

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Bacterias con potencial uso en la biorremediación de aguas contaminadas con plaguicidas: Una revisión sistemática y análisis cientométrico

Bacteria with potential use in the bioremediation of water contaminated with pesticides: A systematic review and scientometric analysis

Authors/Autores: Mendoza Flores, I., Ortega Martínez, L. D., Agredo-Collazos, J. J., Rodríguez Soria, V., Contreras Mioni, L., Leyva Morales, J. B.

ID: e1804

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1804>

Received/Fecha de recepción: October 31th 2024

Accepted /Fecha de aceptación: March 03th 2025

Available online/Fecha de publicación: March 10th 2025

Please cite this article as/Como citar este artículo: Mendoza Flores, I., Ortega Martínez, L. D., Agredo-Collazos, J. J., Rodríguez Soria, V., Contreras Mioni, L., Leyva Morales, J. B. (2025). Bacteria with potential use in the bioremediation of water contaminated with pesticides: A systematic review and scientometric analysis. *Revista Bio Ciencias*, 12, e1804. <https://doi.org/10.15741/revbio.12.e1804>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

Bacterias con potencial uso en la biorremediación de aguas contaminadas con plaguicidas: Una revisión sistemática y análisis cuantitativo

Bacteria with potential use in the bioremediation of water contaminated with pesticides: A systematic review and scientometric analysis

Bacteria for pesticide bioremediation in water: a review and analysis/

Bacterias para biorremediación de plaguicidas en agua: una revisión y análisis

Mendoza Flores, I.¹. (<https://orcid.org/0009-0009-7478-6994>), Ortega Martínez, L. D.¹. (<https://orcid.org/0000-0003-4672-8809>), Agredo-Collazos, J. J.¹. (<https://orcid.org/0000-0001-7171-5175>), Rodríguez Soria, V.¹. (<https://orcid.org/0000-0002-4956-2480>), Contreras Mioni, L.¹. (<https://orcid.org/0000-0003-1927-7416>), Leyva Morales, J. B.^{2,3}. (<https://orcid.org/0000-0001-6149-7506>).

¹Facultad de Biotecnología, Decanato de Ciencias de la vida y la salud, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla 7241, México

²Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo 42184, México.

³Centro de Investigación en Recursos Naturales y Sustentabilidad (CIRENYS), Universidad Bernardo O'Higgins, Avenida Viel 1497, Santiago de C.P. 8370993, Chile

*Corresponding Author:

Verónica Rodríguez Soria. Dpto o Unidad académica. Universidad Popular Autónoma Del Estado De Puebla (UPAEP). Calle 21sur, 1103, Barrio de Santiago. C.P 72410, Puebla, Puebla, México. Teléfono (222) 229 9400 ext. 7424. E-mail: veronica.rodriguez@upaep.mx

RESUMEN

Entre los contaminantes más dañinos para ambiente y la salud humana se encuentran diversos tipos de plaguicidas utilizados ampliamente en la agricultura, los cuales presentan efectos genotóxicos y citotóxicos. La biorremediación se perfila como una solución prometedora para mitigar estos efectos adversos. En esta revisión sistemática y análisis cuantitativo, se empleó el modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para identificar las especies bacterianas más utilizadas en la biorremediación de cuerpos de agua contaminados con plaguicidas. Se utilizó la base de datos SCOPUS y herramientas como R Studio y VOSviewer para el análisis. Los resultados revelan que los plaguicidas organofosforados, especialmente el clorpirifos, son los más investigados para la degradación microbiana, destacando el uso de especies bacterianas como

Pseudomonas, *Enterobacter* y *Bacillus*. Además, el análisis cuantitativo resalta la alta producción científica en países como China, Dinamarca y Egipto, proporcionando una visión integral sobre las contribuciones y colaboraciones clave en este campo. También se identificaron los principales investigadores, las comunidades científicas con mayor impacto y los centros de investigación líderes, generando un mapa detallado de las contribuciones y colaboraciones internacionales en este ámbito crítico de la biotecnología

PALABRAS CLAVE:

Clorpirifos, Bacterias, Plaguicidas, Biorremediación, Agua.

ABSTRACT

Among the most harmful contaminants to the environment and human health are various types of pesticides widely used in agriculture, which exhibit genotoxic and cytotoxic effects. Bioremediation emerges as a promising solution to mitigate these adverse effects. In this systematic review and scientometric analysis, the PRISMA model (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) was employed to identify the bacterial species most commonly used in the bioremediation of water bodies contaminated with pesticides. SCOPUS database and tools such as R Studio and VOSviewer were used for the analysis.

The results reveal that organophosphate pesticides, particularly chlorpyrifos are the most commonly studied for microbial degradation, mainly with bacterial genera such as *Pseudomonas*, *Enterobacter*, and *Bacillus*. Furthermore, the scientometric analysis highlights the high scientific output from countries like China, Denmark, and Egypt, providing a comprehensive overview of key contributions and collaborations in this field. Additionally, the analysis identified leading researchers, the most impactful scientific communities, and the leading research centers, creating a detailed map of contributions and international collaborations in this critical area of biotechnology.

KEYWORDS:

Chlorpyrifos, Bacteria, Pesticides, Bioremediation, Water.

Introducción

Las prácticas agrícolas destinadas a satisfacer la creciente demanda de alimentos a nivel mundial están resultando insostenibles, generando impactos negativos significativos tanto en los ecosistemas como en la salud humana. La intensificación de la agricultura, con su dependencia de plaguicidas y fertilizantes a gran escala, ha llevado a una contaminación generalizada del agua, afectando la biodiversidad y la calidad de los recursos hídricos disponibles para el consumo humano (Leyva-Morales *et al.*, 2017; Smith *et al.*, 2017; Ouyang *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2023). Informes recientes del Instituto Internacional para el Manejo del Agua (IWMI) subrayan que la agricultura es el mayor productor de aguas residuales por volumen, agravando el uso de insumos sintéticos que agravan esta crisis (FAO, 2022).

Se estima que aproximadamente el 35 % de todos los agroquímicos utilizados globalmente durante la producción agrícola termina contaminando los sistemas hídricos, que finalmente fluyen hacia ríos y mares (Rad *et al.*, 2022). Este escurrimiento, principalmente causado por el drenaje agrícola asociado con técnicas de riego intensivo, representa una de las mayores amenazas para la salud humana y de los ecosistemas acuáticos destacando la necesidad urgente de estrategias de mitigación efectivas (FAO, 2022). Además, la presencia de contaminantes como nitratos y algunos plaguicidas en cuerpos de agua ha sido vinculada con la pérdida de hasta un 30 % de la biodiversidad

mundial, lo que pone de notoriedad la extensión del daño ecológico causado por estas prácticas agrícolas (ONU, 2015; EPA, 2021).

Anualmente, se estima que se utilizan alrededor de tres mil millones de kilogramos de plaguicidas a nivel mundial. El objetivo principal de este uso masivo es aumentar el rendimiento de los campos de producción agrícola y minimizar las pérdidas de cosechas (Sharma *et al.*, 2020). Sin embargo, debido a que estos agroquímicos no son biodegradables y poseen características recalcitrantes, persisten en el medio ambiente durante largos períodos, constituyendo un riesgo continuo para la salud ecológica y humana (Hossain *et al.*, 2022). La exposición humana a estos residuos tóxicos suele ocurrir a través de la cadena alimentaria, lo que puede desencadenar una serie de efectos adversos en la salud, incluyendo enfermedades crónicas y problemas de desarrollo (Hakeem *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2023; Rincón-Rubio *et al.*, 2024).

