

EFFECTOS TÓXICOS DE PLAGUICIDAS ORGANOFOSFORADOS SOBRE PLANTAS ACUÁTICAS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

TOXIC EFFECTS OF ORGANOPHOSPHATE PESTICIDES ON AQUATIC PLANTS: A SYSTEMATIC REVIEW

RESUMEN

Los plaguicidas organofosforados, ampliamente utilizados en la agricultura, representan una amenaza para la salud de los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad. Estos compuestos químicos altamente tóxicos se acumulan en el ambiente y afectan negativamente a las plantas acuáticas, que desempeñan un papel importante en los ecosistemas acuáticos. Por ello, la presente revisión analiza los efectos tóxicos de los organofosforados en diversas especies de plantas acuáticas, evaluando la literatura científica disponible principalmente en tres bases de datos como Scopus, ScienceDirect, y ResearchGate. Los resultados indican que el glifosato surge como el compuesto más estudiado y evidenciando cómo estos compuestos alteran los procesos fisiológicos de las plantas acuáticas, como la fotosíntesis y su crecimiento, comprometiendo su reproducción y supervivencia en los ecosistemas. Los hallazgos de esta revisión evidencian la necesidad y urgencia de adoptar medidas de mitigación así como estrategias de gestión para reducir el uso de los pesticidas y proteger los ecosistemas acuáticos.

Palabras clave. planta acuática, organofosforados, toxicidad, efectos

ABSTRACT

Organophosphate pesticides, widely used in agriculture, pose a threat to the health of aquatic ecosystems and biodiversity. These highly toxic chemical compounds accumulate in the environment and negatively affect aquatic plants, which play an important role in aquatic ecosystems. Therefore, the present review analyzes the toxic effects of organophosphates on various species of aquatic plants, evaluating the scientific literature available in databases such as Scopus, ScienceDirect, ResearchGate and Springer Nature. The results indicated that glyphosate emerges as the most studied compound and shows how these compounds alter the physiological processes of aquatic plants such as photosynthesis and its growth, compromising its reproduction and survival in ecosystems. The findings of this review show the need and

urgency to adopt mitigation measures as well as management strategies to reduce pesticide use and protect aquatic ecosystems.

Keywords: aquatic plant, organophosphates, toxicity, effects

INTRODUCCIÓN

Los plaguicidas son empleados para controlar las plagas en los cultivos y mejorar su crecimiento; dependiendo de su uso, pueden ser herbicidas, rodenticidas, fungicidas, entre otros (Gulnaz *et al.*, 2023). El grupo más usado de plaguicidas son los organofosforados que incluyen profenofos, quinalfos, malatión, metilparatión y clorpirifos, entre otros, y que además, son ésteres de ácidos fosfóricos que contienen derivados alifáticos y fenilos como un elemento en sus complejas estructuras químicas (Tanveer *et al.*, 2024). Se ha descubierto que este tipo de plaguicidas se acumulan en el ambiente durante largos períodos debido a su frecuente aplicación principalmente en suelos agrícolas, por lo que hay una creciente preocupación por los riesgos para los seres humanos que puede conllevar a la contaminación por organofosforados (Yao *et al.*, 2023).

Los organofosforados se caracterizan por sus grupos funcionales tiofosforílicos y han dominado el mercado por más de cinco décadas representando casi el 40% de los productos químicos empleados en el sector agrícola (Liu *et al.*, 2024). Estos plaguicidas son altamente tóxicos y funcionan inhibiendo la acetilcolinesterasa (AChE), por lo que impiden la degradación de la acetilcolina, lo que lleva a su acumulación y a una serie de efectos tóxicos (El-Bini Dhouib *et al.*, 2015). La contaminación por estos plaguicidas organofosforados utilizados en la agricultura suelen llegar a los cuerpos de agua a través de la lluvia o el riego, y los organismos acuáticos se pueden exponer a través de la piel, branquias y por vía oral (Shefali *et al.*, 2021).

Las plantas acuáticas son importantes porque proveen de hábitat y alimento a otros organismos de ecosistemas acuáticos facilitando su crecimiento y reproducción (Gao *et al.*, 2024). Un ejemplo de este tipo de plantas son las macrófitas, que cumplen un papel clave en los cuerpos de agua, debido a que participan en la oxigenación, la fijación y ciclo de nutrientes, y sirven como bioindicadores de las condiciones del ecosistema (Ferreira *et al.*, 2024). Por otro lado, las plantas acuáticas sirven como filtros de sedimentos, depuradoras y para la biorremediación por lo que son empleadas para la remediación de ríos o lagunas contaminadas (Fernández *et al.*, 2015). En ese sentido, se ha demostrado que algunas de estas plantas, como

el *Ceratophyllum demersum*, tienen el potencial de remover nitratos y acumular metales pesados (Yu *et al.*, 2024).

Los efectos tóxicos que pueden verse en las plantas acuáticas por la presencia de plaguicidas son el estrés oxidativo, interferencia con procesos fisiológicos como el crecimiento y bioquímicos esenciales, y la obstaculización de la fotosíntesis (Jan *et al.*, 2020). En un estudio con *Azolla microphylla*, se observó una reducción de la longitud de las raíces de las plantas, pérdida de electrolitos y aumento del contenido de prolina (Raja *et al.*, 2012). Por otro lado, también pueden reducir el intercambio de carbono, disminuir la capacidad de asimilación de dióxido de carbono y aumentar la presencia de especies reactivas de oxígeno que perjudican la supervivencia de la planta (Tanveer *et al.*, 2024).

