

**EFFECTOS TÓXICOS DEL PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS EN PLANTAS ACUÁTICAS
TOXIC EFFECTS OF PETROLEUM AND ITS DERIVATIVES ON AQUATIC PLANTS
RESUMEN**

La contaminación por petróleo afecta significativamente a las plantas acuáticas, causando efectos letales y subletales que comprometen su crecimiento y funciones ecológicas. El objetivo de esta revisión es examinar los impactos del petróleo en las plantas acuáticas, con un enfoque en los efectos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos. Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de artículos científicos en seis bases de datos como ScienceDirect, Research4Life, PubMed, Scopus, Google Académico y SpringerLink. Para el análisis y selección de información se empleó el enfoque PRISMA, seleccionando 53 artículos para la revisión sistemática. La mayoría de los estudios se centraron en los efectos subletales del petróleo, destacando la reducción del crecimiento, la disminución de biomasa, la inhibición de la fotosíntesis, el estrés oxidativo y la alteración en la biosíntesis de pigmentos fotosintéticos, como los impactos más frecuentes. Además, se observó que la mayoría de las investigaciones se enfocaron en contaminantes específicos, como el petróleo crudo, aunque se subraya la necesidad de investigar escenarios de contaminación mixta que involucren combinaciones de hidrocarburos.

Palabras clave: Contaminación por petróleo, plantas acuáticas, toxicidad ambiental

ABSTRACT

Oil pollution significantly affects aquatic plants, causing lethal and sublethal effects that compromise their growth and ecological functions. The objective of this review is to examine the impacts of oil on aquatic plants, with a focus on morphological, physiological and biochemical effects. An exhaustive search of articles was carried out in databases such as Science Direct, Research4Life, PubMed, Scopus, Google Scholar and Springer Link. For the analysis and selection of information, the PRISMA approach was used, selecting 53 articles for the systematic review. Most of the studies focused on the sublethal effects of oil, highlighting growth reduction, biomass decrease, photosynthesis inhibition, oxidative stress and alteration in the biosynthesis of photosynthetic pigments, as the most frequent impacts. Furthermore, it was observed that most studies focused on specific contaminants, such as crude oil, although the need to investigate mixed pollution scenarios involving combinations of hydrocarbons is highlighted.

Keywords: Oil pollution, aquatic plants, environmental toxicity

INTRODUCCIÓN

La contaminación por petróleo se ha convertido en las últimas décadas en un tema central de numerosos estudios, ya que representa uno de los principales problemas ambientales que afecta a diversos ecosistemas, incluyendo el suelo, el aire, los sedimentos y el agua a nivel global (Zazouli *et al.*, 2023). Los derrames directos de compuestos petroquímicos y la descarga de hidrocarburos, provenientes de actividades naturales e industriales, que ingresan a los cuerpos de agua generan daños irreversibles (Hassan *et al.*, 2020). La liberación de compuestos tóxicos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y los metales pesados, causan efectos cancerígenos, tóxicos y mutagénicos, y estos compuestos entran en la cadena alimentaria del ecosistema, al poseer propiedades persistentes y bioacumulativas (Hassan *et al.*, 2020). En este contexto, las plantas acuáticas desempeñan funciones ecológicas esenciales, como la regulación de los ciclos de nutrientes, la estabilización de sedimentos y la remediación efectiva de los HAP (Zhu *et al.*, 2023).

Los efectos ecotoxicológicos del petróleo en plantas acuáticas abarcan desde alteraciones fisiológicas y bioquímicas, como la inhibición de la fotosíntesis y la generación de estrés oxidativo, hasta impactos significativos en su desarrollo y reproducción. En el estudio de Lopes *et al.* (2009), se evaluaron *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Echinochloa polystachya* (pasto semiacuático), observándose que la exposición a altas concentraciones de petróleo redujo la cantidad de hojas y frenó el crecimiento de raíces y hojas. Mientras que *E. crassipes* mostró mayor tolerancia, *E. polystachya* fue más sensible a los efectos tóxicos, registrando tasas más altas de mortalidad. Por otro lado, en un estudio posterior de Lopes *et al.* (2014) se analizaron los efectos del petróleo crudo sobre *E. crassipes* bajo diferentes concentraciones (0 a 150 ml/L) y tiempos de exposición (1, 5, 10, 15 y 20 días). Los resultados mostraron cambios negativos significativos en la biomasa total y en la relación entre biomasa viva y muerta. A medida que aumentaban la dosis y el tiempo de exposición, disminuye la producción de biomasa y la longitud de las hojas y raíces, mientras que aumentaban la mortalidad y el número de hojas muertas, evidenciando el fuerte impacto del petróleo en la fisiología y el desarrollo de esta especie. Estos resultados evidencian el impacto severo de los derrames de petróleo en la flora acuática. Además, estas alteraciones pueden desencadenar cambios en las interacciones ecológicas y en la estructura de las comunidades acuáticas, afectando la resiliencia del ecosistema frente a perturbaciones ambientales.

Este artículo tiene como objetivo analizar los principales efectos ecotoxicológicos del petróleo y sus derivados en las plantas acuáticas. Comprender esta problemática es esencial

para el desarrollo de estrategias de conservación y restauración de ecosistemas acuáticos afectados por la contaminación por hidrocarburos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia de búsqueda

La revisión sistemática se llevó a cabo de acuerdo con las pautas de la Declaración PRISMA (Liberati *et al.*, 2009). Se realizaron búsquedas en seis bases de datos (ScienceDirect, Research4Life, PubMed, Scopus, Google Académico y SpringerLink) para el periodo 1983-2024. Las búsquedas en las bases de datos se realizaron utilizando los siguientes términos en inglés para todas las bases de datos: (“aquatic plant”), (“petroleum” OR “hydrocarbons” OR “petroleum derivatives” OR “crude oil”) y (“effect” OR “toxicity”). También, se realizaron búsquedas manuales en las bases de datos de ResearchGate, KSEE y Scielo.