Los plaguicidas se clasifican según su función (herbicidas, fungicidas, insecticidas, rodenticidas, entre otros) y las especies específicas que tienen como objetivo exterminar (Niaoumakis *et al.*, 2017). Estos productos químicos incluyen compuestos que actúan como inhibidores de la acetilcolinesterasa y organoclorados, que son sustancias de uso común en la formulación de estos agentes (Bertero *et al.*, 2020).

Dentro de la amplia gama de plaguicidas, encontramos categorías como los carbamatos, piretroides, organoclorados, organofosforados y fosfonoglicinas (glifosato y derivados), entre otros (Gauicha & Bolívar, 2015). Entre estos, los organofosforados se destacan por ser menos recalcitrantes en el medio ambiente, aunque poseen efectos tóxicos más severos para los vertebrados. Estos compuestos representan el 36 % del total de plaguicidas utilizados globalmente y su presencia constante ha sido observada en el mercado desde los años setenta (Badii & Varela, 2015; Briceño *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2023).

Diferentes estudios han confirmado que los plaguicidas pueden causar daños significativos a la salud, incluyendo efectos genotóxicos y citotóxicos, además de provocar serios problemas ambientales (Hernández-Toledano *et al.*, 2020; Sánchez-Alarcón *et al.*, 2021; Girón-Pérez *et al.*, 2022; Robles *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2024). Frente a estos desafíos, se han desarrollado diferentes estrategias de mitigación, entre las cuales la biorremediación en suelo y agua se destaca como una de las más prometedoras. Esta técnica utiliza organismos biológicos (hongos, bacterias o plantas) para descomponer o neutralizar los contaminantes peligrosos presentes en el medio ambiente, ofreciendo una solución sostenible y eficaz para reducir la carga tóxica de los plaguicidas en diversos ecosistemas (Passatore *et al.*, 2014; Saeed *et al.*, 2021; Giri *et al.*, 2021; Bhalla *et al.*, 2022; Mali *et al.*, 2023).

La biorremediación es una tecnología avanzada que emplea sistemas biológicos para reducir, eliminar o transformar contaminantes en suelos, sustratos, agua y aire en compuestos menos tóxicos o inofensivos (Passatore *et al.*, 2014; Saeed *et al.*, 2021; Dash & Osborne, 2023).

Biorremediación aeróbica: Utiliza microorganismos aeróbicos, como bacterias y hongos, para descomponer contaminantes orgánicos como hidrocarburos, en presencia de oxígeno.

Biorremediación anaeróbica: Emplea microorganismos anaeróbicos para degradar contaminantes sin oxígeno, ideal para compuestos como metales pesados y orgánicos pesados.

Fitorremediación: Implica el uso de plantas para absorber y almacenar contaminantes, aprovechando su capacidad natural para acumular metales pesados y otros compuestos orgánicos en sus tejidos.

Biorremediación asistida: Combina técnicas de biorremediación con otras tecnologías, como enmiendas orgánicas y aireación, para optimizar la eficiencia del proceso.

La aplicación de la biorremediación en ambientes acuáticos como ríos, lagos, estanques y acuíferos requiere una evaluación meticulosa de las condiciones ambientales y una selección apropiada de organismos y tecnologías para asegurar una reducción eficiente de la contaminación.

En suelos contaminados se han identificado diversas bacterias capaces de degradar plaguicidas organofosforados, incluyendo géneros como *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Flavobacterium* (Lara, 2021). Estas bacterias son cruciales para la biodegradación de compuestos químicos en el suelo, facilitando la eliminación eficaz de plaguicidas mediante varios mecanismos bioquímicos (García, 2022) entre los que se encuentran:

Hidrólisis: Producen enzimas que rompen los enlaces químicos de los plaguicidas. En los organofosforados, estas enzimas hidrolizan los grupos fosfato, resultando en productos menos tóxicos.

Desmetilación: Capaces de eliminar grupos metilo de los plaguicidas, reduciendo su toxicidad y facilitando su degradación.

Oxidación: Utilizan enzimas como oxidasas y peroxidasas para oxidar los plaguicidas, transformándolos en compuestos más solubles y menos nocivos.

Escisión: Rompen los anillos aromáticos de los compuestos, lo que ayuda a fragmentar las moléculas y promueve su descomposición.

Co-metabolismo: Algunas bacterias utilizan los plaguicidas como fuente secundaria de carbono o energía, transformando incidentalmente estos contaminantes durante su crecimiento.

El objetivo del presente trabajo es identificar y analizar las especies de bacterias utilizadas en la biorremediación de cuerpos de agua contaminados con plaguicidas, mediante una revisión sistemática basada en la metodología PRISMA, con el fin de determinar tendencias, patrones de uso y enfoques innovadores en este campo científico.

Material y Métodos

La metodología de esta investigación se fundamenta en el modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), esta metodología exige reportar cada paso del proceso de selección de artículos (identificación, inclusión y exclusión). Esto incluye la construcción de un diagrama de flujo que documenta la cantidad de estudios evaluados en cada etapa, los resultados se validan, al comparar patrones identificados en los mapas de redes generados con publicaciones clave, asegurando consistencia entre datos cuantitativos y cualitativos. Este diseño metodológico al ser reproducible garantiza que otros investigadores puedan replicar los pasos de selección y análisis para confirmar o contrastar los hallazgos (Page *et al.* 2021). Orientando la investigación con la pregunta clave: ¿Qué especies de bacterias se han empleado en la biorremediación de cuerpos de agua contaminados con plaguicidas según la literatura científica?, esta pregunta asegura que la revisión sea específica y aborde un problema bien definido. Para explorar este campo emergente, se emplearon métodos matemáticos y estadísticos para analizar publicaciones, utilizando la base de datos SCOPUS esta es una de las plataformas que indexa artículos alojados en revistas que tienen un factor de impacto en el Journal Citation Report (JCR) en diferentes cuartiles, que cubre un periodo de diez años (2014-2024). Este análisis cuantitativo se realizó con softwares de código abierto como R studio, bibliometrix y VOSviewer, la inclusión de estos softwares minimiza el sesgo humano en la extracción y análisis de los datos, además de la utilización de herramientas como el análisis de densidad (density mapping) en VOSviewer sugieren probabilidades de coocurrencia entre términos clave y el análisis de redes con métricas como grado de centralidad y modularidad son usadas para determinar la relevancia de ciertos términos o nodos dentro de las redes de información generadas (Dervis, 2019).

Los criterios de inclusión se centraron en artículos con un identificador de objetos digitales (DOI, por sus siglas en inglés), excluyendo aquellos estudios de biorremediación no relacionados directamente con el agua.

El análisis de los mapas de redes nos permite tener una visión innovadora y valiosa sobre cómo los plaguicidas y otros contaminantes se distribuyen y persisten en los ecosistemas acuáticos. Estos mapas permitirán identificar patrones de dispersión y concentración de contaminantes, ayudándonos a orientar estrategias de monitoreo y control más eficaces. Al integrar datos de diferentes fuentes, los mapas de redes no solo ayudan a entender el impacto de los plaguicidas en el medio ambiente, sino también la interacción entre estos, ofreciendo un enfoque holístico que mejora la gestión de los recursos hídricos.

Resultados y Discusión

La búsqueda arrojó un total de 180 artículos, los criterios de exclusión e inclusión se realizaron partiendo de la revisión de los resúmenes de cada artículo que reportaran el plaguicida y la bacteria utilizada en el estudio de biorremediación en agua (Figura 1), la generación de los resultados se creó a partir de artículos que incluyeran el DOI, quedando con un total de 24 publicaciones (Tabla 1). Dentro de las publicaciones consultadas en la revisión sistemática, se encontró que la mayoría de la producción científica provienen de China, seguido de Dinamarca y Egipto.

