

Potential of *Pseudomonas aeruginosa* in the biodegradation of organophosphate pesticides in agricultural soils of Peru: Mechanisms and applications in bioremediation

Nicholas Gabriel Barboza Isla¹, Sara Rita Naupari Montenegro², Marco Antonio Díaz Díaz³
^{1,2,3} Universidad Privada del Norte, Perú, n00307107@upn.pe, sara.naupari@upn.edu.pe, marco.diaz@upn.edu.pe

Abstract– Soil contamination by organophosphate pesticides deteriorates soil fertility and biodiversity, posing environmental and health risks. This study evaluates the potential of *Pseudomonas aeruginosa* in the bioremediation of contaminated soils, determining its degradation efficiency and optimization strategies. A systematic review was conducted using scientific databases such as Scopus, Web of Science, and SciELO, applying inclusion criteria that considered recent studies (2014-2024) on the biodegradation of organophosphate pesticides by *P. aeruginosa*. Thirty-four relevant articles were selected, revealing that *P. aeruginosa* can degrade up to 90% of compounds such as chlorpyrifos and monocrotophos through hydrolytic enzymes and rhamnolipids, which increase the bioavailability of contaminants. Key strategies proposed include genetic engineering to enhance rhamnolipid production and microbial consortia with bacteria like *Bacillus* and fungi like *Trichoderma*, which optimize degradation and soil restoration. The application of these strategies is recommended in highly contaminated Peruvian regions, such as Chancay-Lima and San Martín. The integration of stricter environmental regulations and the development of microorganism-based technologies can strengthen agricultural sustainability and mitigate the impacts of pesticides.

Keywords-- Bioremediation, *Pseudomonas aeruginosa*, organophosphorus pesticides, contaminated soils, microbial degradation.

Potencial de *Pseudomonas aeruginosa* en la biodegradación de pesticidas organofosforados en suelos agrícolas del Perú: Mecanismos y aplicaciones en biorremediación

Nicholas Gabriel Barboza Isla¹, Sara Rita Naupari Montenegro², Marco Antonio Díaz Díaz³
^{1,2,3} Universidad Privada del Norte, Perú, n00307107@upn.pe, sara.naupari@upn.edu.pe, marco.diaz@upn.edu.pe

Resumen – La contaminación de suelos agrícolas por pesticidas organofosforados deteriora su fertilidad y biodiversidad, generando riesgos ambientales y sanitarios. Este estudio evalúa el potencial de las *Pseudomonas aeruginosa* en la biorremediación de suelos contaminados, determinando su eficiencia degradadora y estrategias de optimización. Se realizó una revisión sistemática en bases de datos científicos como Scopus, Web of Science y SciELO, aplicando criterios de inclusión que consideran estudios recientes (2014-2024) sobre biodegradación de pesticidas organofosforados por *P. aeruginosa*. Se seleccionaron 34 artículos relevantes donde se obtuvieron resultados que indican que *P. aeruginosa* degrada hasta el 90% de compuestos como clorpirifos y monocrotofós mediante enzimas hidrolíticas y ramnolípidos, que aumentan la biodisponibilidad de los contaminantes. Se propuso estrategias claves que incluyen ingeniería genética para potenciar la producción de ramnolípidos y consorcios microbianos con bacterias como *Bacillus* y hongos como *Trichoderma*, que optimizan la degradación y restauración del suelo. Se recomienda evaluar su aplicación en regiones peruanas con alta contaminación, como Chancay-Lima y San Martín. La integración de normativas ambientales más estrictas y el desarrollo de tecnologías basadas en microorganismos pueden fortalecer la sostenibilidad agrícola y mitigar los impactos de los pesticidas.

Palabras claves: Biorremediación, *Pseudomonas aeruginosa*, pesticidas organofosforados, suelos contaminados, degradación microbiana.