Selección

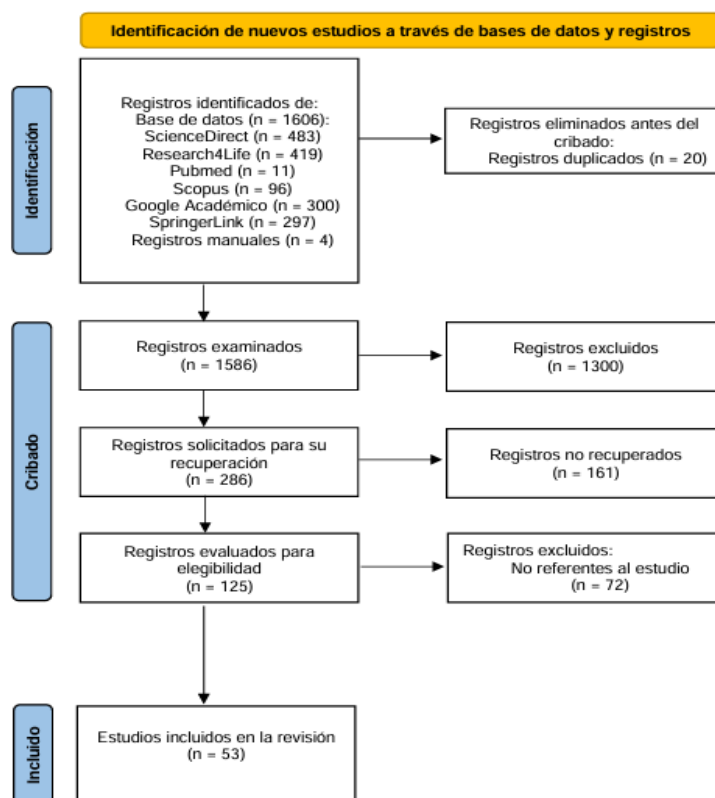
La selección de artículos se realizó de acuerdo con algunos criterios de inclusión y exclusión para identificar los estudios que cumplieran con el objetivo del presente artículo. Los criterios de inclusión fueron: (1) artículos originales; (2) artículos relacionados con el objetivo de investigación; (3) artículos publicados entre los años 1983-2024; (4) artículos publicados en inglés y español. Los criterios de exclusión fueron: (1) artículos de revisión o fuentes secundarias; (2) artículos no relacionados con el objetivo de investigación; (3) artículos publicados en otros idiomas. Por otro lado, también se incluyeron artículos generados por una búsqueda manual con aporte importante.

Descripción del flujograma

Los artículos se seleccionaron en primer lugar mediante la lectura de títulos y resúmenes (cribado), el proceso fue realizado por todos los autores de la presente investigación. La estrategia de búsqueda arrojó un total de 1606 estudios (Science Direct n = 483; Research4Life n = 419; PubMed n = 11; Scopus n = 96; Google Académico n = 300; SpringerLink n = 297 y registros manuales n = 4). Después de identificar duplicados y una revisión previa de los títulos y resúmenes, se identificaron 125 artículos potenciales. Sobre la base de los criterios de inclusión y exclusión, se incluyeron en la revisión un total de 53 estudios. El proceso de selección de estudios se puede ver en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA para los principales efectos ecotoxicológicos del petróleo y sus derivados en las plantas acuáticas



Aspectos éticos: Los autores señalan que se cumplieron todas las normativas éticas nacionales e internacionales.

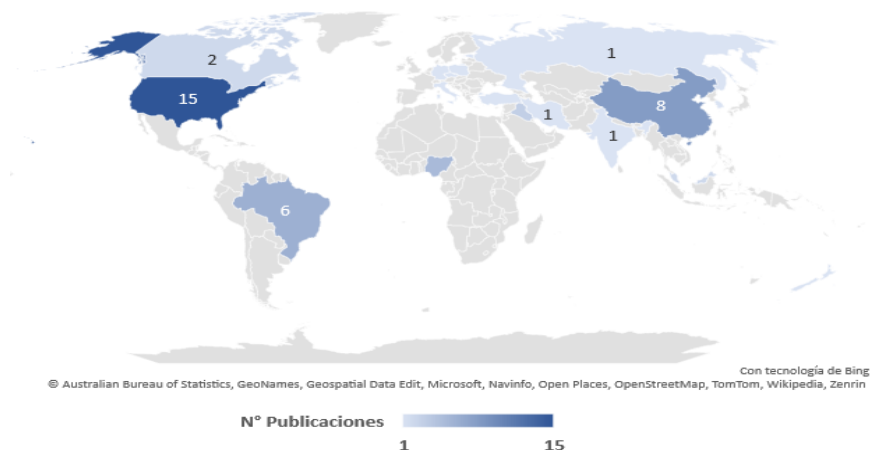
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Publicación científica según el país de elaboración

Los resultados obtenidos de la búsqueda en las diferentes bases de datos, muestran que la mayoría de los artículos sobre los efectos tóxicos agudos y crónicos del petróleo y sus derivados sobre las plantas acuáticas han sido publicados en América (43,39%), seguido de Asia (28,30%), Europa (9,43%), África (9,43%) y Oceanía (1,89%). Dentro del continente americano, Norteamérica presenta el 32,07% de publicaciones y Sudamérica el 11,32%. EE.UU, China y Brasil son los países con mayor cantidad de publicaciones seleccionadas con 15, ocho y seis artículos, respectivamente, seguido de Nigeria, Irak y Canadá con 5, 3 y 2 documentos publicados cada uno (Figura 2).

Figura 2

Número de artículos publicados y seleccionados por países para los principales efectos ecotoxicológicos del petróleo y sus derivados en las plantas acuáticas.

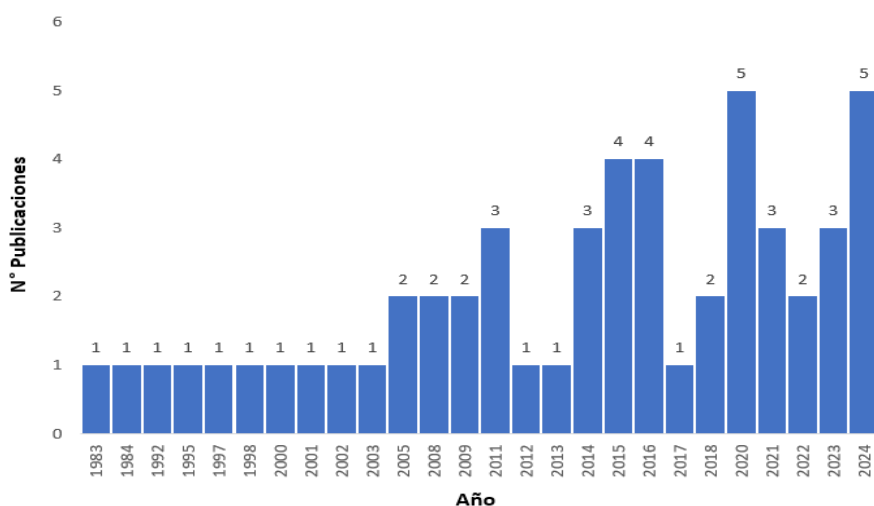


Publicación científica por año

En la Figura 3, se evidencia que la gran mayoría de artículos de investigación estudiados y publicados en la presente revisión pertenecen a los años 2020 y 2024. Del que se resalta que, la publicación más antigua seleccionada es del año 1983. Al comparar el año y el número de artículos seleccionados evidencian la variación de la investigación del tema propuesto, desde el año 1983 al 2024, además se observa una constante hasta el 2003, experimentando cierto incremento años siguientes hasta el 2024 a excepciones de algunos años como el 2012, 2013 y 2017.

Figura 3

Número de artículos publicados por año según los artículos seleccionados para los principales efectos ecotoxicológicos del petróleo y sus derivados en las plantas acuáticas.