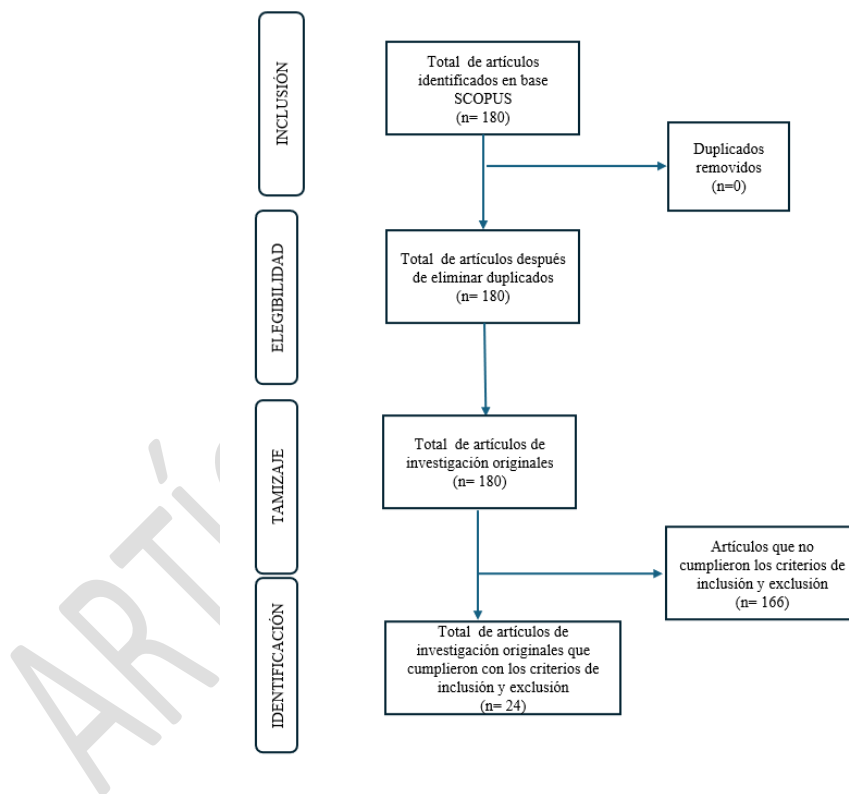


Figura 1. Diagrama del proceso de búsqueda de los artículos de investigación. Fuente: Elaboración propia.

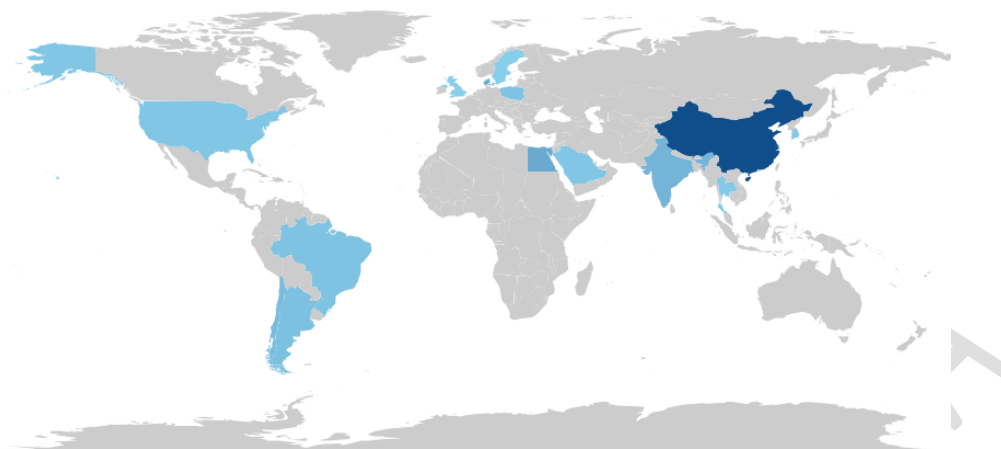


Figura 2. Producción científica de documentos relacionados por país. Fuente: Elaboración propia a partir de bibliometrix con datos de SCOPUS

En la Figura 2, se presenta una visualización detallada de la distribución geográfica de la producción científica sobre el tema estudiado. Notablemente, China se destaca como el principal contribuyente, reflejando su creciente dominio en la investigación global, seguido por países como Dinamarca y Egipto, que también muestran una actividad significativa en este campo. La tendencia resalta el creciente interés y la diversificación en la investigación a nivel mundial, donde incluso naciones con sistemas de investigación emergentes están empezando a hacer aportes significativos (Bin *et al.*, 2024).

Principales Plaguicidas estudiados en su degradación por bacterias en cuerpos de agua

Organofosforados

Los compuestos organofosforados (OP) son los principales plaguicidas utilizados globalmente, y representan un riesgo significativo para el medio ambiente debido a su alta toxicidad. Santillán *et al.* (2020) desarrollaron un biorreactor destinado a la remediación de aguas residuales contaminadas con OP. A través de la investigación, identificaron y aislaron bacterias de suelos contaminados, destacando dos géneros eficaces: *Sphingomonas sp.* y *Brevundimonas sp.* La eficacia de la degradación de OP se evaluó en función de variables como la temperatura, el pH y la tolerancia a diferentes sustratos, observando altas tasas de degradación a 60 °C, con un pH de 10 y en presencia de OP voluminosos como coroxón, cumafós y clorpirifos.

Abdel-Razek *et al.* (2019) exploraron el uso de consorcios de microalgas y cianobacterias para la biorremediación en cuerpos de agua, los resultados mostraron que *Spirulina platensis* es efectiva en la eliminación del plaguicida malatión y metales pesados como cadmio, plomo y níquel en aguas residuales. Talwar *et al.* (2014) aislaron de suelos contaminados con plaguicidas la cepa bacteriana *Ochrobactrum sp.* cepa HZM, la cual demostró utilizar diversos OP como fuentes de carbono, destacando su capacidad para mineralizar el quinalfos, sugiriendo su potencial utilidad en la biorremediación de suelos y aguas contaminadas.

Clorpirifos

Se ha evidenciado que una amplia variedad de microorganismos presenta la capacidad de degradar clorpirifos (CP), principalmente cianobacterias, *Bacillus*, *Streptomyces*, *Enterobacter*

Streptococcus, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, entre otros (Tabla 1). Algunos de estos géneros tienen la capacidad de degradarlo en altas concentraciones, tal es el caso de las cepas PC2 de *Bacillus cereus* y SP1 de *Streptomyces praecox* aisladas en aguas residuales del drenaje agrícola de El-Khairy, Egipto (Elzakey *et al.*, 2023).

Lourthuraj *et al.* (2022) determinaron las bacterias que degradan los OP, en particular CP al localizar la actividad de la hidrolasa organofosforada de las bacterias. *Enterobacter aerogenes* CP2 y *Streptococcus pyogenes* CP11 las cuales eliminaron $77 \pm 1.8 \%$, $74.2 \pm 3.1 \%$ del plaguicida. Estas cepas produjeron actividad de hidrolasa organofosforada y biosíntesis de enzimas localizadas, la cepa CP2 muestra la tasa de degradación de OP más rápida entre las especies de *Enterobacter*, sin embargo, en estudios similares, *Cupriavidus nantongensis* X1T, un tipo de cepa del género *Cupriavidus*, es capaz de degradar eficientemente 200 mg/L de CP en 48 h. Esto es aproximadamente 100 veces más rápido que las especies del género *Enterobacter*. La cepa X1T puede tolerar altas concentraciones de este compuesto (500 mg/L) en un amplio rango de temperaturas (30-42 °C) y valores de pH (5-9). El análisis RT-qPCR mostró que la organofosfato hidrolasa (OpdB) en la cepa X1T es una enzima inducible, y la enzima cruda aislada *in vitro* aún podría retener el 75 % de la actividad de degradación. (Fang *et al.*, 2021; Shi *et al.*, 2019).