I. INTRODUCCIÓN

Los pesticidas organofosforados son compuestos químicos ampliamente utilizados para inhibir el desarrollo de organismos que se consideran plagas. Son empleados masivamente en el sector agrícola para impedir el desarrollo de organismos oportunistas como hongos fitopatógenos, malezas, insectos, roedores, entre otros, y así aumentar la eficiencia en la producción de los cultivos [1]. En la actualidad, los pesticidas organofosforados (POF) son los más utilizados y comercialmente aceptados a nivel global. Entre los de mayor demanda y toxicidad se encuentran el paratión metílico, clorpirifos, malatión, diazinón, diclorvos, fenitrotión y fosmet [2].

Su uso excesivo y descontrolado ha generado impactos negativos en la calidad del suelo, biodiversidad y la salud

humana, lo que ha despertado preocupación en la comunidad agrícola y científica [3]. Uno de los principales causantes de la contaminación de los suelos es el uso indiscriminado de pesticidas organofosforados en la actividad agrícola, especialmente cuando se aplican sin el debido asesoramiento profesional, lo que ha generado graves alteraciones ambientales en los ecosistemas [4]. El impacto no solo afecta a la biodiversidad, sino también a la salud humana debido a la posible acumulación de residuos tóxicos en los alimentos y fuentes de agua. La calidad del suelo está siendo afectada debido al incremento de los agroquímicos, los mismo que se aplican sin ningún control por parte de los agricultores. Este uso indiscriminado ha llevado a la degradación de la fertilidad del suelo y a las alteraciones de sus propiedades físicas y químicas, reduciendo su capacidad productiva [3].

El uso desmedido de compuestos organofosforados ha provocado un deterioro significativo en los suelos agrícolas. Aunque estos productos han brindado ciertos beneficios, su impacto negativo ha sido considerable, generando daños severos que ponen en riesgo la supervivencia de los ecosistemas claves a largo plazo [5].

En el Perú, el uso intensivo de pesticidas organofosforados ha provocado altos niveles de contaminación en suelos agrícolas, especialmente en regiones de alta producción como la costa, sierra y selva [6]. A nivel nacional, se estima que en los últimos cinco años su uso ha crecido en un 30%, lo que ha provocado una mayor contaminación de los suelos y cuerpos de agua [7]. Entre 2014 y 2017, el uso de herbicidas en el Perú aumentó del 61,7% al 66,9%, mientras que el uso de insecticidas pasó del 45,3% al 54,8% en el mismo período [8]. Este incremento es alarmante, ya que se asocia con la pérdida de fertilidad del suelo y la contaminación de los ecosistemas agrícolas. Además, los residuos de pesticidas pueden ingresar a la cadena alimentaria a través de la absorción por cultivos agrícolas, la contaminación del agua utilizada para riego y el depósito en suelos donde se cultivan alimentos. La presencia de estos compuestos en granos cosechados representa un riesgo para la salud de los consumidores debido a su posible bioacumulación y efectos tóxicos a largo plazo afectando tanto la biodiversidad local [8]. El impacto ambiental y sanitario del

uso de pesticidas en Perú es un problema que requiere atención urgente, pues su uso descontrolado está deteriorando los ecosistemas agrícolas y afectando la salud de la población causando efectos de deterioro de tipo funcional, lesiones patológicas que afectan el funcionamiento del organismo y reducen su capacidad de respuesta a factores de riesgos y estrés [9].

En Chancay-Huaral, Perú, el uso excesivo de plaguicidas organofosforados en cultivos hortícolas ha superado los límites permitidos, afectando la producción y la salud humana [10].

En tomate y pimiento, se han registrado hasta 45 aplicaciones por campaña con más de 25 ingredientes activos. Se evidencia que el 60% de los plaguicidas usados pertenecen a los organofosforados, caracterizados por su alta toxicidad y persistencia ambiental. Entre los ingredientes activos más empleados se encuentran el clorpirifos y metomilo, cuyo uso frecuente plantea riesgos para la salud y el medio ambiente [10]. Otro caso es en Tingo de Ponasa, Picota, donde hubo uso de agroquímicos en el cultivo de papaya (*Carica papaya*) lo que ha generado preocupación, destacándose el empleo de dimetoato, un insecticida y acaricida organofosforado. Este compuesto contiene 5% de sulfato de atropina y 3% de toxogonina, sustancias altamente tóxicas cuya acumulación en el suelo puede afectar la biodiversidad y representar riesgos para la salud humana. Además, junto con otros plaguicidas, contribuye a la contaminación ambiental y la persistencia de residuos tóxicos en el ecosistema [11].