Esta investigación se propone revisar de manera detallada los efectos tóxicos de los plaguicidas organofosforados sobre las plantas acuáticas. Proporcionará información que permita comprender cómo estos compuestos impactan en el crecimiento y la salud de las especies acuáticas. La revisión busca ofrecer un recurso útil para entender estos impactos y apoyar estrategias de conservación en los ecosistemas acuáticos.

MÉTODO

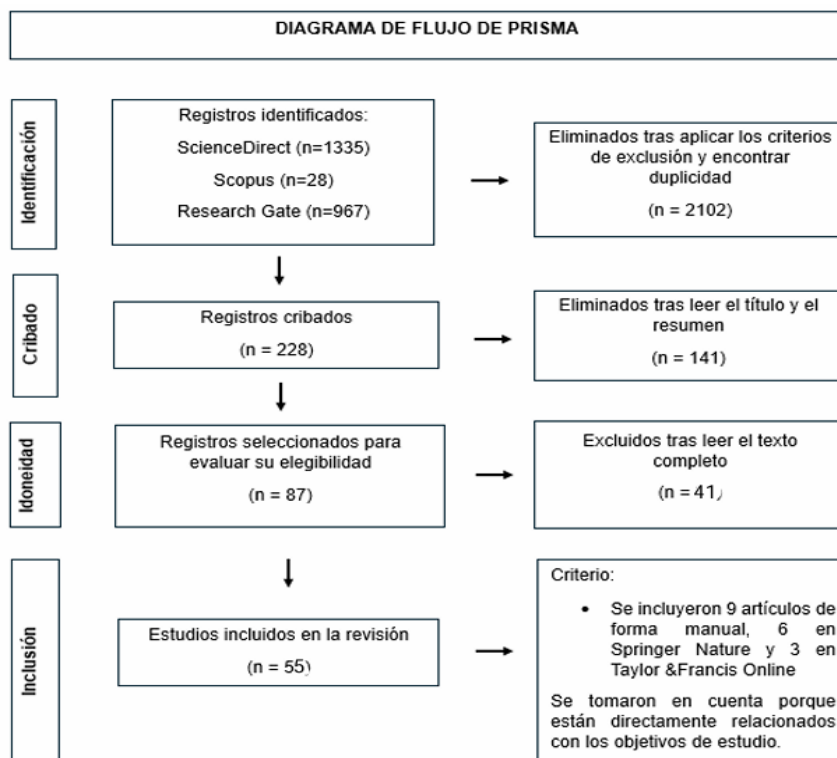
Este trabajo de investigación se realizó de acuerdo a las recomendaciones de revistas sistemáticas (PRISMA) (Nguyen *et al.*, 2021), con el que se identificaron y seleccionaron los artículos para la revisión sistemática, asimismo, se sintetizó óptimamente la literatura científica evaluada.

La obtención de la información y recolección de datos se realizó mediante búsquedas de publicaciones científicas, para lo cual se recurrió inicialmente al uso de tres bases de datos: “Scopus”, “Science Direct” y “Research Gate”. Para ello se empleó la combinación de los siguientes términos de búsqueda: “aquatic plant”, “organophosphate”, “organophosphorus”, “effect”, “toxicity” y “glyphosate”, para generar dos ecuaciones con los operadores booleanos AND y OR, la primera ecuación fue "aquatic plant" AND (organophosphate OR organophosphorus) AND (effect OR toxicity) y la segunda ecuación fue "aquatic plant" AND (glyphosate) AND (effect OR toxicity). Con los cuales se obtuvieron un total de 1335 artículos en la base de datos ScienceDirect, 28 en Scopus y 967 en ResearchGate haciendo un total de 2330 artículos.

Se establecieron los siguientes criterios de inclusión: a) artículos originales o de experimentación, b) artículos que están relacionados con los objetivos de la presente investigación, c) investigaciones que hablen sobre la toxicidad de pesticidas en las plantas acuáticas, d) artículos publicados en los periodos 2004 al 2024 y, e) artículos en los idiomas inglés y español. Del mismo modo en cuanto a criterios de exclusión se aplicó lo siguiente: a) se excluyeron las investigaciones de revisión y tesis, b) artículos publicados antes del 2014, c) artículos que no se enfocan en los objetivos de investigación, d) se dedican a tratamientos sobre plantas terrestres, así como, e) enfocados en la toxicidad sobre animales acuáticos. Según estos criterios y considerando la duplicidad de algunos se descartó un total de 2102 artículos y se obtuvo un total de 228 con las que se hizo una lectura del título y resumen y se eliminaron 141 artículos, el restante fue un total de 87 artículos. Después se procedió a leer el texto completo y se eliminaron 41 artículos, quedando 46 artículos elegidos. Finalmente se hizo una búsqueda manual de artículos en las bases de datos en Springer Nature, y Taylor & Francis Online donde se encontraron un total de seis y tres artículos, respectivamente, haciendo un total de 55 artículos seleccionados (Figura 1).

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA que ilustra el proceso de revisión sistemática y los resultados obtenidos los efectos tóxicos de los plaguicidas organofosforados sobre las plantas acuáticas