En otros estudios la cepa C1 de *Achromobacter sp.* mostró una tasa de eliminación de CP de 0.72-0.147/día, una vida media de 4.7 a 9.7 días y una concentración máxima de metabolito de 2.10 mg/L a las 120 h., (Briceño *et al.*, 2020). Otros microorganismos aislados de aguas salobres mediante la técnica de cultivo enriquecido, como la bacteria psicrófila *Shewanella sp.* BT05 mostró una tolerancia y crecimiento significativa en diferentes concentraciones de CP (10-50 mg/L). Además, BT05 degradó 94.3 %, 91.8 %, 87.9 %, 82.6 % y 80.5 % del CP a 10, 20, 30, 40 y 50 mg/L, respectivamente, en 24 h (Govarthanan *et al.*, 2020).

Subsanguan *et al.* (2020) utilizando un consorcio de cinco bacterias pertenecientes a los géneros *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Stenotrophomonas*, *Ochrobactrum* y *Bacillus* en un sistema de cultivo mixto degradaron eficientemente CP en medio acuoso. La combinación de población bacteriana mixta con biosurfactante mejoró significativamente la tasa de degradación del CP en el suelo sin acumulación de intermediarios tóxicos. Este biosurfactante ambientalmente benigno puede producirse "*in situ*" y puede reemplazar a los surfactantes sintéticos tóxicos comúnmente utilizados con fines de biorremediación.

Lakshmipathy *et al.* (2018) aislaron en cultivo e identificaron mediante pruebas bioquímicas, bacterias degradantes de plaguicidas, como resultado se determinó que *Pseudomonas aeruginosa* fue la cepa predominante pudiendo degradar una concentración máxima de 200 ppm de CP en 240 h de incubación equivalente al 80 %, estos resultados indicaron que se pueden utilizar eficazmente en la biorremediación de suelos y agua contaminados. La degradación de CP utilizando una cepa de *Pseudomonas putida* diseñada, que muestra lacasas bacterianas en su superficie, demostró que la implementación de este sistema degrada completamente este plaguicida sin retener ningún metabolito tóxico, mediante la implementación de bioensayos con el organismo modelo *Caenorhabditis elegans* como indicador, se demostró la desintoxicación completa de los productos de degradación del CP (Liu *et al.*, 2016).

Tabla 1. Degradación de plaguicidas por diferentes bacterias. Fuente: Elaboración propia

Pesticida	Especies de Bacterias	Referencias
Clorpirifos	<i>Bacillus cereus</i> y SP1 de <i>Streptomyces praecox</i> , <i>Enterobacter aerogenes</i> CP2 y <i>Streptococcus pyogenes</i> CP11, <i>Cupriavidus nantongensis</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Achromobacter</i> , <i>Shewanella</i> sp., <i>Cupriavidus nantongensis</i> CX1, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> pF1, 4R3-M1, <i>Pseudomonas</i> sp. 4H1-M3 y <i>Rhizobium</i> sp., <i>Pseudomonas</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Stenotrophomonas</i> , <i>Ochrobactrum</i> y <i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas putida</i> .	(Elzakey <i>et al.</i> , 2023), (Lourthuraj <i>et al.</i> , 2022), (Fang <i>et al.</i> , 2021), (Briceño <i>et al.</i> , 2020), (Govarthanan <i>et al.</i> , 2020), (Shi <i>et al.</i> , 2019), (Lakshmiathy <i>et al.</i> , 2018), (Liu <i>et al.</i> , 2016), (Singh <i>et al.</i> , 2016).
2,6-diclorobenzamida	<i>Aminobacter niigataensis</i> MSH1, <i>Aminobacter</i> sp.	(Schostag <i>et al.</i> , 2022), (Hylling <i>et al.</i> , 2019)
Piridina	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> PAO1, <i>Enterobacter cloacae</i> complex sp. BD17 y <i>Enterobacter</i> sp. BD19	(Niu <i>et al.</i> , 2023), (Nie <i>et al.</i> , 2021)
Sulfoxaflor (SFX)	<i>Synechocystis salina</i> y <i>Microcystis aeruginosa</i>	(Łukaszewicz <i>et al.</i> , 2023)
Triazofos (TAP), metamidofos (MAP) y carbofurano (CF)	<i>Enterobacter</i> sp. Z1	(Zhang, B. <i>et al.</i> , 2020)
Organofosforados	<i>Sphingomonas</i> sp. y <i>Brevundimonas</i> sp., <i>Spirulina platensis</i> , <i>Ochrobactrum</i> sp	(Santillán <i>et al.</i> , 2020), (Abdel-Razek <i>et al.</i> , 2019) (Talwar <i>et al.</i> , 2014)
Simazine	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	(Zhang, B. <i>et al.</i> , 2020)
Atrazina	<i>Pseudomonas</i> y <i>Arthrobacter</i>	(Zhao <i>et al.</i> , 2019)
Profenofos	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i>	(Subsanguan <i>et al.</i> , 2020)
Organoclorados	<i>Paenibacillus</i> sp.	(Belal <i>et al.</i> , 2018)
Triazina	<i>Leucobacter</i> sp.	(Liu <i>et al.</i> , 2018)
Piretroides	<i>Kocuria</i> sp. CBMAI 135, <i>Kocuria</i> sp. CBMAI 136, <i>Kocuria marina</i> CBMAI 141, y <i>Kocuria</i> sp. CBMAI 145	(Birolli <i>et al.</i> , 2016)

Organoclorados

Los plaguicidas organoclorados (OCP) al ser altamente recalcitrantes permanecen en el ambiente durante mucho tiempo. Belal *et al.* (2018) realizaron un estudio donde monitorearon las concentraciones de OCP en tres fuentes de agua de drenaje agrícola en la gobernación de Kafr El-Sheikh, Egipto, descubriendo numerosas bacterias que degradan significativamente diferentes plaguicidas. Aislaron e identificaron a *Paenibacillus* sp. cepa 10 que muestra una gran eficiencia en la biodegradación de este tipo de plaguicidas, oscilando entre el 24.4 % y el 98 % de estos compuestos. Otros experimentos en la biodegradación de plaguicidas piretroides como el esfvalerato utilizaron un consorcio de microorganismos aislados del mar (*Kocuria* sp. CBMAI 135, *Kocuria* sp. CBMAI 136, *Kocuria marina* CBMAI 141, y *Kocuria* sp. CBMAI 145), evidenciando que estas cepas bacterianas aceleraron la degradación del contaminante y aumentaron las concentraciones de sus metabolitos (Birolli *et al.*, 2016).

Otros plaguicidas

La contaminación de las aguas subterráneas por residuos de plaguicidas supone una amenaza para la calidad del agua potable. Una forma de remediar el agua potable que contiene microcontaminantes es la utilización de filtros de arena y bioaumentarla con bacterias degradantes

de contaminantes específicas *Aminobacter niigataensis* MSH1 (Schostag *et al.*, 2022) y *Aminobacter* sp. que degrada 2,6-diclorobenzamida (Hylling *et al.*, 2019).

