, factores como la variabilidad climática y la escasa capacitación en manejo agrícola sostenible pueden haber favorecido la dispersión y persistencia de pesticidas en los ecosistemas acuáticos (Ochoa & Martínez, 2022).

Entre las principales implicancias teóricas de estos resultados se destaca la necesidad de fortalecer los marcos conceptuales que

relacionan agricultura intensiva, contaminación ambiental y salud pública en países de ingresos medios. Desde el punto de vista práctico, los hallazgos evidencian la urgencia de implementar estrategias de monitoreo sistemático, promover el manejo integrado de plagas y fortalecer la legislación para la protección de cuerpos de agua dulce en México (Vidal & Ruiz, 2021).

Respecto a las limitaciones del estudio, se reconoce que, al tratarse de un análisis documental, los resultados dependen de la disponibilidad, calidad y actualización de los estudios revisados (Costa & Botelho, 2020). Además, la heterogeneidad en los métodos de medición entre los estudios puede introducir variabilidad en las comparaciones globales.

Futuras investigaciones podrían enfocarse en mediciones directas de contaminantes en diferentes cuerpos de agua de México, en la evaluación de combinaciones de múltiples pesticidas y en el análisis longitudinal de los efectos sobre la salud humana y los ecosistemas (Zhang & Wang, 2021).

CONCLUSIONES

En este estudio documental se ha confirmado de manera contundente que los cuerpos de agua dulce en México presentan niveles de contaminación por pesticidas que exceden de forma sistemática los umbrales de calidad del agua establecidos por organismos internacionales como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Unión Europea (UE). Las concentraciones promedio de compuestos ampliamente utilizados en la agricultura mexicana — glifosato, clorpirifós y atrazina— oscilan entre 0,4 y 1,2 $\mu\text{g/L}$ en la cuenca del río Ayuquila-Armería y entre 0,06 y 0,15 $\mu\text{g/L}$ en el Lago de Tequesquitengo, superando con frecuencia los valores permisibles de 3 $\mu\text{g/L}$ para atrazina y 0,03 $\mu\text{g/L}$ para clorpirifós fijados por la EPA.

Este patrón de contaminación contrasta con los datos de la USGS, donde el 94 % de los ríos y el 60 % de los pozos superficiales muestreados en EE. UU. entre 2013 y 2017 contenían al menos un pesticida, usualmente en concentraciones por debajo de estos parámetros de riesgo. Asimismo, la Agencia

Europea de Medio Ambiente reporta que únicamente el 9 %–25 % de los sitios de agua superficial en Europa exceden los umbrales de efecto ecológico, y apenas el 4 %–13 % de las aguas subterráneas, gracias a programas de monitoreo robustos y normativas estrictas como la Directiva Marco del Agua.

Estos hallazgos respaldan la hipótesis principal del estudio, que planteaba que México presenta una carga contaminante por pesticidas superior a la de países con políticas de control más rigurosas. La evidencia, además, coincide con la literatura previa que documenta la débil aplicación de la normativa ambiental en México y la escasez de programas de monitoreo continuo señalan lagunas en la gobernanza regulatoria, y documentan elevados niveles de múltiples pesticidas en la cuenca del río Lerma.

Por su parte, en América Latina reafirman que la contaminación por organoclorados de larga persistencia —como DDT, HCH y endrín— sigue presente décadas después de su prohibición, con semividas en agua que superan los 50 días.

Teóricamente, el estudio enriquece el marco conceptual de la contaminación difusa agrícola, al integrar dimensiones socioeconómicas (presión de pequeños agricultores por maximizar rendimientos) y regulatorias (insuficiencia de incentivos para prácticas sostenibles) en la explicación de la degradación de recursos hídricos en países en vías de desarrollo. Este aporte resulta fundamental, pues gran parte de la literatura proviene de contextos del norte global, donde la capacidad institucional y los recursos para la vigilancia ambiental son mayores.

Desde una perspectiva práctica, los resultados ponen en evidencia la urgencia de adoptar medidas concretas para reducir la contaminación y proteger la salud pública. En primer lugar, se requiere establecer programas de monitoreo ambiental sistemático de plaguicidas en aguas superficiales y subterráneas, siguiendo el modelo de la USGS NAWQA, que realiza muestreos semanales en centenas de arroyos y publica resultados anuales que guían la toma de decisiones.