Especies de plantas acuáticas identificadas en la revisión

Los datos fueron extraídos de los 53 artículos de investigación revisados. Al analizar la Tabla 1 se evidencia que *Lemna minor*, es la especie con más estudios realizados en la mayoría de países comprendidos en la tabla. Además, se ha identificado países con mayor cantidad de especies evaluadas, como China (14 especies) y Estados Unidos (11 especies); así como aquellos con menor cantidad de especies como Rusia (dos especies) e Italia (una especie).

Tabla 1

Principales países que hicieron estudios sobre los efectos tóxicos del petróleo y sus derivados según cantidad de especies estudiadas.

País	Especies	Cantidad de especies	Autores
China	<i>Lemna minor</i> , <i>Lemna gibba</i> , <i>Potamogeton crispus</i> , <i>Ceratophyllum demersum</i> , <i>Potamogeton lucens</i> , <i>Nelumbo nucifera</i> , <i>Potamogeton pectinatus</i> , <i>Spirodela polyrhiza</i> , <i>Hydrocharis dubia</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Pontederia crassipes</i> , <i>Limnobium laevigatum</i> , <i>Myriophyllum aquaticum</i> , <i>Hippuris vulgaris</i>	14	Zhu <i>et al.</i> (2023), Zhang <i>et al.</i> (2015), Chai <i>et al.</i> (2021), Chai <i>et al.</i> (2020), Liu <i>et al.</i> (2019), Wu <i>et al.</i> (2011), Wu <i>et al.</i> (2024), Wan <i>et al.</i> (2019), Yin <i>et al.</i> (2008) y Olguín <i>et al.</i> (2007)
Estados Unidos	<i>Lemna minor</i> , <i>Spartina alterniflora</i> , <i>Salicornia virginica</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Sagittaria lancifolia</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Scirpus olneyi</i> , <i>Juncus roemerianus</i> , <i>Ectocarpus siliculosus</i> , <i>Zostera marina</i> , <i>Egeria densa</i>	11	Rivenbark <i>et al.</i> (2024), Alexander & Webb (1983), Rosso <i>et al.</i> (2005), Ferrell <i>et al.</i> (1984), Xu <i>et al.</i> (2013), Judy <i>et al.</i> (2014), DeLaune (2003), Lambert (2017), Rule (2018), Willis <i>et al.</i> (2016), Softcheck (2021), Turner (2016), Fonseca <i>et al.</i> (2017), Stanley <i>et al.</i> (1984) y Pezeshki <i>et al.</i> (1998)
Nigeria	<i>Pistia stratiotes</i> , <i>Salvinia nymphellula</i> , <i>Lemna paucicostata</i> , <i>Eichhornia crassipes</i>	4	Akapo <i>et al.</i> (2011), Bamidele <i>et al.</i> (2015), Ekperusi <i>et al.</i> (2020), Yunusa <i>et al.</i> (2023) y Iwubeh <i>et al.</i> (2020)
Turquía	<i>Potamogeton gramineus</i> , <i>Myriophyllum spicatum</i> , <i>Ceratophyllum demersum</i> , <i>Salvinia natans</i>	4	Kuppusamy <i>et al.</i> (2020) y Alp <i>et al.</i> (2024)
Canadá	<i>Lemna gibba</i> , <i>Potamogeton pectinatus</i> , <i>Myriophyllum spicatum</i>	3	Huang <i>et al.</i> (1995), Harp <i>et al.</i> (2018) y Marwood <i>et al.</i> (2001)
Brasil	<i>Ulva lactuca</i> , <i>Eichhornia crassipes</i> , <i>Echinochloa polystachya</i>	3	Pilatti <i>et al.</i> (2016), Lopes <i>et al.</i> (2014), Lopes <i>et al.</i> (2011), Crema (2011) y Lopes <i>et al.</i> (2009)
Irak	<i>Ceratophyllum demersum</i> , <i>Typha domingensis</i> , <i>Phragmites australis</i>	3	Hassan <i>et al.</i> (2020) y Mazee (2018)

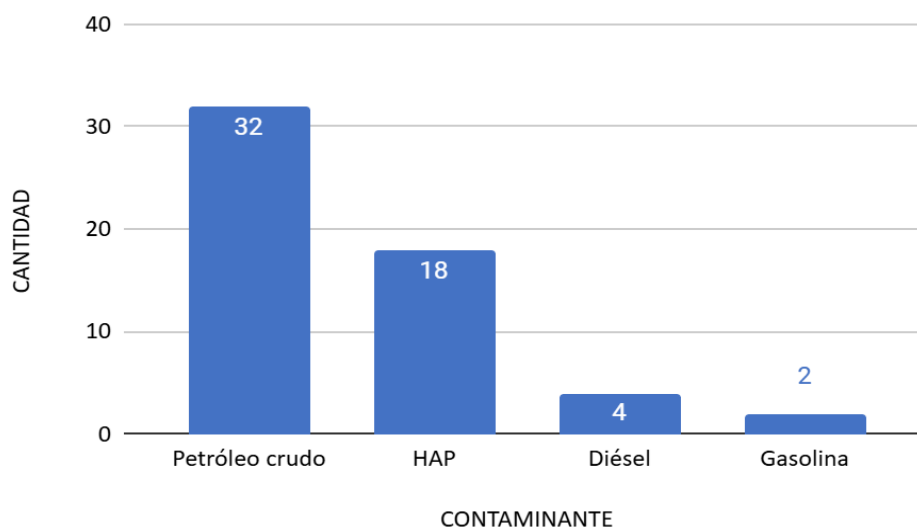
Alemania	<i>Lemna minor, Typha latifolia</i>	2	Becker <i>et al.</i> (2002) y Ahmad (2021)
Rusia	<i>Eichhornia crassipes, Pistia stratiotes</i>	2	Zhilkina <i>et al.</i> (2024)
Nueva Zelanda	<i>Riccia fluitans</i>	1	Burritt (2008)
Polonia	<i>Lemna minor</i>	1	Marszałek <i>et al.</i> (2023)
Irán	<i>Lemna minor</i>	1	Zazouli <i>et al.</i> (2023)
Corea del Sur	<i>Lemna minor</i>	1	Cui <i>et al.</i> (2022)
Estonia	<i>Lemna minor</i>	1	Blinova <i>et al.</i> (2015)
República Checa	<i>Lemna minor</i>	1	Zežulka <i>et al.</i> (2013)
Malasia	<i>Eleocharis ochrostachys</i>	1	Sbania <i>et al.</i> (2020) y Al-Baldawi <i>et al.</i> (2021)
India	<i>Pistia stratiotes</i>	1	Goswami <i>et al.</i> (2023)
Italia	<i>Cladophora glomerata</i>	1	Ceschin <i>et al.</i> (2020)

Distribución de contaminantes analizados en la revisión

En esta revisión, se identifica un mayor enfoque de los artículos seleccionados en el estudio del petróleo crudo, analizado en 32 artículos, seguido por los HAP en 18 artículos, y por último el diésel y gasolina, con cuatro y dos artículos respectivamente (Figura 4). Asimismo, es preciso recalcar que, en los artículos revisados, algunos investigadores hicieron comparaciones entre dos a más contaminantes.