Stenotrophomonas maltophilia J2, es una bacteria altamente eficiente en la degradación de piridina, Niu *et al.* (2023) la aislaron de un tanque aeróbico en una planta de tratamiento de aguas residuales contaminada con plaguicidas. La cepa J2 mostró una tasa de degradación de piridina de 98.34 % \pm 0.49 % en 72 h, a una concentración de piridina de 1100 mg/L, a de 30 °C, con un pH de 8,0 y una concentración de NaCl de 0.5 %. Los resultados ofrecen una base para el uso eficaz de la cepa inmovilizada en el tratamiento de aguas residuales recalcitrantes contaminadas. *Enterobacter cloacae* complex sp. BD17 y *Enterobacter* sp. BD19 de igual manera demostraron ser eficientes en la degradación de piridina, estas aisladas también de un tanque aeróbico de una planta de tratamiento de aguas residuales (Nie *et al.*, 2021).

La utilización de plaguicidas neonicotinoides como el Sulfoxaflor (SFX) el cual se utiliza ampliamente en la agricultura moderna y debido a su alta solubilidad en agua y movilidad en el medio ambiente tiene un alto impacto en los ecosistemas acuáticos. La degradación del SFX en el medio conduce a la formación de la amida (M474), que, de acuerdo con recientes investigaciones, puede ser más tóxica para los organismos acuáticos que la molécula original. Łukaszewicz *et al.* (2023) evaluaron el potencial de dos especies comunes de cianobacterias unicelulares formadoras de floraciones (*Synechocystis salina* y *Microcystis aeruginosa*) para metabolizar este plaguicida.

Zhang, Y. *et al.* (2020) diseñaron y compararon varios materiales de inmovilización y combinaciones de composición para mejorar la durabilidad funcional de *Pseudomonas stutzeri* sp. Y2 para la degradación de simazina, uno de los herbicidas más utilizados y presentes en aguas residuales industriales y campos de maíz ubicados en Hefei, China, proporcionando una estrategia de inmovilización y así lograr estabilizar las bacterias para prolongar las funciones bacterianas en el tratamiento de agua y suelo contaminados con plaguicidas.

Pseudomonas y *Arthrobacter* se encuentran entre los géneros bacterianos que degradan la atrazina, lo que indica una alta adaptabilidad, por lo que se utilizan en la bioaumentación bacteriana en humedales artificiales, los resultados mostraron que con esta práctica la degradación del plaguicida mejoró notablemente desde 5 mg/L hasta debajo del valor umbral en 43 días mediante el aumento de bacterias funcionales (Zhao *et al.*, 2019).

La visualización de red de los términos más co-concurrentes generados a partir de VOSviewer, Figura 3, se observó que biodegradación se posicionó como una palabra clave importante en el gráfico, y al momento de pasar el cursor sobre los términos se resalta su relación con los demás, sobresalen las palabras, article, no human, pesticide, bacterium, chlorpyrifos (artículo, no humano, bacteria, clorpirifos) lo que nos indica que las investigaciones están relacionadas principalmente con estos términos.

En la Figura 4, se muestra la co-concurrencia de los términos utilizados más frecuentes a través de los últimos 10 años, analizando las publicaciones más citadas en cada año para determinar las tendencias de las investigaciones, resaltando la palabra microorganismos a partir del año 2018 como motor de búsqueda, hasta la utilización de la palabra clave wastewater treatment (tratamiento de aguas residuales) al 2021, lo que refleja el cambio de las tendencias en el tema de investigación.

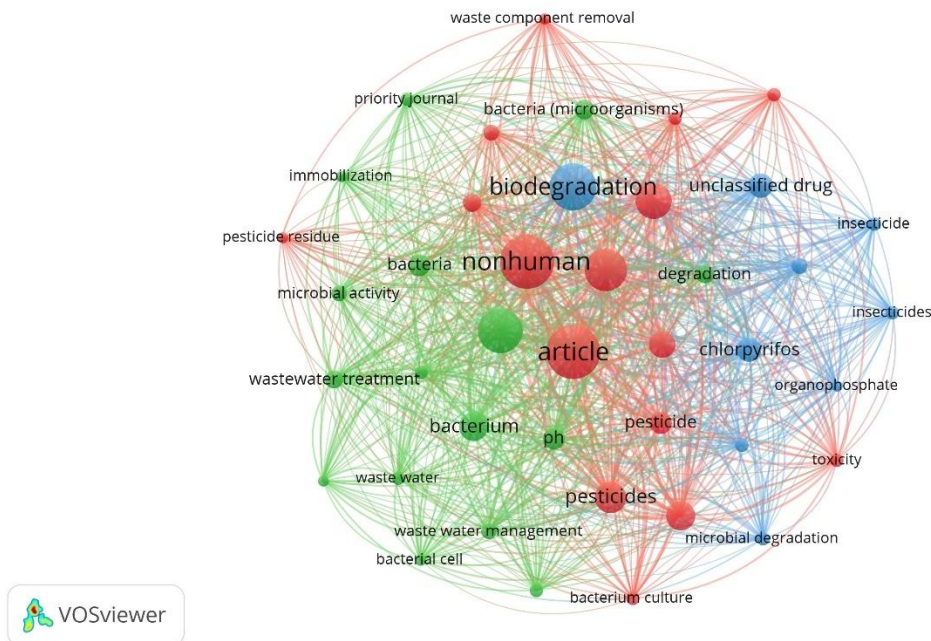


Figura 3. Visualización de redes resultado de la co-concurrencia de palabras clave entre las publicaciones. Elaboración propia a partir de datos generados por SCOPUS después de ser procesados por VOSviewer.

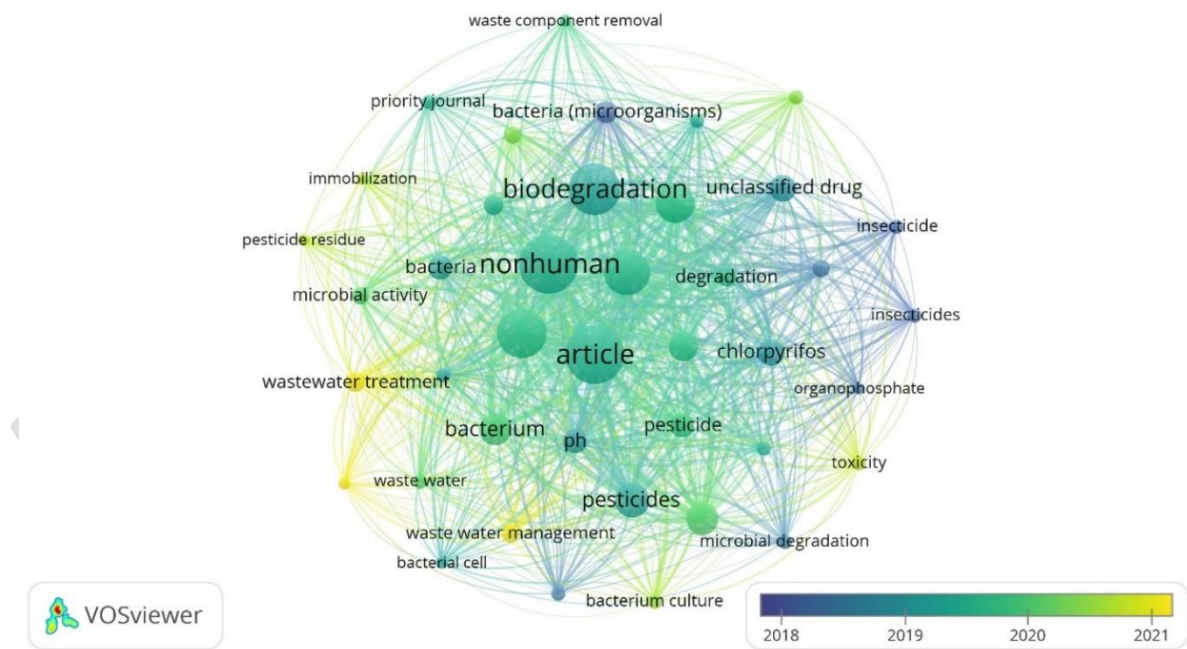


Figure 4. Network visualization resulting from the co-concurrence of the most used keywords in each year from 2014 onwards. Source: Authors' elaboration based on data generated by SCOPUS after being processed by VOSviewer.