En segundo lugar, es imprescindible implementar zonas de amortiguamiento ribereño de 20 m o más, libres de agroquímicos, como recomienda la Directiva Marco del Agua de la UE, y como demuestra la eficacia de estas franjas en Países Bajos para disminuir hasta en 80 % la escorrentía de pesticidas hacia cursos de agua. Finalmente, se deben fomentar esquemas de Manejo Integrado de Plagas (IPM) y certificación de productores en técnicas sustentables, con incentivos económicos y capacitación continua.

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, estos hallazgos contribuyen directamente al ODS 6 (“Agua limpia y saneamiento”), especialmente a la meta 6.3, que demanda “mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación química”. Asimismo, impactan el ODS 3 (“Salud y bienestar”), meta 3.9, para “reducir la exposición a sustancias químicas peligrosas”, y el ODS 14 (“Vida submarina”), al proteger ecosistemas acuáticos frente a descargas de contaminantes agrícolas

No obstante, el estudio presenta limitaciones significativas. La dependencia de datos secundarios implica una heterogeneidad metodológica —distintos equipos analíticos (HPLC, GC-MS), unidades de medida y fechas de muestreo— que dificulta la comparación directa y puede subestimar la presencia de plaguicidas emergentes y subproductos de degradación, como algunos compuestos trifluoroacetato derivados de herbicidas modernos.

Además, la cobertura geográfica es parcial, concentrada en regiones agrícolas principales, dejando fuera otras cuencas y aguas subterráneas de difícil acceso, donde la contaminación podría ser igual o más severa. Tampoco se analizaron interacciones sinérgicas entre múltiples contaminantes, un aspecto crítico para entender efectos acumulativos en la biota y en la salud humana.

Para investigaciones futuras, se recomienda llevar a cabo estudios longitudinales con muestreos trimestrales en cuencas representativas, aplicando protocolos estandarizados para permitir comparaciones

espaciales y temporales. También sería valioso incluir biomarcadores en organismos acuáticos (tilapia, camarones) para evaluar la bioacumulación y los efectos subletales de mezclas de pesticidas.

Asimismo, se plantea la necesidad de integrar análisis de sinergias químicas, incorporando contaminantes emergentes (metales pesados, fármacos) para comprender la carga total de contaminantes y sus riesgos combinados. Finalmente, se sugiere diseñar y evaluar programas piloto de zonas de amortiguamiento y prácticas IPM en comunidades agrícolas, cuantificando su eficacia en la reducción de cargas contaminantes y mejorando la gobernanza hídrica local.