Figura 4

Contaminantes analizados en los artículos seleccionados para los principales efectos ecotoxicológicos del petróleo y sus derivados en las plantas acuáticas.



El enfoque predominante en el estudio del petróleo crudo en los artículos revisados refleja la magnitud de su impacto ambiental y la complejidad asociada con su remediación. Como destaca Ahmed & Fakhruddin (2018), el petróleo crudo contiene una mezcla diversa de hidrocarburos, que presentan desafíos únicos para la biodegradación y el control ambiental. Esta diversidad química puede explicar por qué es objeto de mayor investigación en comparación con otros contaminantes. El interés en los HAP, también es comprensible debido a su persistencia en el ambiente y toxicidad conocida, lo que los convierte en contaminantes prioritarios según varias agencias regulatorias (Hassan *et al.*, 2020).

Por otro lado, la menor atención hacia el diésel y la gasolina podría deberse a que estos contaminantes suelen estar presentes en derrames de menor escala y tienen una menor persistencia relativa en comparación con los HAP y el petróleo crudo (Lambert, 2017). Asimismo, el estudio comparativo de múltiples contaminantes, mencionado en algunos artículos, proporciona una perspectiva integral sobre los efectos tóxicos que estos generan en las plantas acuáticas, lo que, a su vez, permite entender cómo las respuestas de las plantas varían frente a diferentes hidrocarburos, destacando la importancia de evaluar los efectos acumulativos en ecosistemas acuáticos contaminados.

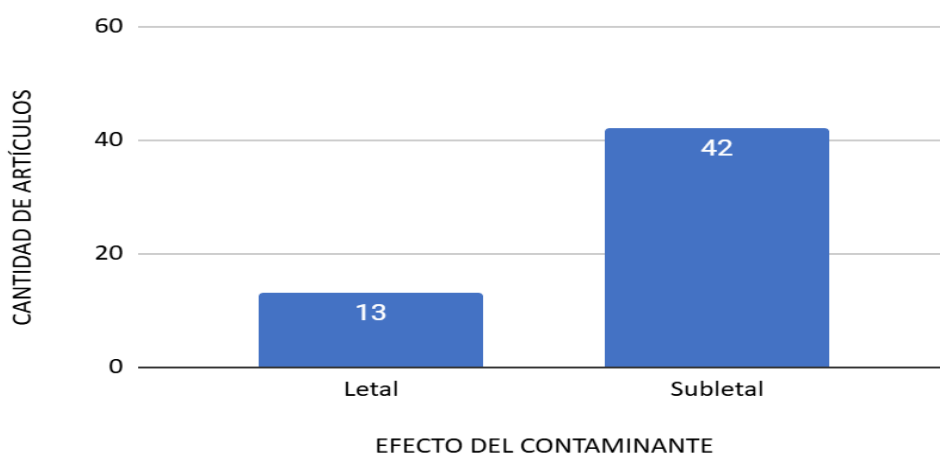
Por ejemplo, Ceschin *et al.* (2020) subrayan que las plantas acuáticas no solo actúan como bioindicadores de la contaminación, sino que también responden con cambios morfológicos y fisiológicos significativos dependiendo del tipo y la concentración de los contaminantes presentes. Este enfoque es crucial para diseñar estrategias efectivas de evaluación y recuperación de ecosistemas acuáticos.

Efectos letales y subletales

Al examinar los 53 artículos, se identifica que la mayoría de los estudios se centra en investigar los efectos subletales del petróleo en las plantas acuáticas, obteniendo un total de 41 artículos (Figura 5). Sin embargo, en un artículo se abordó efectos letales y subletales.

Figura 5

Contaminantes analizados en los artículos seleccionados para los principales efectos ecotoxicológicos del petróleo y sus derivados en las plantas acuáticas.



Esta perspectiva refleja el interés de la comunidad científica en comprender las respuestas de las plantas a niveles de contaminación que no causan la muerte inmediata pero que pueden comprometer su salud y funciones vitales a largo plazo. Como en el caso de Liu *et al.* (2009), donde evidencian que la exposición a hidrocarburos como los HAP induce un estrés oxidativo rápido y complejo en las plantas, afectando procesos celulares esenciales.

Asimismo, estos efectos incluyen cambios en la fotosíntesis, alteraciones en el crecimiento y reducción de la capacidad de transporte de oxígeno, procesos cruciales para el mantenimiento de la calidad del agua y el equilibrio ecosistémico (Colmer, 2003). Por otro lado, los efectos letales, aunque menos estudiados, son esenciales para comprender los límites de tolerancia de las plantas y las condiciones en las que los ecosistemas acuáticos colapsan debido a la contaminación por hidrocarburos (Ahmed & Fakhruddi, 2018).

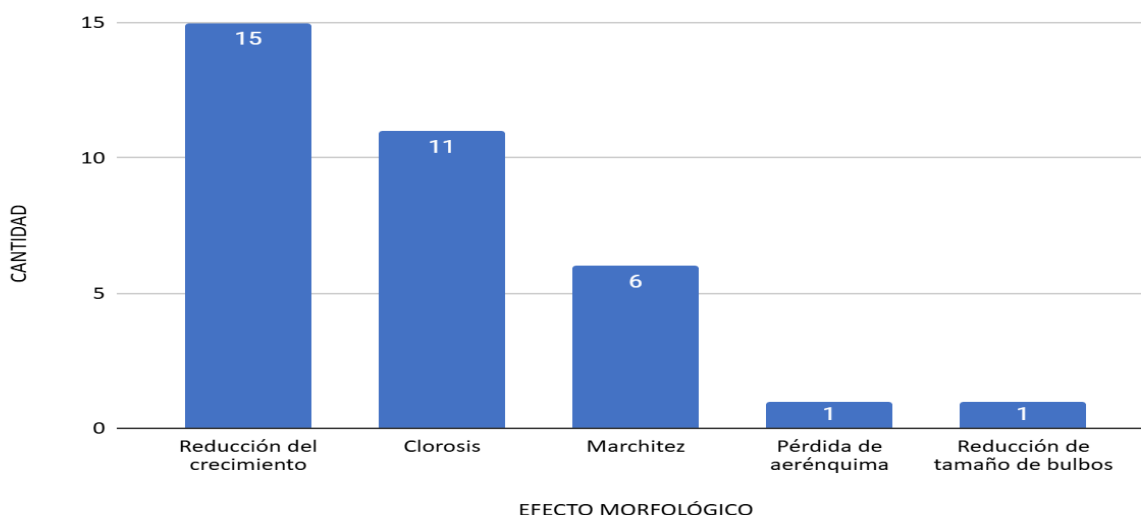
Además, el único artículo que aborda tanto efectos letales como subletales subraya la necesidad de investigar ambos tipos de impactos para obtener una visión más completa de la toxicidad del petróleo y sus derivados (Stanley *et al.*, 1984), debido a que este enfoque integrado es clave para desarrollar estrategias de mitigación y conservación más efectivas en ambientes acuáticos afectados.