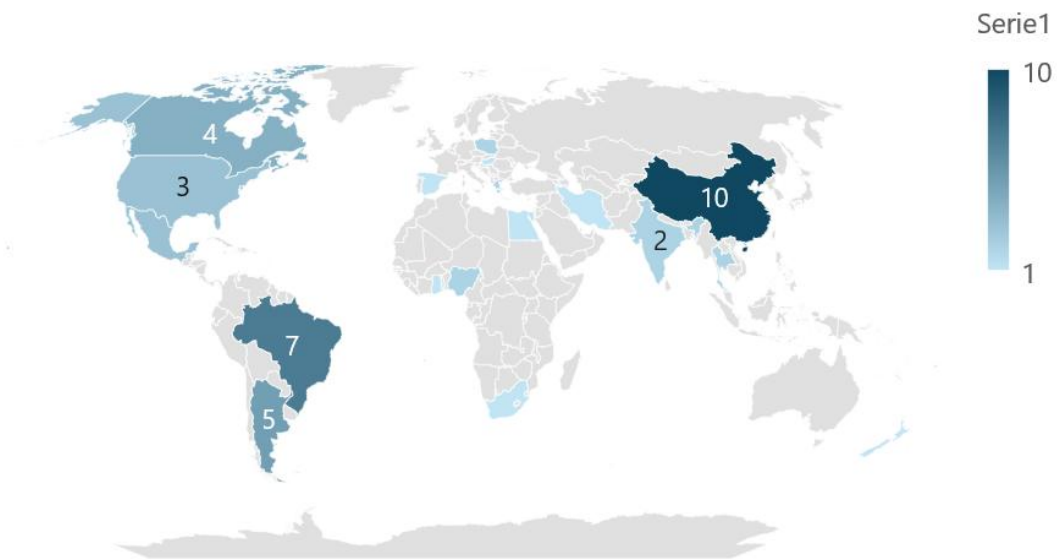
Aspectos éticos: Los autores señalan que se cumplieron todos los aspectos éticos nacionales e internacionales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción por área geográfica

Figura 2

Mapa de los artículos científicos publicados por área geográfica sobre los efectos tóxicos de los plaguicidas organofosforados sobre las plantas acuáticas

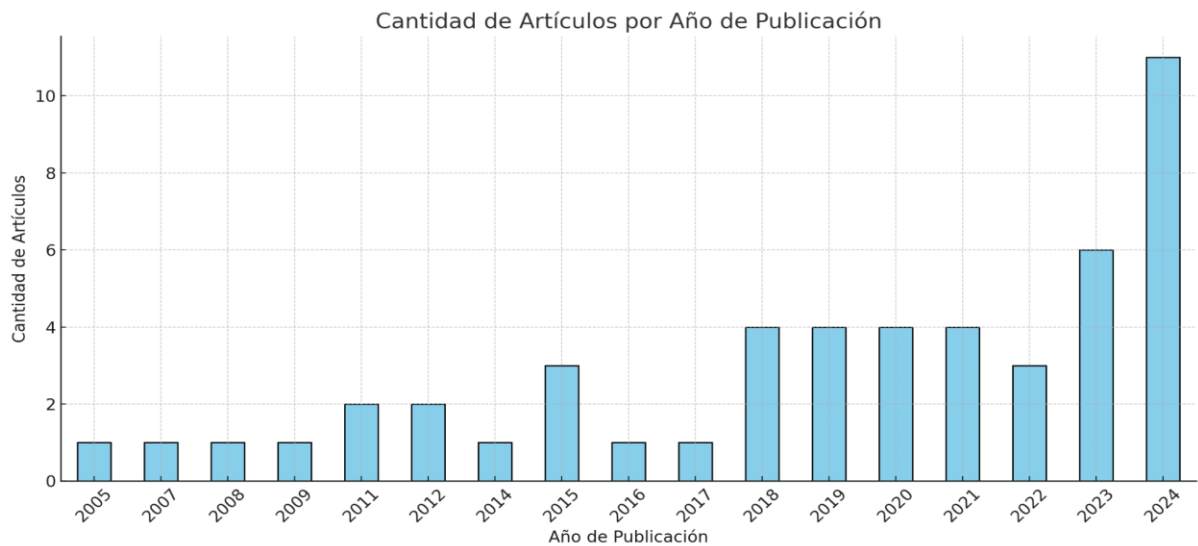


En el área geográfica se puede determinar que el país con mayor cantidad de artículos es China (10). Seguidos por Argentina (5), Canadá (4), Sudáfrica (1), México (3), Grecia (2), Tailandia (2), Brasil (7), Polonia (2), Corea (1), Nigeria (2), España (1), Ghana (1), Egipto (1), India (2), Nueva Zelanda (1), Estados Unidos (3), Hungría (1), Irán (1) y Tailandia (3) (Figura 2).

Temporalidad de artículos identificados

Figura 3

Temporalidad de artículos científicos publicados por año sobre los efectos tóxicos de los plaguicidas organofosforados sobre las plantas acuáticas.



El análisis del gráfico de barras muestra que los años 2011 y 2012 mantienen una cantidad constante y moderada de artículos, lo que refleja cierta estabilidad en la producción durante ese periodo. Asimismo, los años 2018, 2019, 2020 y 2021 presentan niveles similares de actividad, evidenciando un patrón consistente en la generación de publicaciones durante estos años consecutivos. Sin embargo, a partir del 2023 y especialmente en 2024, se observa un incremento significativo, marcando estos años como los más dinámicos en términos de artículos registrados (Figura 3).

La temporalidad de los artículos identifica un comportamiento en el cual los años recientes tienden a concentrar una mayor cantidad de registros, posiblemente debido a un incremento en la disponibilidad de datos, avances tecnológicos o un interés creciente en los temas abordados. Por el contrario, años como 2005, 2007, 2008 y 2009 destacan por su baja producción, lo que indica que en esos periodos la generación de artículos fue considerablemente limitada. En general, el gráfico de la Figura 3 refleja una evolución temporal donde la actividad se intensifica a medida que nos acercamos a la actualidad, con una marcada concentración en los últimos años, siendo 2024 el más destacado.

Artículos seleccionados

En la Tabla 1, se lista los 55 artículos seleccionados para el presente estudio de revisión en la cual se detalla el autor y año de publicación, así como la ubicación por el país que se encuentra, después se presenta el objetivo de cada estudio, la especie de planta utilizada, el pesticida utilizado, y los efectos crónicos y/o agudos en la morfología y bioquímica de las

plantas acuáticas a partir de la aplicación de pesticidas organofosforados en consecuencia de las actividades agrícolas.