Los resultados de la co-citación de autores, tomando como criterio de selección que por lo menos tuvieran 13 citaciones, en la Figura 5, se generó una visualización de redes de tres clústeres en la que los autores Aamand J, Zhang Y, se muestran como los más citados.

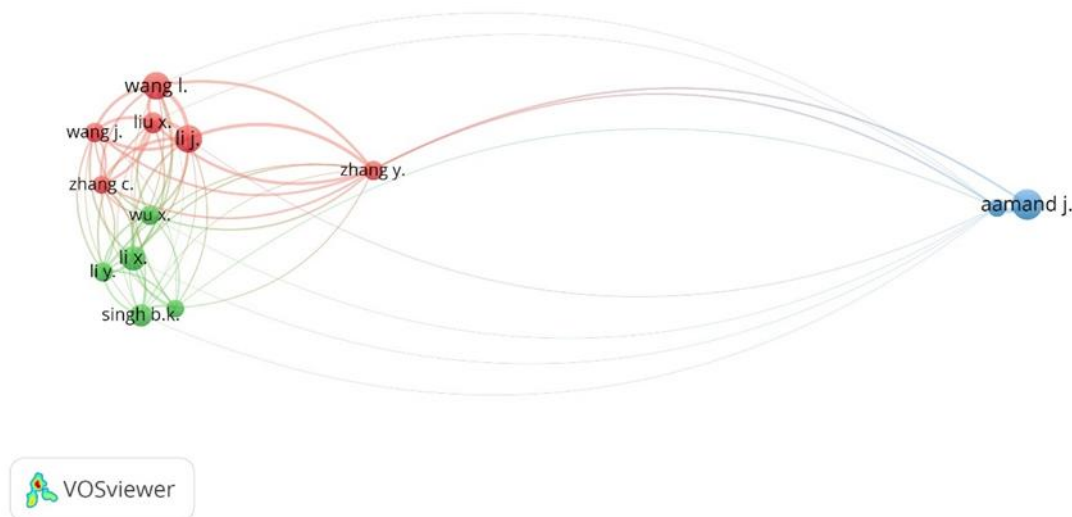


Figura 5. Visualización de redes de co-citación en publicaciones científicas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos generados por SCOPUS después de ser procesados por VOSviewer.

La literatura reporta a los OP como los plaguicidas más utilizados en la agricultura, entre ellos destacan diclorvos, fenitrotión, dimetoato, paratión, clorpirifos, diazinón y malatión (Silveira *et al.*, 2018). Los resultados demuestran que los OP más estudiados en su degradación por microorganismos son clorpirifos, fenamifos, tributilfosfato, malatión, paratión metílico y fenitrotión lo que concuerda con (Cycoñ *et al.*, 2013). En nuestra revisión sistemática podemos observar que las tendencias en las investigaciones con plaguicidas específicamente en cuerpos de agua, destacan los estudios relacionados con el clorpirifos (Liu *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2016; Lakshmipathy *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2019; Briceño *et al.*, 2020; Govarathanan *et al.*, 2020; Fang *et al.*, 2021; Lourthuraj *et al.*, 2022; Elzakey *et al.*, 2023).

Se han reportado diferentes microorganismos degradadores de OP, algunas especies del género *Lactobacillus* y bacterias, como *Serratia liquefaciens*, *Serratia plymuthica*, *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas radiora* (Zhao & Wang, 2012). No obstante, los microorganismos encontrados en este estudio son principalmente de los géneros de *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Bacillus* (Liu *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2016; Lakshmipathy *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019; Subsanguan *et al.*, 2020; Zhang, Y. *et al.*, 2020; Lourthuraj *et al.*, 2022; Elzakey *et al.*, 2023).

Conclusiones

El éxito del empleo de diferentes bacterias en la degradación de plaguicidas en cuerpos de agua está condicionado por múltiples factores, entre los que destacan la resistencia de los microorganismos, la concentración y tipo de contaminante, la humedad, el pH y la temperatura. Las investigaciones analizadas revelan que los consorcios microbianos ofrecen un potencial de degradación superior, destacando especialmente tres géneros bacterianos: *Pseudomonas*, *Enterobacter* y *Bacillus*.

Los resultados del análisis bibliométrico ofrecen una perspectiva valiosa sobre las tendencias actuales de investigación en este ámbito. Nuestro estudio subraya la prominencia de países como China, Dinamarca y Egipto en la producción científica relacionada con esta temática. Además, el análisis identificó a los principales investigadores, así como a las comunidades científicas con mayor producción científica, de la misma forma los centros de investigación que lideran proporcionando un mapa detallado de las contribuciones y colaboraciones internacionales en este campo crítico.

Contribución de los autores

“Conceptualización del trabajo, I.M.F., L.D.O.M.; Desarrollo de la metodología, I.M.F., L.D.O.M. V.R.S.; manejo de software., I.M.F., L.D.O.M., J.J.C.A.; Análisis de resultados y Manejo de datos L.C.M.; J. B. L. M.; Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.”

Financiamiento

Esta investigación fue financiada con fondos propios.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés”.