Efectos tóxicos morfológicos

En el análisis de los efectos morfológicos del petróleo y sus derivados en plantas acuáticas (Figura 6), se encontró que la reducción del crecimiento es el impacto más estudiado, siendo abordado en 15 artículos. Le sigue la clorosis, presente en 11 estudios, y la marchitez, descrita en seis artículos. Por otro lado, efectos como la pérdida del aerénquima y la reducción del tamaño de los bulbos fueron los menos frecuentes, siendo ambos efectos encontrados en el mismo artículo. Estos resultados reflejan una tendencia hacia la evaluación de impactos visibles y medibles en el desarrollo y la morfología de las plantas acuáticas.

Figura 6

Artículos revisados según el efecto morfológico del petróleo y sus derivados en plantas acuáticas



Los efectos identificados en el presente trabajo, como la reducción del crecimiento, clorosis, marchitez, pérdida de aerénquima y reducción en el tamaño de los bulbos, pueden deberse por la acción directa que presentan los derivados del petróleo sobre las plantas acuáticas. La relación que existe de este compuesto tóxico con las hojas y raíces forma una capa que complica la absorción del agua y los nutrientes necesarios para la planta (Arroyave, 2004). La disminución del crecimiento, es debido a que las plantas con presencia de petróleo no detienen su desarrollo por completo, pero lo ralentizan por las condiciones adversas impuestas por los derivados del petróleo. Estas sustancias limitan el acceso a los recursos claves

como agua, gases y nutrientes, influyendo en la capacidad de las plantas para alcanzar su tamaño y forma potenciales. Por otro lado, la clorosis y marchitez reflejan daños en los tejidos superficiales y en las células que componen la epidermis, afectando su integridad y capacidad de retención de agua (Pernía *et al.*, 2016).

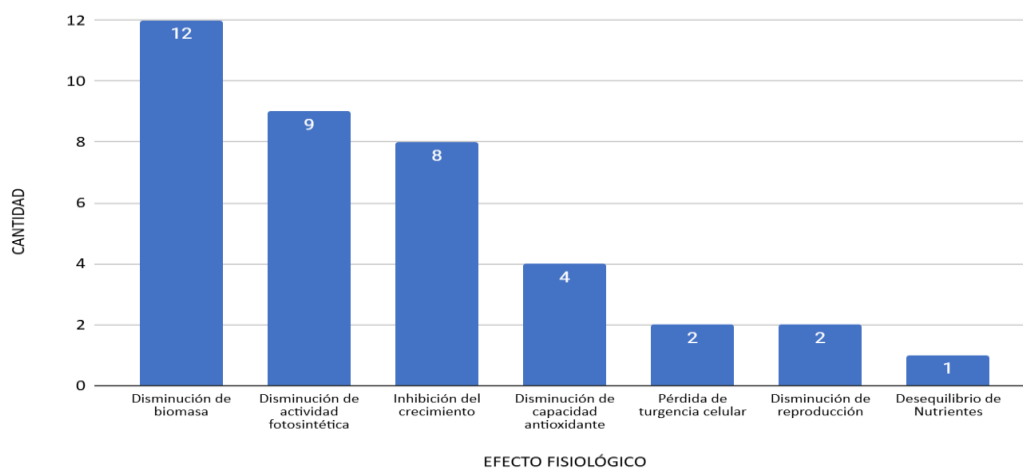
También, la pérdida del aerénquima, considerado como un tejido especializado en el transporte de gases, ocurre porque los hidrocarburos interrumpen su formación o destruyen sus espacios intercelulares, esenciales para el intercambio de gases en ambientes acuáticos (Apóstolo, 2005). Por último, la reducción del tamaño de los bulbos sugiere un impacto en el desarrollo estructural de las zonas de almacenamiento, posiblemente causado por una alteración en la acumulación de reservas o un impedimento físico al crecimiento del bulbo. Estos efectos morfológicos destacan cómo la contaminación por petróleo afecta de forma visible y directa la estructura externa de las plantas (Martínez *et al.*, 2013).

Efectos tóxicos fisiológicos

Al analizar los efectos fisiológicos, se observa que la disminución de biomasa es el impacto más reportado. Le siguen la disminución de la actividad fotosintética, y la inhibición del crecimiento. Otros efectos, como la disminución de la capacidad antioxidante, la pérdida de turgencia celular y la disminución de la reproducción, reciben menor atención. Por último, el desequilibrio de nutrientes es el menos estudiado (Figura 7).

Figura 7

Artículos revisados según el efecto fisiológico del petróleo y sus derivados en plantas acuáticas.



El efecto fisiológico observado en plantas acuáticas expuestas al petróleo y sus derivados puede explicarse por varios mecanismos relacionados con la toxicidad de estos compuestos. La disminución de la biomasa y la inhibición del crecimiento están asociadas a la interferencia del petróleo en los procesos metabólicos esenciales, como la síntesis de proteínas y la respiración celular, al generar estrés oxidativo que daña componentes celulares vitales (Ahmed, 2018).

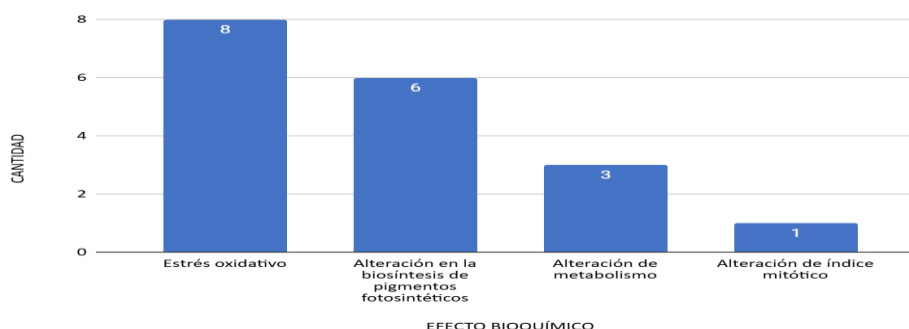
La disminución de la actividad fotosintética puede atribuirse al bloqueo de la luz debido a la capa de petróleo en la superficie del agua y a la alteración de las clorofilas por compuestos tóxicos, lo que reduce la capacidad de capturar energía lumínica (Shah, 2024). Asimismo, la disminución de la capacidad antioxidante y la pérdida de turgencia celular son consecuencias del estrés oxidativo que provoca un desequilibrio entre especies reactivas de oxígeno y antioxidantes endógenos, lo que daña las membranas celulares y compromete la homeostasis hídrica (Liu, 2009). La disminución de la reproducción se relaciona con alteraciones en la división celular y la formación de gametos debido a los efectos tóxicos de los hidrocarburos, mientras que el desequilibrio de nutrientes se explica por la alteración en la absorción de nutrientes esenciales desde el medio debido a la contaminación del agua (Kuppusamy, 2020).