Tipos de plaguicidas

Tabla 1

Número de artículos científicos sobre los efectos tóxicos de los plaguicidas organofosforados sobre las plantas acuáticas.

Tipo de Organofosforados	N°
Glifosato y derivados	25
Clorpirifos	16
Diazinón	6
Ésteres organofosforados (OPEs)	4
Malatión	4
Diclorvos	3
Pirimifos-metilo	2
Fenitrotión	2
Tris (2-cloretil) fosfato (TCEP)	1
Tris (2-butoxietyl) fosfato (TBEP)	1
Trifenilfosfato (TPP)	1
Isazofos	1
Quinalfos	1
EPN (Etil p-nitrofenil benzenotiofosfonato)	1
Fosalona	1
Acefato	1
Fenamifos	1
Metilparatión	1
Etoprofos	1
Ometoato	1
Cumáfos	1
Azinfos metil	1
Fonofos	1
Disulfotón	1
Fentión	1
Demetón-S-metilo	1
Etoxicarbonil	1
Paratión	1
Sulfosato	1
Dicapton	1

En la Tabla 1, se observa los distintos tipos de pesticidas organofosforados sobre plantas acuáticas que se han empleado los artículos seleccionados, obteniendo un total de 33 tipos de plaguicidas organofosforados y 55 artículos científicos. El tipo de pesticida que se destaca más es el glifosato, con 25 artículos científicos. Otros tipos de organofosforados son los clorpirifos, con 16 artículos; y el diazinón, con seis artículos.

Por un lado, el glifosato es el plaguicida organofosforados que se evidencia con una mayor cantidad de artículos para la evaluación de los efectos tóxicos sobre las plantas acuáticas, donde se indica que es un inhibidor del crecimiento de las plantas, como la lenteja de agua (*Lemna minor*), jacinto de agua (*Eichhornia crassepis*), entre otros (Pedrosa *et al.*, 2019; López-Chávez *et al.*, 2023).

El clorpirifos es otros de los organofosforados más usados a nivel global, debido a que se caracteriza por generar estrés oxidativo, así como efectos biomoléculas en las plantas acuáticas, las cuales reducen de manera significativa la pigmentación en la hoja (Bertrand *et al.*, 2017). Para la eliminación de este plaguicida se utilizan las especies acuáticas como lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y *L. minor*. Prasertsup & Ariyakanon (2011), señalaron que concentraciones de 1 mg/L del clorpirifos producen una inhibición de la tasa de crecimiento relativo (RGR) de estas dos macrofitas.

Los ésteres organofosforados (OPEs) en los cuerpos de agua, se acumulan y se distribuyen en las plantas acuáticas, evidenciando efectos en *E. crassipes* mediante una absorción pasiva a partir de la raíz, y por ende, la captación y transferencia de este plaguicida se asocia de manera estrecha con esta macrofita (Li *et al.*, 2023). En *Myriophyllum aquaticum* este plaguicida afecta en la acumulación y translocación, y finalmente en el grado de cloración de la planta (Cao *et al.*, 2023).

Tipos de plantas acuáticas empleadas en los estudios sobre Organofosforados

Tabla 2

Número de artículos científicos por especie y familia de macrofitas acuáticas sobre los efectos tóxicos de los plaguicidas organofosforados.

Familia	Especie	Nº
Acoraceae	<i>Acorus calamus</i>	1
Araceae	<i>Lemna gibba</i>	3
Araceae	<i>Lemna minor</i>	12
Araceae	<i>Pistia stratiotes</i>	2

Araceae	<i>Wolffia brasiliensis</i>	1
Asteraceae	<i>Bidens laevis</i>	1
Ceratophyllaceae	<i>Ceratophyllum demersum</i>	1
Convolvulaceae	<i>Ipomoea aquatica</i>	1
Cymodoceaceae	<i>Halodule wrightii</i>	1
Cyperaceae	<i>Eleocharis acicularis</i>	1
Haloragaceae	<i>Myriophyllum aquaticum</i>	2
Hydrocharitaceae	<i>Elodea canadensis</i>	3
Hydrocharitaceae	<i>Halophila ovalis</i>	1
Hydrocharitaceae	<i>Hydrocharis dubia</i>	2
Hydrocharitaceae	<i>Vallisneria natans</i>	1
Lamiaceae	<i>Mentha aquatica</i>	1
Lythraceae	<i>Ammannia robusta</i>	1
Malvaceae	<i>Pachira aquatica</i>	1
Nymphaeaceae	<i>Nymphaea lotus</i>	1
Poaceae	<i>Echinochloa</i> sp.	1
Poaceae	<i>Phragmites australis</i>	1
Poaceae	<i>Spartina densiflora</i>	1
Pontederiaceae	<i>Eichhornia crassipes</i>	4
Potamogetonaceae	<i>Potamogeton pectinatus</i>	1
Potamogetonaceae	<i>Potamogeton pusillus</i>	1
Rhizophoraceae	<i>Rhizophora mangle</i>	1
Ruppiaceae	<i>Ruppia maritima</i>	1
Salviniaceae	<i>Azolla caroliniana</i>	2
Salviniaceae	<i>Azolla pinnata</i>	1
Salviniaceae	<i>Salvinia biloba</i>	1
Salviniaceae	<i>Salvinia cucullata</i>	1
Salviniaceae	<i>Salvinia molesta</i>	1
Salviniaceae	<i>Salvinia natans</i>	2
Ulvaceae	<i>Ulva pertusa</i>	1
Zosteraceae	<i>Zostera capensis</i>	1
Zosteraceae	<i>Zostera marina</i>	1

En el caso de la Tabla 2, se muestra a las diversas especies de plantas acuáticas que han sido empleadas en los artículos seleccionados, obteniendo un total de 22 familias y 36 especies, de las cuales la que más resalta es la especie *L. minor*, con 12 artículos científicos. Otras especies relevantes incluyen *E. crassipes* que cuenta con cuatro artículos, *Pistia stratiotes* que es usada en dos artículos y *Elodea canadensis* que es empleada en tres artículos.