Referencias

- Abdel-Razek, M., Abozeid, A. M., Eltholth, M., Abouelenien, F., El-Midany, S., Moustafa, N. Y., & Mohamed, R. (2019). Bioremediation of a pesticide and selected heavy metals in wastewater from various sources using a consortium of microalgae and cyanobacteria. *Slovenian Veterinary Research*, 56 (22-Suppl), 61–73. <https://doi.org/10.26873/SVR-744-2019>
- Badii, M. H., & Varela, S. (2015). Insecticidas organofosforados: efectos sobre la salud y el ambiente, 5(28). CULCyT. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2881125.pdf>
- Belal, E.-S. B., Shalaby, M. E., El-Gremi, S. M., & Gad, W. A. (2018). Biodegradation of Organochlorine Pesticides by *Paenibacillus* Strain. *Environmental Engineering Science*, 35(11), 1194–1205. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0111>
- Bertero, A., Chiari, M., Vitale, N., Zanoni, M., Faggionato, E., Biancardi, A., & Caloni, F. (2020). Types of pesticides involved in domestic and wild animal poisoning in Italy. *Science of the Total Environment*, 707, 136129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136129>
- Bhalla, G., Bhalla, B., Kumar, V., & Sharma, A. (2022). Bioremediation and phytoremediation of pesticides residues from contaminated water: a novel approach. In *Pesticides remediation technologies from water and wastewater* (pp. 339-363). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90893-1.00016-7>
- Bin, T., Mahmood, A., Asghar, W., Ito, K., & Kataoka, R. (2024). Phytomicrobiomes: A Potential Approach for Sustainable Pesticide Biodegradation. *Applied Sciences*, 14(7), 2740–2740. <https://doi.org/10.3390/app14072740>
- Birrolli, W. G., Borges, E. M., Nitschke, M., Luciane P. C. Romão, & Porto, M. (2016). Biodegradation Pathway of the Pyrethroid Pesticide Esfenvalerate by Bacteria from Different Biomes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(8). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2968-y>
- Briceño, G., Lamilla, C., Leiva, B., Levio, M., Donoso-Piñol, P., Schalchli, H., Gallardo, F., & Diez, M. C. (2020). Pesticide-tolerant bacteria isolated from a biopurification system to remove commonly used pesticides to protect water resources. *PLOS ONE*, 15(6), e0234865. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234865>
- Costa, A. J., Soares da Poça, K., Baptista, da S. P., Correa, S. A., dos Santos, B. S., Santos, A. G., Rabello, A. S., Barros, O. U., & Sarpa, M. (2024). Evaluation of genotoxic effects in workers and residents of rural areas exposed to pesticides in Brazil. *Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 898, 503795. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503795>
- Cycoń, M., Żmijowska, A., Wójcik, M., & Piotrowska-Seget, Z. (2013). Biodegradation and bioremediation potential of diazinon-degrading *Serratia marcescens* to remove other organophosphorus pesticides from soils. *Journal of Environmental Management*, 117, 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.031>
- Dash, D. M., & Osborne, W. J. (2023). A systematic review on the implementation of advanced and evolutionary biotechnological tools for efficient bioremediation of organophosphorus pesticides. *Chemosphere*, 313, 137506. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137506>
- Dervis H (2019) Bibliometric analysis using bibliometrix an R package. *Journal of scientometric research*, 8(3), 156-160. <http://doi.org/10.5530/jscires.8.3.32>
- Elzakey, El-Sabbagh, S. M., Eman, Adss, I. A., & Nassar, A. (2023). Bioremediation of chlorpyrifos residues using some indigenous species of bacteria and fungi in wastewater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11341-3>
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2021). Environmental Protection Agency 2021 in Reviw. https://www.epa.ie/publications/corporate/governance/EPA_YearInReview2021_Eng.pdf

- Fang, L., Xu, Y., Xu, L., Shi, T., Ma, X., Wu, X., Li, Q. X., & Hua, R. (2021). Enhanced biodegradation of organophosphorus insecticides in industrial wastewater via immobilized *Cupriavidus nantongensis* X1T. *Science of the Total Environment*, 755, 142505–142505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142505>
- García, M.D. M. (2022). Remediación sostenible de sitios contaminados con pesticidas mediante el uso de la biodegradación: Revisión sistemática. [tesis de grado]. Universidad Cesar Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/91972>
- Gauicha, J., & Bolívar, E. (2015). Contaminación ambiental por agroquímicos, formas de exposición e impactos en la salud de la población de la parroquia Sabanilla del cantón Celica. [Tesis de Maestría]. Loja: Universidad Técnica de Loja.
- Giri, B. S., Geed, S., Vikrant, K., Lee, S. S., Kim, K. H., Kailasa, S. K., Vithanage, M., Chaturvedi, P., Rai, B.N., Singh, R. S. (2021). Progress in bioremediation of pesticide residues in the environment. *Environmental Engineering Research*, 26(6). <https://doi.org/10.4491/eer.2020.446>
- Girón-Pérez, M. I., Mary, V. S., Rubinstein, H. R., Toledo-Ibarra, G. A., & Theumer, M. G. (2022). Diazinon toxicity in hepatic and spleen mononuclear cells is associated to early induction of oxidative stress. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(10), 2309-2323. <https://doi.org/10.1080/09603123.2021.1962814>
- Govarthanan, M., Ameen, F., Kamala-Kannan, S., Selvankumar, T., Almansob, A., Alwakeel, S. S., & Kim, W. (2020). Rapid biodegradation of chlorpyrifos by plant growth-promoting psychrophilic *Shewanella* sp. BT05: An eco-friendly approach to clean up pesticide-contaminated environment. *Chemosphere*, 247, 125948. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125948>
- Hakeem, KR, Akhtar, MS y Abdullah, SNA (2016). Planta, suelo y microbios: Volumen 1: Implicaciones en la ciencia de los cultivos. Plantas, suelos y microbios: Volumen 1: Implicaciones en la ciencia de los cultivos, (abril), 1–366. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3>
- Hernández-Toledano, D. S., Estrada-Muñoz, E., & Vega, L. (2020). Genotoxicity of the organophosphate pesticide malathion and its metabolite dimethylthiophosphate in human cells in vitro. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 856, 503233. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2020.503233>
- Hossain, M. E., Shahrukh, S., & Hossain, S. A. (2022). Chemical Fertilizers and Pesticides: Impacts on Soil Degradation, Groundwater, and Human Health in Bangladesh. En *Water science and technology library* (pp. 63-92). https://doi.org/10.1007/978-3-030-95542-7_4
- Hylling, O., Nikbakht Fini, M., Ellegaard-Jensen, L., Muff, J., Madsen, H. T., Aamand, J., & Hansen, L. H. (2019). A novel hybrid concept for implementation in drinking water treatment targets micropollutant removal by combining membrane filtration with biodegradation. *Science of the Total Environment*, 694, 133710. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133710>
- Lara, M. A. (2021). Aplicación de técnicas microbiológicas y químicas para la recuperación de suelos contaminados por plaguicidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos. Evaluación de su viabilidad mediante estudios de biología molecular y ecotoxicidad. [Tesis de doctorado]. Universidad de Sevilla.
- Lakshmi pathy, M., Abirami, S. V., & Sudhakar, T. (2018). Biodegradation of organo phosphorous chlorpyrifos using *Pseudomonas aeruginosa* PF1 isolated from paddy field. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 11(5), 1725. <https://doi.org/10.5958/0974-360x.2018.00320.7>
- Leyva Morales, J. B., Valdez Torres, J. B., Bastidas Bastidas, P. J., Angulo Escalante, M. A., Sarmiento Sánchez, J. I., Barraza Lobo, A. L., Olmeda-Rubio, C., Chaidez Quiroz, C. (2017). Monitoring of pesticides residues in northwestern Mexico rivers. *Acta universitaria*, 27(1), 45-54. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1203>
- Liu, J., Pan, D., Wu, X., Chen, H., Cao, H., Li, Q. X., & Hua, R. (2018). Enhanced degradation of prometryn and other s-triazine herbicides in pure cultures and wastewater by polyvinyl alcohol-sodium alginate immobilized *Leucobacter* sp. JW-1. *Science of the Total Environment*, 615, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.208>
- Liu, J., Tan, L., Wang, J., Wang, Z., Ni, H., & Li, L. (2016). Complete biodegradation of chlorpyrifos by engineered *Pseudomonas putida* cells expressing surface-immobilized laccases. *Chemosphere*, 157, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.031>
- Lourthuraj, A. A., Hatshan, M. R., & Hussein, D. S. (2022). Biocatalytic degradation of organophosphate pesticide from the wastewater and hydrolytic enzyme properties of consortium isolated from the pesticide contaminated water. *Environmental Research*, 205, 112553. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112553>
- Łukaszewicz, P., Przemysław Siudak, Klaudia Kropidłowska, Caban, M., & Haliński, Ł. P. (2023). Unicellular cyanobacteria degrade sulfoxaflor to its amide metabolite of potentially higher aquatic toxicity. *Chemosphere*, 337, 139440–139440. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139440>
- Mali, H., Shah, C., Raghunandan, B. H., Prajapati, A. S., Patel, D. H., Trivedi, U., & Subramanian, R. B. (2023). Organophosphate pesticides an emerging environmental contaminant: Pollution, toxicity, bioremediation progress, and remaining challenges. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 234-250. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.04.023>
- Niaoumakis, M. (2017) Environmental, Social, and Economic Impacts. Management of Marine Plastic Debris, p. 57-126. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-44354-8.00002-1>
- Nie, Z., Yan, B., Xu, Y., Awasthi, M. K., & Yang, H. (2021). Characterization of pyridine biodegradation by two *Enterobacter* sp. strains immobilized on *Solidago canadensis* L. stem derived biochar. *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125577. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125577>
- Niu, H., Nie, Z., Long, Y., Guo, J., Tan, J., Bi, J., & Yang, H. (2023). Efficient pyridine biodegradation by *Stenotrophomonas maltophilia* J2: Degradation performance, mechanism, and immobilized application for wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132220–132220. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132220>
- Organización de las Naciones [ONU]. (2015). *Gestión de aguas residuales: informe analítico de ONU-Agua 1–52* (Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 2015. www.unwater.org/publications/wastewater-management-un-water-analytical-brief/