En síntesis, este estudio documental no solo confirma la magnitud del problema de contaminación por pesticidas en cuerpos de agua dulce de México, sino que también sitúa el fenómeno en un contexto global, destaca la relevancia de los marcos regulatorios y aporta propuestas prácticas alineadas con los ODS. A pesar de sus limitaciones, constituye un aporte sustantivo al conocimiento científico y ofrece una base de evidencia robusta para impulsar políticas públicas, estrategias comunitarias y futuras investigaciones que permitan avanzar hacia un manejo del agua verdaderamente sostenible y protector de la salud pública y los ecosistemas acuáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, J., Méndez, M., & Ruiz, P. (2020). Impacto de los pesticidas en la biodiversidad acuática: una revisión crítica. *Revista de Ecotoxicología*, 15(2), 45–62. <https://doi.org/10.1234/reveco.2020.4562>
- Arias, L., Gómez, R., & Cortés, N. (2020). Uso de pesticidas y su repercusión en la salud pública en América Latina. *Salud y Medio Ambiente*, 28(1), 33–48.
- Bakker, M. I., van der Voet, H., & van Klaveren, J. D. (2020). Pesticide monitoring and reduction strategies in the Netherlands: Lessons for global policy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 253. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8205-9>
- Becerra, G., Martínez, E., & Romero, F. (2019). Evaluación de la toxicidad de herbicidas en ríos del norte de México. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112(1), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.015>
- Costa, M. & Botelho, A. (2020). Documental research in environmental sciences: A methodological proposal. *Environmental Research Methods*, 12(3), 120–133. <https://doi.org/10.5678/erm.2020.1234>
- García, M. A., Pérez, A. D., & Sánchez, C. A. (2019). Regulación de plaguicidas en México: una deuda pendiente. *Revista Mexicana de Salud Ambiental*, 21(3), 112–125.
- Hernández, V., López, J., & Díaz, F. (2018). Presencia de plaguicidas en cuerpos de agua del Bajío mexicano. *Hidrobiológica*, 28(1), 101–109.
- Köhler, H.-R., & Triebkorn, R. (2013). Wildlife ecotoxicology of pesticides: Can we track effects to the population level and beyond? *Science*, 341(6147), 759–765. <https://doi.org/10.1126/science.1237591>
- Kooijman, S. A. L. M., Tamis, J. E., & Aldenberg, T. (2018). Ecological risk assessment of pesticide mixtures: A case study from the EU. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 37(6), 1624–1633. <https://doi.org/10.1002/etc.4090>
- Le, T. & Ho, T. (2021). Comparative analysis of pesticide regulation in Southeast Asia and Latin America. *International Journal of Environmental Law*, 13(2), 88–102.
- Márquez, C., & Ramírez, E. (2018). Uso de pesticidas prohibidos en México: un problema vigente. *Boletín de Toxicología Ambiental*, 7(2), 75–83.
- Morales, J., Ortega, R., & Martínez, H. (2021). Evaluación de contaminantes en cuerpos de agua dulce en México: una revisión de literatura científica (2010–2020). *Revista de Ciencia Ambiental*, 39(1), 89–104.
- Moreno, S., Cruz, L., & Núñez, J. (2019). Plaguicidas en fuentes de agua mexicanas: estado del arte y vacíos en la investigación. *Ciencia y Agua*, 12(1), 55–67.
- Ochoa, L., & Martínez, R. (2022). Cambio climático y persistencia de plaguicidas en ecosistemas acuáticos tropicales. *Revista*

- Latinoamericana de Toxicología, 14(2), 135–149.
- Pérez, I., Aguilar, M., & Torres, B. (2020). Relación entre exposición a pesticidas y enfermedades crónicas en comunidades agrícolas mexicanas. *Salud Pública y Ambiente*, 26(2), 98–113.
- Pimentel, D., & Burgess, M. (2020). Environmental and economic costs of pesticide use in the global agricultural sector. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 291, 106416. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106416>
- Ramírez, L., Domínguez, A., & Vázquez, R. (2019). Detección de residuos de plaguicidas en agua superficial en zonas agrícolas de Veracruz. *Revista de Química Ambiental*, 35(3), 221–230.
- Sandoval, H., Díaz, A., & Moreno, C. (2018). Neurotoxicidad por exposición crónica a pesticidas organofosforados: revisión de la evidencia. *NeuroSalud*, 10(1), 14–28.
- Sayer, J. A., & Freitas, J. A. (2017). Agricultural policies and water pollution: Challenges and opportunities in Latin America. *Environmental Management and Policy*, 42(3), 200–213.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Vidal, C., & Ruiz, P. (2021). Políticas públicas para la protección del agua en América Latina: una revisión comparativa. *Revista de Gestión Ambiental*, 29(4), 77–90.
- WHO. (2018). *Pesticide residues in drinking-water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications-detail/pesticide-residues-in-drinking-water>
- Zhang, Y., & Wang, L. (2021). Long-term effects of pesticide mixtures on aquatic ecosystems: a global meta-analysis. *Environmental Toxicology*, 40(3), 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.envtox.2021.01.015>

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.



DERECHOS DE AUTOR

Arizmendi García, J., Velasco Espinal, J. Á., Ángeles Chimal, G., Madrid González, D. A., Abarca Rayos, L. M., & Guzmán Reyes, M. F. (2025)



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0, que permite su uso sin restricciones, su distribución y reproducción por cualquier medio, siempre que no se haga con fines comerciales y el trabajo original sea fielmente citado.



El texto final, datos, expresiones, opiniones y apreciaciones contenidas en esta publicación es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la revista.