En este contexto, la familia Araceae se muestra con mayor relevancia, con especies como *L. minor*, que tiene la alta cantidad de artículos, donde se la emplea como organismo modelo para evaluar la ecotoxicidad de los organofosforados, y se menciona que esta especie posee alta sensibilidad a los contaminantes orgánicos, tiene una rápida reproducción y su

manejo es sencillo ya sea en campo como en laboratorio, y es por ello que se le considera como un bioindicador ideal (Benghaffour *et al.*, 2023).

Por otro lado, en *E. crassipes*, es conocida por su alta capacidad de acumular compuestos orgánicos, ya que poseen un sistema radicular denso, fibroso y flotante (Lao *et al.*, 2024). Esta especie a diferencia de la lenteja de agua se puede utilizar como fitorremediadora. Mercado *et al.* (2015), evaluó el agua que pasa por los canales de riego en un sistema agrícola urbano mediante la bioacumulación de los organofosforados con esta macrófita, esto se puede deber a que es capaz de metabolizar los contaminantes presentes en esta agua agrícola.

Entre la diversidad de especies de plantas que han sido analizadas para evaluar la toxicidad y el impacto de los organofosforados en el ambiente acuático, se tiene a la planta flotante *Azolla caroliniana* (Marques *et al.*, 2021). Pedrosa *et al.* (2019) emplea especies sumergidas para evaluar la toxicidad acuática como *E. canadensis*, que tiene un papel importante en los ecosistemas acuáticos, al proporcionar hábitat y oxígeno a otros organismos, es por ello que se menciona que el estado de salud de esta macrofita puede reflejar el impacto de los organofosforados en el ecosistema. Con ello se evidencia que para evaluar la toxicidad de los organofosforados se pueden utilizar tanto a plantas superficiales como a aquellas que habitan en las capas más profundas de los cuerpos de agua.

Además, especies marinas como *Halodule wrightii* y *Ruppia maritima* evidencian que los organofosforados no solo impactan ecosistemas continentales, sino también sistemas costeros (Velooso *et al.*, 2015). Los resultados de esta revisión realizada indican que diversas especies de macrofitas se pueden utilizar como herramientas para analizar la toxicidad de los organofosforados, alguna de ellas tienen la capacidad de ser empleadas en proyectos de biorremediación, como *E. crassipes*, *P. stratiotes*, *C. demersum* y *E. canadensis*.

Efectos tóxicos de diferentes organofosforados sobre plantas acuáticas representativas

Tabla 3

Efectos tóxicos de diferentes plaguicidas organofosforados sobre plantas acuáticas

Autor y año	Planta acuática	Organofosforados	Efectos tóxicos	
			Morfológicos	Bioquímicos
Lao <i>et al.</i> (2024) Anudechakul <i>et al.</i> (2015)	<i>Eichhornia crassipes</i>	Tris (2-cloroetil) fosfato, Tris, (2-butoxi)etil fosfato, Trifenil fosfato	Inhibición del crecimiento. Cambios en el desarrollo foliar.	Alteración de la fotosíntesis y cambios en la composición microbiana de la rizosfera.

		Clorpirifos		
Bertrand <i>et al</i> (2017)	<i>Potamogeton pusillus</i>	Clorpirifos	Reducción del crecimiento y tamaño foliar	Disminución de pigmentos fotosintéticos, estrés oxidativo.
López-Chavez <i>et al.</i> (2023)	<i>Rhizophora mangle</i> , <i>Pachira acuatica</i> ,	Glifosato	Reducción en el crecimiento del diámetro del tallo (<i>Rhizophora</i>), mayor tasa de crecimiento en altura (<i>Pachira</i>).	Alteraciones en la síntesis de compuestos antioxidantes. Disminución del contenido de clorofila. Aumentó el contenido de MDA y la actividad de SOD en <i>A. calamus</i> y <i>V. natans</i> .
Qu <i>et al.</i> (2022)	<i>A. calamus</i> y <i>V. natan</i>			
Cao <i>et al</i> (2023)	<i>Miriophyllum aquaticum</i>	Ésteres organofosforados (OPEs)	No significativo	Mayor acumulación en las raíces de compuestos más hidrofóbicos; translocación afectada por niveles de nitrógeno.
Boonyawanich <i>et al.</i> (2001)	<i>Ipomoea aquatica</i> , <i>Pistia stratiotes</i> , y <i>Hydrocharis dubia</i>	Carbaril	Clorosis, necrosis y reducción significativa del peso seco y fresco.	Alteraciones en la actividad antioxidante
Sikorski <i>et al.</i> (2019)				Inhibe la síntesis de clorofilas y carotenoides, afectando los procesos fotosintéticos
Kostopoulou <i>et al.</i> (2020)	<i>Lemna minor</i>	Glifosato	Reducción del tamaño y clorosis en las hojas.	Disminuye a,a-trehalosa, el salicilato, y el ácido g-aminobutírico (GABA), e incrementa el AA Ltirosina, y L-fenil-alanina y el L-triptófano.
Gomes & Juneau (2016)				
Arjun <i>et al.</i> (2018)	<i>Lemna gibba</i>	Clorpirifos	Gibosidad, clorosis, raíces cortas y rotas, frondas pequeñas, y necrosis en concentraciones de 50 y 100 mg/L. Se detectó una reducción del crecimiento de las frondas y las raíces.	Inhibición de la tasa de crecimiento y supresión de la actividad celular en altas concentraciones, con recuperación parcial en concentraciones más bajas debido a su rápida capacidad de regeneración.
Munkegaard <i>et al.</i> (2008)				
Koranteng <i>et al.</i> (2023)	<i>Ceratophyllum demersum</i> y <i>Loto nymphaea</i>	Diazinon Clorpirifos Fenitrotion	Bioacumulación significativa	Alteraciones metabólicas relacionadas con mecanismos de defensa antioxidantes.