Efectos tóxicos bioquímicos

Respecto al análisis de los efectos bioquímicos, el estrés oxidativo resalta como el efecto más estudiado. Le sigue la alteración en la biosíntesis de pigmentos fotosintéticos. La alteración del metabolismo fue menos frecuente, mientras que la alteración del índice mitótico se mencionó en solo un artículo (Figura 8).

Figura 8

Artículos revisados según el efecto bioquímico del petróleo y sus derivados en plantas acuáticas.



Estos resultados subrayan la relevancia de los mecanismos bioquímicos en la respuesta de las plantas acuáticas a la contaminación por hidrocarburos, destacando especialmente el impacto del estrés oxidativo como una respuesta clave frente al daño celular inducido por estos compuestos, esto ocurre porque la exposición al petróleo genera especies reactivas de oxígeno (ROS), como el peróxido de hidrógeno y los radicales libres, debido a la oxidación de los hidrocarburos presentes en el contaminante. Estas ROS son altamente reactivas y causan daños en lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, afectando la integridad de las membranas celulares y el transporte de nutrientes. Aunque las plantas activan sistemas antioxidantes para mitigar el daño, estas respuestas suelen ser insuficientes frente a la acumulación continua de ROS (Zhang *et al.*, 2017).

Asimismo, los hidrocarburos interfieren en rutas metabólicas clave, inhibiendo enzimas esenciales como la protoclorofilida reductasa. Este fenómeno, combinado con el daño oxidativo en los cloroplastos, disminuye la producción de clorofila y carotenoides, esenciales para la captación de luz durante la fotosíntesis (Gao *et al.*, 2015). Por otro lado, el metabolismo del nitrógeno también se ve afectado, debido a que la actividad de enzimas como la nitrato reductasa se inhibe, limitando la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos. Estas interrupciones metabólicas se agravan con la acumulación de hidrocarburos tóxicos, que actúan como inhibidores de enzimas en ciclos críticos como el de Calvin y el de Krebs, restringiendo la producción de energía y precursores biosintéticos (Wang *et al.*, 2018).

Por último, también se ha registrado la alteración del índice mitótico, que es un indicador de la tasa de división celular, lo que refleja que los hidrocarburos generan daños en el ADN, como roturas en las cadenas y alteraciones en las bases nitrogenadas, afectando la replicación del material genético. Estos daños también interfieren con la formación del huso mitótico, lo que limita el crecimiento celular. En respuesta, las células pueden activar mecanismos de reparación o inducir apoptosis, lo cual ralentiza el desarrollo y la regeneración de tejidos en las plantas expuestas (Liu *et al.*, 2020).

El presente artículo de revisión pone de manifiesto la diversidad de impactos tóxicos del petróleo y sus derivados en plantas acuáticas, abarcando efectos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos. En términos generales, los estudios revisados evidencian una mayor atención a los efectos subletales, particularmente en aspectos como la reducción del crecimiento, la clorosis y el estrés oxidativo, lo que resalta la vulnerabilidad de las plantas acuáticas a la contaminación crónica. Entre los efectos fisiológicos más comunes se encuentran la

disminución de la biomasa, la inhibición de la fotosíntesis y alteración de la capacidad antioxidante, mientras que, a nivel bioquímico, el estrés oxidativo y la alteración en la biosíntesis de pigmentos fotosintéticos fueron los más reportados.

En segundo lugar, si bien la mayoría de los estudios se enfocan en contaminantes específicos como el petróleo crudo o los HAP, es importante destacar que los escenarios de contaminación real suelen involucrar mezclas complejas de hidrocarburos, por lo que investigaciones futuras deberían priorizar estudios integrados que consideren múltiples contaminantes y sus posibles interacciones.

En tercer lugar, los efectos tóxicos inducidos por el petróleo en las plantas acuáticas pueden alterar las interacciones ecológicas, como la competencia por nutrientes y la disponibilidad de hábitats, lo que puede llevar a una modificación en las relaciones entre las especies. Estos cambios no solo impactan a las plantas, sino que también afectan a los organismos que dependen de ellas, como herbívoros, invertebrados acuáticos y especies de peces. En consecuencia, el daño a la estructura de las comunidades acuáticas puede tener efectos en cascada en la salud y funcionalidad de todo el ecosistema.

Finalmente, estos hallazgos son de gran relevancia para el diseño de estrategias de remediación y monitoreo ambiental, ya que las plantas acuáticas, además de ser indicadores sensibles de contaminación, desempeñan un papel esencial en el mantenimiento de la biodiversidad y la calidad de los ecosistemas acuáticos. Por ende, es imperativo continuar explorando los efectos a largo plazo de los hidrocarburos en estos organismos y desarrollar tecnologías que minimicen su impacto en ambientes vulnerables.

REFERENCIAS

- Ahmad, A. (2022). Phytoremediation of heavy metals and total petroleum hydrocarbon and nutrients enhancement of *Typha latifolia* in petroleum secondary effluent for biomass growth. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 5777-5786.
- Ahmed, F., & Fakhrudin, A.N.M. (2018). A review on environmental contamination of petroleum hydrocarbons and its biodegradation. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 11, 1-7. <https://dx.doi.org/10.19080/IJESNR.2018.11.555811>
- Akapo, A. A. R., Omidiji, S. O., & Otitolaju, A. A. (2011). Morphological and anatomical effects of crude oil on *Pistia stratiotes*. *The Environmentalist*, 31, 288-298.