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2022). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021: Systems at Breaking Point. Main Report. Roma, FAO. <https://www.fao.org/land-water/solaw2021/en/>
- Ouyang, W., Hao, X., Wang, L., Xu, Y., Tysklind, M., Gao, X., & Lin, C. (2019). Watershed diffuse pollution dynamics and response to land development assessment with riverine sediments. *Science of the Total Environment*, 659, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.367>
- Page M J, McKenzie J E, Bossuyt P M, Boutron I, Hoffmann T C, Mulrow C D et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews *BMJ* 2021; 372 :n71 <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Passatore, L., Simona, R., Juwarkar, A.A., & Massacci, A. (2014). Phytoremediation and Bioremediation of Polychlorinated Biphenyls (PCBs): State of Knowledge and Research Perspectives. *Journal of Hazardous Materials*. 278,189-202 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.051>
- Rad, S. M., Ray, A. K., & Barghi, S. (2022). Water Pollution and Agriculture Pesticide. *Clean Technologies*, 4(4), 1088–1102. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040066>
- Rincón-Rubio, A., Mérida-Ortega, Á., Ugalde-Resano, R., Gamboa-Loira, B., Rothenberg, S. J., González-Bejarano, F., Cebrián, M.E., & López-Carrillo, L. (2024). Carcinogenic, non-carcinogenic risk, and attributable cases to organochlorine pesticide exposure in women from Northern Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(5), 421. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12584-4>
- Robles, M. D. C., Iannacone, J., Romero-Echevarría, L. M., Romero, A. R., & Dueñas, R. V. (2022). Efecto de los plaguicidas en la salud de los agricultores: una revisión sistemática de la literatura. *Biotempo*, 19(2), 269-280. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v19i2.4909>
- Saeed, M. U., Hussain, N., Sumrin, A., Shahbaz, A., Noor, S., Bilal, M., Aleya, L., & Iqbal, H. M. (2021b). Microbial bioremediation strategies with wastewater treatment potentialities – A review. *The Science Of The Total Environment*, 818, 151754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151754>
- Sánchez-Alarcón, J., Milić, M., Kašuba, V., Tenorio-Arvide, M. G., Montiel-González, J. M. R., Bonassi, S., & Valencia-Quintana, R. (2021). A systematic review of studies on genotoxicity and related biomarkers in populations exposed to pesticides in Mexico. *Toxics*, 9(11), 272. <https://doi.org/10.3390/toxics9110272>
- Santillán, J.Y., Lorena Rojas, N., Ghiringhelli, P.D., Nobile, M.L., Lewkowicz, E.S. & Iribarren, A.M. (2020). Organophosphorus compounds biodegradation by novel bacterial isolates and their potential application in bioremediation of contaminated water. *Bioresource Technology*, 317, 124003–124003. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124003>
- Schostag, M. D., Gobbi, A., Fini, M. N., Ellegaard-Jensen, L., Aamand, J., Hansen, L. H., Muff, J., & Albers, C. N. (2022). Combining reverse osmosis and microbial degradation for remediation of drinking water contaminated with recalcitrant pesticide residue. *Water Research*, 216, 118352. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118352>
- Silveira-Gramont, María Isabel, Aldana-Madrid, María Lourdes, Piri-Santana, Julián, Valenzuela-Quintana, Ana Isabel, Jasa-Silveira, Graciela, & Rodríguez-Olibarria, Guillermo. (2018). plaguicidas agrícolas: un marco de referencia para evaluar riesgos a la salud en comunidades rurales en el estado de sonora, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(1), 7-21. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.01.01>
- Singh, P., Harvinder Singh Saini, & Raj, M. (2016). Rhamnolipid mediated enhanced degradation of chlorpyrifos by bacterial consortium in soil-water system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 134 (part1), 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.07.020>
- Singh, A., Mahajan, M., Kothari, R., Singh, N.K. & Singh, R.P. (2023). Mechanistic action of pesticides on pests and their consequent effect on fishes and human health with remediation strategies. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(3), 363-380. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.233>
- Sharma, A., Shukla, A., Attri, K., Kumar, M., Kumar, P., Sutte, A., Sing, G., Barnwald, R.P., & Singla, N. (2020). Global trends in pesticides: A looming threat and viable alternatives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 201, 110812. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110812>
- Shi, Fang, Qin, Chen, Wu, & Hua. (2019). Rapid Biodegradation of the Organophosphorus Insecticide Chlorpyrifos by *Cupriavidus nantongensis* X1T. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4593. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234593>
- Smith, L., Inman, A., Lai, X., Zhang, H., Fanqiao, M., Jianbin, Z., Burke, S., Rahn, C., Siciliano, G., Haygarth, P. M., Bellarby, J., & Surridge, B. (2017). Mitigation of diffuse water pollution from agriculture in England and China, and the scope for policy transfer. *Land Use Policy*, 61, 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.09.028>
- Subsanguan, T., Vangnai, A. S., & Siripattanakul-Ratpukdi, S. (2020). Aerobic and anoxic degradation and detoxification of profenofos insecticide by *Pseudomonas plecoglossicida* strain PF1. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110129. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110129>
- Talwar, M. P., Mulla, S. I., & Ninnekar, H. Z. (2014). Biodegradation of organophosphate pesticide quinalphos by *Ochrobactrum* sp. strain HZM. *Journal of Applied Microbiology*, 117(5), 1283–1292. <https://doi.org/10.1111/jam.12627>
- Zhao, X., Bai, S., Li, C., Yang, J., & Ma, F. (2019). Bioaugmentation of atrazine removal in constructed wetland: Performance, microbial dynamics, and environmental impacts. *Bioresource Technology*, 289, 121618–121618. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121618>
- Zhao, X.H., & Wang, J. (2012). A brief study on the degradation kinetics of seven organophosphorus pesticides in skimmed milk cultured with *Lactobacillus* spp. at 42 °C. *Food Chemistry*, 131(1):300-304. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.046>
- Zhang, B., Ni, Y., Liu, J., Yan, T., Zhu, X., Li, Q. X., Hua, R., Pan, D., & Wu, X. (2020). Bead-immobilized *Pseudomonas stutzeri* Y2 prolongs functions to degrade s-triazine herbicides in industrial wastewater and maize fields. *The Science Of The Total Environment*, 731, 139183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139183>

Zhang, Y., Xu, Z., Chen, Z., & Wang, G. (2020). Simultaneous degradation of triazophos, methamidophos and carbofuran pesticides in wastewater using an *Enterobacter* bacterial bioreactor and analysis of toxicity and biosafety. *Chemosphere*, 261, 128054–128054. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128054>

ARTÍCULO EN PRENSA