En la Tabla 3 se presentan los principales efectos tóxicos que afectan directamente en el crecimiento y reproducción de las plantas acuáticas produciendo cambios morfológicos y bioquímicos al ser expuestas a diferentes organofosforados. Los efectos tóxicos más comunes

fueron la inhibición del crecimiento, la disminución de pigmentos como la clorofila (Lao *et al.*, 2024; Bertrand *et al.*, 2017; Sikorski *et al.*, 2019).

La sensibilidad de las macrófitas acuáticas como *E. crassipes*, a la exposición a tris (2-cloroetil) fosfato, tris (2-butoxietil) fosfato y trifetil fosfato provoca que la planta deje de crecer y tenga problemas en sus hojas. Además, estos químicos afectan la fotosíntesis y la vida microbiana en las raíces (Lao *et al.*, 2024). Por su parte, en *Potamogeton pusillus*, el clorpirifos causa una disminución en el tamaño de las hojas, pérdida de pigmentos esenciales y daño oxidativo, lo que limita su desarrollo (Bertrand *et al.*, 2017), de esta manera se evidencia como los pesticidas interfieren en procesos clave como la fotosíntesis, el crecimiento celular y las defensas antioxidantes, afectando el desarrollo normal de las plantas.

El glifosato causa distintos daños dependiendo de la planta. En *Rhizophora mangle*, reduce el grosor del tallo, mientras que en *Pachira aquatica* promueve un mayor crecimiento en altura, posiblemente como una forma de adaptación (López-Chávez *et al.*, 2023). En *L. minor*, el glifosato reduce el tamaño de las hojas y provoca amarillamiento (clorosis), además de afectar la producción de pigmentos importantes como la clorofila, afectando directamente la fotosíntesis (Gomes & Juneau, 2016; Sikorski *et al.*, 2019). Este compuesto también genera una respuesta antioxidante en *Acorus calamus* y *Vallisneria spiralis*, lo que evidencia cómo las plantas intentan adaptarse al daño causado por los organofosforados (Qu *et al.*, 2022). De esta manera el impacto del glifosato depende de las características específicas de cada planta, lo que influye en su capacidad para resistir o adaptarse al estrés causado por este herbicida.

Además, otros pesticidas, como el carbaril y el clorpirifos, también generan efectos negativos de toxicidad. Por ejemplo, en *Ipomoea aquatica*, *P. stratiotes* y *Hydrocharis dubia*, el carbaril provoca manchas, necrosis y una fuerte disminución en su peso seco y fresco, además de alterar su sistema antioxidante (Kruatrachue *et al.*, 2023). En *Lemna gibba*, el clorpirifos daña las raíces, causa necrosis y pequeñas deformaciones, aunque a dosis bajas las plantas logran recuperarse (Arjun *et al.*, 2018). Por su parte, *C. demersum* y *Nymphaea lotus* acumulan pesticidas como diazinón y clorpirifos (Koranteng *et al.*, 2023), afectando su metabolismo interno y demuestra que pueden ser indicadores útiles de contaminación en el agua.

Se concluye que el análisis geográfico y temporal de los artículos encontrados evidencia un aumento significativo del interés por estudiar los efectos de los plaguicidas organofosforados sobre plantas acuáticas en los últimos años, destacando a China como el país

con mayor producción científica sobre esta temática. Esto se traduce en una preocupación creciente por los impactos ambientales de estos plaguicidas, así como una mayor disponibilidad de datos y tecnologías para su estudio. Asimismo, en los 55 artículos que se seleccionaron para este estudio se resalta la diversidad de enfoques y especies utilizadas, consolidando una base para futuras investigaciones.

En los resultados, se pudo observar que el glifosato es el organofosforado más investigado, seguido por el clorpirifos y el diazinón, debido a su alta presencia y persistencia en cuerpos de agua, trayendo consigo efectos negativos en el metabolismo fotosintético y oxidativo de las plantas acuáticas, alterando su tasa de crecimiento, desarrollo y capacidad de bioacumulación. Esto acaba resaltando la necesidad de regular su uso y buscar alternativas menos tóxicas para mitigar sus impactos.

La especie *L. minor* destaca como el tipo de planta acuática más utilizada debido a su sensibilidad a los contaminantes y facilidad de manejo, siendo considerada un bioindicador ideal en muchos de los estudios revisados. Otras especies como *E. crassipes* y *E. canadensis* han demostrado alta capacidad de bioacumulación, subrayando su potencial al reflejar las concentraciones de contaminante en el cuerpo receptor, y su aplicación para proyectos de biorremediación en cuerpos de agua contaminados. Además, la diversidad de especies analizadas, como *H. wrightii* y *R. maritima*, evidencian que los organofosforados impactan tanto ecosistemas continentales como marino costeros.