- Al-Baldawi, I. A., Abdullah, S. R. S., Almanso, A. F., & Jasim, S. S. (2021). Phytotoxicity of *Salvinia molesta* in diesel exposure. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, *17*, 13-21.
- Alexander, S. K., & Webb Jr, J. W. (1983). Effects of oil on growth and decomposition of *Spartina alterniflora*. International Oil Spill Conference, No. 1, pp. 529-532). American Petroleum Institute.
- Alp-Turgut, F. N., Yildiztugay, E., Ozfidan-Konakci, C., Tarhan, İ., Öner, M., & Gulenturk, C. (2024). Evaluation of the phytotoxicity and accumulation potential of nitro-polycyclic aromatic hydrocarbon, 3-nitrofluoranthene, on water status, photosystem II efficiency, antioxidant activity and ROS accumulation in *Salvinia natans*. *Science of The Total Environment*, *954*, 176335.
- Al-Robai, H. A., Jasim, D. J., Jassam, S. A., Jasim, H. M., Ameen, H. F. M., & Al-Rubaye, A. H. (2023, December). Petroleum's Influence on the Aquatic Environment. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1262*, 022025.
- Apóstolo, N. (2005). Anatomical characteristics of the coastal vegetation of the Salado River (Northwest of the province of Buenos Aires, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, *40*, 215-227.
- Armstrong, W., Brändle, R., & Jackson, M. B. (1994). Mechanisms of flood tolerance in plants. *Acta Botanica Neerlandica*, *43*, 307-358.
- Arroyave, M.D.P. (2004). La lenteja de agua (*Lemna minor* L.): una planta acuática promisoría. *Revista eia*, *1*, 33-38.
- Bamidele, J. F., & Eshagberi, G. O. (2015). Effects of water soluble fractions of crude oil, diesel fuel and gasoline on *Salvinia nymphellula* (Desv). *Journal of Natural Sciences Research*, *5*, 31-37.
- Becker, A. M., Heise, S., & Ahlf, W. (2002). Effects of phenanthrene on *Lemna minor* in a sediment–water system and the impacts of UVB. *Ecotoxicology*, *11*, 343-348.
- Blinova, I., Kanarbik, L., Sihtmäe, M., & Kahru, A. (2016). Toxicity of water accommodated fractions of Estonian shale fuel oils to aquatic organisms. *Archives of environmental contamination and toxicology*, *70*, 383-391.
- Burritt, D. J. (2008). The polycyclic aromatic hydrocarbon phenanthrene causes oxidative stress and alters polyamine metabolism in the aquatic liverwort *Riccia fluitans* L. *Plant, cell & environment*, *31*, 1416-1431.
- Ceschin, S., Bellini, A., & Scalici, M. (2021). Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 4975-4988.

- Chai, L., Li, J., Zhang, Y., Liu, Y., & Wu, Z. (2021). Growth and antioxidant response in *Spirodela polyrrhiza* under linear alkylbenzene sulfonate, naphthalene and their joint stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 61115-61127.
- Chai, L., Yang, L., Zhang, Y., Zhou, Y., Wang, F., & Wu, Z. (2020). Antagonism or synergism? Responses of *Hydrocharis dubia* (Bl.) Backer to linear alkylbenzene sulfonate, naphthalene and their joint exposure. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 200, 110747.
- Colmer, T. D. (2003). Long-distance transport of gases in plants: a perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant, Cell & Environment*, 26, 17-36.
- Cui, R., Kwak, J. I., & An, Y. J. (2022). Acute and multigenerational effects of petroleum-and cellulose-based microfibers on growth and photosynthetic capacity of *Lemna minor*. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113953.
- DeLaune, R. D., Pezeshki, S. R., Jugsujinda, A., & Lindau, C. W. (2003). Sensitivity of US Gulf of Mexico coastal marsh vegetation to crude oil: Comparison of greenhouse and field responses. *Aquatic Ecology*, 37, 351-360.
- Ekperusi, A. O., Nwachukwu, E. O., & Sikoki, F. D. (2020). Assessing and modelling the efficacy of *Lemna paucicostata* for the phytoremediation of petroleum hydrocarbons in crude oil-contaminated wetlands. *Scientific Reports*, 10, 8489.
- Ferrell, R. E., Seneca, E. D., & Linthurst, R. A. (1984). The effects of crude oil on the growth of *Spartina alterniflora* Loisel. and *Spartina cynosuroides* (L.) Roth. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 83, 27-39.
- Fonseca, M., Piniak, G. A., & Cosentino-Manning, N. (2017). Susceptibility of seagrass to oil spills: A case study with eelgrass, *Zostera marina* in San Francisco Bay, USA. *Marine Pollution Bulletin*, 115, 29-38.
- Goswami, M., Patowary, R., Patowary, K., Sarma, H. P., Rabha, S., Devi, B., ... & Devi, A. (2023). Environment friendly treatment of petroleum hydrocarbon contaminated formation water: mechanisms and consequences for degradation and adsorption. *Water Resources and Industry*, 30, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100224>
- Haq, I., & Kalamdhad, A. S. (2021). Phytotoxicity and cyto-genotoxicity evaluation of organic and inorganic pollutants containing petroleum refinery wastewater using plant bioassay. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101651.
- Hassan, F. M., Al-Obaidy, A. H. M. J., & Khalaf, S. M. (2020). The polyaromatic hydrocarbons types, concentrations, and sources in particulate matter and aquatic plant in Tigris

- River, Baghdad, Iraq. *Desalination and Water Treatment*, 198, 314-322.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26078>
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2008). Secondary metabolites. *Introduction to Plant Physiology*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Huang, X. D., Dixon, D. G., & Greenberg, B. M. (1995). Increased polycyclic aromatic hydrocarbon toxicity following their photomodification in natural sunlight: impacts on the duckweed *Lemna gibba* L. G-3. *Ecotoxicology and environmental safety*, 32, 194-200.
- Iwubeh, J. C., Ikechukwu, I. A., Praise, E. T., Azubuikwe, A. C., & Francise, A. C. (2020). Effects of crude oil treatment on the morphology and performance of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart) Solms) in Niger-Delta region of Nigeria. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 5, 151-156.
- Judy, C. R., Graham, S. A., Lin, Q., Hou, A., & Mendelsohn, I. A. (2014). Impacts of Macondo oil from Deepwater Horizon spill on the growth response of the common reed *Phragmites australis*. *Marine pollution bulletin*, 79, 69-76.
- Kuppusamy, S., Maddela, N. R., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Kuppusamy, S., Maddela, N. R., & Venkateswarlu, K. (2020). Ecological impacts of total petroleum hydrocarbons. *Total Petroleum Hydrocarbons: Environmental Fate, Toxicity, and Remediation*, Springer, pp. 95-138. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24035-6_5
- Lambert, T. (2017). The effect of petroleum fuels and biofuels on aquatic plant life. *Journal of McPherson College Science*, 25, 29. <https://archive.mcpherson.edu/wp-content/uploads/2021/01/2017252933-LambertT.pdf>
- Liu, H., Weisman, D., Ye, Y. B., Cui, B., Huang, Y. H., Colón-Carmona, A., & Wang, Z. H. (2009). An oxidative stress response to polycyclic aromatic hydrocarbon exposure is rapid and complex in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science*, 176, 375-382.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2008.12.002>
- Lopes, A., & Piedade, M. T. F. (2011). Time of exposure and oil dosage affecting biomass production of the Amazonian semi-aquatic grass *Echinochloa polystachya*. *Rodriguésia*, 62, 901-907.
- Lopes, A., & Piedade, M. T. F. (2014). Experimental study on the survival of the water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms—Pontederiaceae) under different oil doses and times of exposure. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 13503-13511.