En resumen, los plaguicidas organofosforados generan efectos tóxicos significativos en las plantas acuáticas, en los que se encuentran la inhibición del crecimiento, reducción de pigmentos fotosintéticos, estrés oxidativo y en algunos casos mortandad. Estos efectos varían según la especie, el tipo de plaguicida y su concentración, evidenciando en la mayoría de los casos que las plantas desarrollan mecanismos de adaptación y defensa antioxidante en respuesta al estrés químico. La acumulación de estos compuestos en tejidos vegetales subraya su impacto a largo plazo en la salud de los ecosistemas acuáticos y la importancia de estas plantas como bioindicadores ambientales y agentes de remediación.

REFERENCIAS

- Anudechakul, C., Vangnai, A.S., Ariyakanon, N. (2015). Removal of chlorpyrifos by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and the role of a plant-associated bacterium. *International Journal of Phytoremediation*, 17, 678-685. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.964838>
- Arjun, R., Amarnath, J., & Sethi, S. (2018). Inhibition and recovery of aquatic macrophyte *lemna gibba* exposed to a combination pesticide. *Indian Journal of Natural Sciences*. 8, 46. <https://www.researchgate.net/publication/327691041>
- Benghaffour, A., Dewez, D., & Azzouz, A. (2023). Correlation of pesticide ecotoxicity with clay mineral dispersion effect on adsorption and ozonation – An approach through impact assessment on *Lemna minor*. *Applied Clay Science*, 241, 1 - 10. [https://doi-org.cientifica.remotexs.co/10.1016/j.clay.2023.107001](https://doi.org/cientifica.remotexs.co/10.1016/j.clay.2023.107001)
- Bertrand, L., Marino, D., Monferrán, M., & Amé, M. (2017). Can a low concentration of an organophosphate insecticide cause negative effects on an aquatic macrophyte? Exposure of *Potamogeton pusillus* at environmentally relevant chlorpyrifos concentrations. *Environmental and Experimental Botany*, 138, 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.03.006>
- Boonyawanich, S., Kruatrachue, M., Upathama, E.S., Soontornchainaksaeng, P., Pokethitiyook, P., & Singhakaew, S. (2001). The Effect of Carbamate Insecticide on the Growth of Three Aquatic Plant Species: *Ipomoea aquatica*, *Pistia stratiotes* and *Hydrocharis dubia*. *ScienceAsia*, 27, 99-104. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/SCAS/10459997.pdf>
- Cao, Z., Wang, J., Zheng, X., & Zhang, G. (2023). Effects of nitrogen stress on uptake and translocation of organophosphate esters by watermifoil (*Myriophyllum aquaticum* L.) in an aquatic ecosystem. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 1-10.

<http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-29124-1>

- El-Bini Dhouib, I., Lasram, M. M., Annabi, A., Gharbi, N., & El-Fazaa, S. (2015). A comparative study on toxicity induced by carbosulfan and malathion in Wistar rat liver and spleen. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *124*, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2015.03.012>
- Fernández, M., Bedoya, A.M., & Madriñán, S. (2015). Plantas acuáticas de las planicies inundables de la Orinoquia colombiana. *Biota Colombiana*, *16*, 12-31. <https://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/371>
- Ferreira, V. R. S., Cunha, E. J., Calvão, L. B., Luiza-Andrade, A., Resende, B. O. de, Carvalho, F. G. de, Bomfim, F. de F., Fares, A. L. B., Cabral, G. S., Lima, M., Montag, L. F. de A., Michelin, T. S., & Juen, L. (2024). Amazon streams impacted by bauxite mining present distinct local contributions to the beta diversity of aquatic insects, fish, and macrophytes. *Science of The Total Environment*, *955*, 177292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177292>
- Gao, M., Li, C., Li, Y., Wen, S., Zhang, Y., Liu, L., Zhang, J., Chen, M., & Yang, J. (2024). Integration of ecological restoration and landscape aesthetics: Mechanisms of microplastic retention by optimization of aquatic plants landscape design in urban constructed wetlands — A case study of the living water park in Chengdu. *Science of The Total Environment*, *957*, 177331. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177331>
- Gomes, M. P., & Juneau, P. (2016). Oxidative stress in duckweed (*Lemna minor* L.) induced by glyphosate: Is the mitochondrial electron transport chain a target of this herbicide? *Environmental Pollution*, *218*, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.019>
- Gulnaz, R., Altaf, S., Saqib, M., & Naeem, M.A. (2023). Impacts of organophosphate residues on environmental and biological systems. *Biological Times*, *2*, 21-22. [15](https://biologicaltimes.com/wp-content/uploads/journal/published_paper/volume-</p></div><div data-bbox=)

2/issue-4/BT_2023_800541.pdf

- Jan, S., Singh, R., Bhardwaj, R., Ahmad, P., & Kapoor, D. (2020). Plant growth regulators: A sustainable approach to combat pesticide toxicity. *3 Biotech*, *10*, 466. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02454-4>
- Koranteng, S.S., Darko, D.A., Nukpezah, D., & Ameka, G.K. (2023). Pesticides bioconcentration potential of aquatic plants in the Volta Lake. *West African Journal of Applied Ecology*, *26*, 193-202. https://www.researchgate.net/publication/344369750_Pesticides_Bioconcentration_Potential_of_Aquatic_Plants_in_the_Volta_Lake
- Kostopoulou, S., Ntatsi, G., Arapis, G., & Aliferis, K.A. (2020). Assessment of the effects of metribuzin, glyphosate, and their mixtures on the metabolism of the model plant *Lemna minor* L. applying metabolomics. *Chemosphere*, *239*, 124582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124582>.
- Shefali, Kumar, R., Sankhla, M.S., Kumar, R., & Sonone, S.S. (2021). Impact of pesticide toxicity in aquatic environment. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, *11*, 10131-10140. <https://doi.org/10.33263/BRIAC113.1013110140>
- Lao, Z., Wu, D., Hui-Ru, L., Liu, Y., Long-Wei, Z., Feng, Y., Jiang, X., Wu, D., Hu, J. & Ying, G., (2024). Uptake mechanism, translocation, and transformation of organophosphate esters in water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A hydroponic study. *Environmental Pollution*, *341*, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122933>
- Li, H., Lao, Z., Liu, Y., Feng, Y., Song, A., Hu, J., Liao, Z., Zhang, L., Liu, M., Liu, Y., & Ying, G. (2023). Uptake, accumulation, and translocation of organophosphate esters and brominated flame retardants in water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A field study. *Science of The Total Environment*, *874*, 162435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162435>