- Lopes, A., da Rosa-Osman, S. M., & Piedade, M. T. F. (2009). Effects of crude oil on survival, morphology, and anatomy of two aquatic macrophytes from the Amazon floodplains. *Hydrobiologia*, 636, 295-305.
- Marszałek, A., Dudziak, M., & Kudlek, E. (2023). Analysis of organic and inorganic compounds in rainwater from the highway and its treatment in membrane processes. *Desalination and Water Treatment*, 305, 217-226. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29836>
- Martínez-Nieto, P. & Chaparro-Rico, B. (2013). Microorganismos benéficos para el compostaje de macrófitas invasoras de la laguna colombiana de Fúquene. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. 6, 73–88. <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/36967>
- Marwood, C. A., Solomon, K. R., & Greenberg, B. M. (2001). Chlorophyll fluorescence as a bioindicator of effects on growth in aquatic macrophytes from mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 20, 890-898.
- Mazee, M. (2018). Effect of oil pollution on growing and diversity of aquatic plants. *Plant Archives* 18, 2649-2655. [https://www.plantarchives.org/18-02/2649-2655%20\(4252\).pdf](https://www.plantarchives.org/18-02/2649-2655%20(4252).pdf)
- Olguín, E. J., Hernández, M. E., & Sánchez-Galván, G. (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 23, 139-154.
- Özbay, H. (2016). The effects of motor oil on the growth of three aquatic macrophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 504-508. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.08.005>
- Perhar, G., & Arhonditsis, G. B. (2014). Aquatic ecosystem dynamics following petroleum hydrocarbon perturbations. *Journal of Great Lakes Research*, 40, 56-72.
- Pernía, B., Mero, M., M., J., Bravo, K., Moran, N., Zambrano, J., Cornejo, X., Benavides A. & Torres, G. (2016). Plantas acuáticas con potencial para fitoextracción de Cadmio en arrozales del Cantón Daule, provincia del Guayas, Ecuador. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 10, 37-51.
- Pezeshki, S. R., Jugsujinda, A., & DeLaune, R. D. (1998). Responses of selected US Gulf coast marsh macrophyte species to oiling and commercial cleaners. *Water, Air, and Soil Pollution*, 107, 185-195.

- Pilatti, F. K., Ramlov, F., Schmidt, E. C., Kreusch, M., Pereira, D. T., Costa, C., ... & Maraschin, M. (2016). *In vitro* exposure of *Ulva lactuca* Linnaeus (Chlorophyta) to gasoline—Biochemical and morphological alterations. *Chemosphere*, *156*, 428-437.
- Rivenbark, K. J., Fawkes, L. S., Nikkhah, H., Wang, M., Sansom, G. T., Beykal, B., ... & Phillips, T. D. (2024). Using *L. minor* and *C. elegans* to assess the ecotoxicity of real-life contaminated soil samples and their remediation by clay-and carbon-based sorbents. *Environmental Pollution*, *347*, 123762. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123762>
- Rosso, P. H., Pushnik, J. C., Lay, M., & Ustin, S. L. (2005). Reflectance properties and physiological responses of *Salicornia virginica* to heavy metal and petroleum contamination. *Environmental pollution*, *137*, 241-252.
- Sairam, R. K., & Tyagi, A. (2004). Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current Science*, *86*, 407-421.
- Shah, G., & Soni, V. (2024). Comprehensive insights into the impact of oil pollution on the environment. *Regional Studies in Marine Science*, *74*, 103516. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103516>
- Softcheck, K. A. (2021). Marine algal sensitivity to source and weathered oils. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *40*, 2742-2754.
- Stanley, D., Rice, D., Moles, A., Karinen, J., Kern, S., Carls, M., Brodersen, C., Gharrett, J., & Malin, M. (1984). *Outer Continental Shelf Environmental Assessment Program Research Unit 72*. <https://epis.boem.gov/final%20reports/975.pdf>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2014). *Plant Physiology and Development*. Sinauer Associates, Inc., Publishers Sunderland, Massachusetts. pp, 761.
- Turner, R. E., & Bodker, J. E. (2016). The effects of N, P and crude oil on the decomposition of *Spartina alterniflora* belowground biomass. *Wetlands Ecology and Management*, *24*, 373-380.
- Wan, X., Steinman, A. D., Shu, X., Cao, Q., Yao, L., & Xie, L. (2019). Combined toxic effects of microcystin-LR and phenanthrene on growth and antioxidant system of duckweed (*Lemna gibba* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *185*, 109668.
- Willis, J. M., Hester, M. W., Rouhani, S., Steinhoff, M. A., & Baker, M. C. (2016). Field assessment of the impacts of Deepwater Horizon oiling on coastal marsh vegetation of Mississippi and Alabama. *Environmental toxicology and chemistry*, *35*, 2791-2797.
- Wu, H., Hussin, N., Sheikh, S., Idris, M., Abu, H., Al-Baldawi, I., Hamed, O. & Izzati, N. (2024). Remediation of PAHs-contaminated water and sand by tropical plant

- (*Eleocharis ochrostachys*) through sub-surface flow system. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101044. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101044>
- Yin, Y., Wang, X., Sun, Y., Guo, H., & Yin, D. (2008). Bioaccumulation and oxidative stress in submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* L. upon exposure to pyrene. *Environmental Toxicology: An International Journal*, 23, 328-336.
- Yu, X., Kong, L., Lan, T., Chen, J., Fu, Y., Sun, Q. & Liu, T. (2024). An integrated enrichment-enhancement membrane SERS substrate for rapid detection of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic environments. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 328, 125429. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125429>.
- Yunusa U. A., & Meguellati, K. (2023). Phytotreatment of water contaminated with waste lubricating oil using *Pistia stratiotes*. *Chemistry and Ecology*, 39, 423-437.
- Zazouli, M. A., Asghari, S., Tarrahi, R., Lisar, S. Y. S., Babanezhad, E., & Dashtban, N. (2023). The potential of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of phenanthrene and pyrene. *Environmental Engineering Research*, 28, 210592. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.592>
- Zeulka, Š. Kummerová, M., Babula, P., & Váňová, L. (2013). *Lemna minor* exposed to fluoranthene: growth, biochemical, physiological and histochemical changes. *Aquatic toxicology*, 140, 37-47.
- Zhang, G., Pan, Z., Wang, X., Mo, X., & Li, X. (2015). Distribution and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the food web of Nansi Lake, China. *Environmental monitoring and assessment*, 187, 1-12.
- Zhilkina, T., Gerasimova, I., Babich, T., Kanapatskiy, T., Sokolova, D., Kadnikov, V., & Kamionskaya, A. (2024). Evaluation of the phytoremediation potential of aquatic plants and associated microorganisms for the cleaning of aquatic ecosystems from oil products. *Sustainability*, 16, 9288.

Fernando Alex Ascencios Zavala¹, Nicole Ariana Canales Soller¹, Senaida Caqui Silva¹ Kristell Gonzales Gonzales¹, Jean Pierre Andres Miranda Atiquipa¹, Vania Xiomara Pelaez Yparraguirre¹, Adriana Valle Huaman¹, Yen Vila Huaman¹, 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