- Liu, X., Cao, J., Zhao, W., Jiang, J., Cai, M., Wu, H., Zhu, H., Liu, X., & Li, L. (2024). Pollution of organophosphorus pesticides in the Dongting Lake, China and its relationship with dissolved organic matter: Occurrence, source identification and risk assessment. *Environmental Research*, 263, 120162. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120162>
- López-Chávez, M. Y., Infante-Mata, D., Álvarez-Legorreta, T., Dunn, M. F., Castro-Chan, R. A., & Guillén-Navarro, K. (2023). Continuous glyphosate applications affect plant development of mangrove species from coastal wetlands: *Rhizophora mangle* and *Pachira aquatica*. *Aquatic Botany*, 187, 103658. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2023.103658>
- Marques, M., Brunetti, I., Faleiros, C., da Cruz, C., Iqbal, H., Bilal, M., & Américo H. (2021). Ecotoxicological assessment and environmental risk of the insecticide chlorpyrifos for aquatic neotropical indicators. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232, 428. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05369-9>
- Mercado, B., Cram, S., Rosas I., Hernández, M., & Ponce, C. (2015). Organophosphorus and Organochlorine Pesticides Bioaccumulation by *Eichhornia crassipes* in Irrigation Canals in an Urban Agricultural System. *International Journal of Phytoremediation*, 17, 701–708. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.964841>
- Munkegaard, M., Abbaspoor, M., & Cedergreen, N. (2008). Organophosphorous insecticides as herbicide synergists on the green algae *Pseudokirchneriella subcapitata* and the aquatic plant *Lemna minor*. *Ecotoxicology*, 17, 29-35. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0173-x>
- Nguyen, T., Sahin, O., & Howes, M. (2021). Climate change adaptation influences and barriers impacting the asian agricultural industry. *Sustainability*, 13, 1-17. <https://doi.org/10.3390/su13137346>
- Pedrosa, M., Tavares, D., Richardi, V., Marques, R., Wistuba, N., Moreira de Brito, J., Soffiatti,

- P., Santos, B., Navarro, M., & Juneau, P (2019). Enrofloxacin and Roundup® interactive effects on the aquatic macrophyte *Elodea canadensis* physiology. *Environmental Pollution*, 249, 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.026>
- Prasertsup, P., & Ariyakanon, N. (2011). Removal of chlorpyrifos by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) and Duckweed (*Lemna minor* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 13, 383-395. <https://doi.org/10.1080/15226514.2010.495145>
- Qu, M., Wang, L., Xu, Q., An, J., Mei, Y., & Liu, G. (2022). Influence of glyphosate and its metabolite aminomethylphosphonic acid on aquatic plants in different ecological niches. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 246, 114155. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114155>
- Raja, W., Rathaur, P., John, S.A., Ramteke, P.W., & Dar, R.A. (2012). Effect of monocrotophos on electrolytic leakage, proline content and nitrogen metabolism of floating Pteridophyte *Azolla microphylla*. *The holistic approach to environment*, 2, 111-120. <https://hrcak.srce.hr/86218>
- Sikorski, Ł., Baciak, M., Beś, A., & Adomas, B. (2019). The effects of glyphosate-based herbicide formulations on *Lemna minor*, a non-target species. *Aquatic Toxicology*, 209, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.01.021>
- Tanveer, S., Ilyas, N., Akhtar, N., Akhtar, N., Bostan, N., Hasnain, Z., Niaz, A., Zengin, G., Gafur, A., & Fitriatin, B.N. (2024). Unlocking the interaction of organophosphorus pesticide residues with ecosystem: Toxicity and bioremediation. *Environmental Research*, 249, 118291. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118291>
- Veloso, A., Colares, I., Rodrigues, T., Jansen, M., & Luvizotto, R. (2015). Using a toxicity test with *Ruppia maritima* (Linnaeus) to assess the effects of Roundup. *Marine Pollution Bulletin*, 9, 506-510. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.006>

Yao, R., Yao, S., Ai, T., Huang, J., Liu, Y., & Sun, J. (2023). Organophosphate pesticides and pyrethroids in farmland of the pearl river delta, china: Regional residue, distributions and risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20, 1017. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021017>

Yu, G., Wang, J., Cheng, H., Luo, X., Wang, S., & Zheng, Z. (2024). Toxicological effects of bisphenol F on growth, antioxidant response, ultrastructure, and microbial properties of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. *Science of The Total Environment*, 957, 177481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177481>

Elías Cano-Del Castillo¹, Rony Chavez-Sanchez¹, Michael Condori-Muñoz¹, Ariana Flores Cornejo¹, Jackeline Ordoñez-Menacho¹, Shantal Salome-Curi¹, Carlos Sanchez-Gonzalez¹, Laura Vilca-Bustillos¹ & José Iannacone^{1,2}

1 Grupo de Investigación en Restauración Ecológica, Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.

2 Grupo de Investigación de Sostenibilidad Ambiental (GISA), Escuela Universitaria de Postgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.