El manejo de los suelos contaminados por pesticidas es un desafío ambiental y agrícola. Las malas prácticas de agricultura provocan contaminación de los alimentos de origen vegetal, ya que dichos contaminantes son acumulados en los tejidos de los vegetales, éstos van escalando hasta llegar al ser humano [12]. La biorremediación es una alternativa prometedora, económica y ecológicamente factible para la descontaminación de los suelos, ya que emplea microorganismos (bacterias, hongos, algas) o enzimas con el fin de biodegradar contaminantes presentes en la tierra, aire o agua. Por lo que, esta tecnología es viable para la degradación de contaminantes [13].

La reducción de contaminantes por pesticidas en los suelos fértiles depende principalmente de la biorremediación, un proceso que utiliza microorganismos, asociaciones o consorcios de estos para restaurar la salud de un nicho ambiental. Esto se logra mediante sus mecanismos fisiomorfológicos naturales y el apoyo de tecnologías específicas para su implementación, mantenimiento y monitoreo [14]. También se emplean otros métodos como la bioestimulación, la cual consiste en estimular el desarrollo óptimo de microorganismos nativos en un medio contaminado, mediante el suministro de oxígeno y nutrientes, principalmente. Con la intención de que estos microorganismos recurran también al contaminante como fuente de energía, y por lo tanto lo degraden a componentes más simples, estables, poco o nada peligrosos [15].

Las bacterias del género *Pseudomonas* destacan entre los microorganismos más eficientes en los procesos de

biorremediación debido a su comprobada capacidad de degradación de contaminantes orgánicos, como hidrocarburos y plaguicidas. A diferencia de otros microorganismos utilizados en la biorremediación, las *Pseudomonas* destacan por su versatilidad metabólica y su eficiencia en la degradación de una amplia gama de contaminantes. Las especies más estudiadas en este ámbito son *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas fluorescens* [16]. Se ha demostrado que todas estas bacterias mencionadas anteriormente tienen la capacidad de degradar una amplia variedad de pesticidas, incluyendo fungicidas, herbicidas, rodenticidas, molusquicidas, nematocidas y reguladores del crecimiento [17].

Estas bacterias son reconocidas por su gran versatilidad metabólica y plasticidad genética. Gracias a ello, pueden adaptarse a condiciones ambientales adversas y actuar en suelos con distintos niveles de contaminación. Por lo general crecen rápidamente con habilidad de degradar una serie de sustratos, como compuestos tóxicos, incluyendo hidrocarburos aromáticos y alifáticos. Presentan alta resistencia a antibióticos, desinfectantes, detergentes, metales pesados y algunos solventes orgánicos [18]. Para emplear estas bacterias es necesario que cumplan ciertos requisitos, como la existencia de nutrientes vitales, un rango de pH (6-7), una temperatura de 30 – 37 °C y la existencia de oxígeno en el entorno. La bacteria *Pseudomonas aeruginosa* destaca por su notable capacidad catabólica, sus requerimientos abióticos poco exigentes y su facilidad para adaptarse a condiciones extremas, lo que la convierte en una de las mejores opciones para la biorremediación en suelos contaminados por pesticidas [19].

El objetivo general de esta investigación es evaluar la aplicación de *Pseudomonas aeruginosa* en la biorremediación de suelos contaminados con pesticidas organofosforados en el Perú, analizando su eficiencia en la reducción de contaminantes y su impacto en la recuperación de la calidad del suelo. Se establecieron los siguientes objetivos específicos: Determinar la capacidad de *Pseudomonas aeruginosa* para degradar pesticidas organofosforados en suelos contaminados; Proponer estrategias de aplicación y escalabilidad del uso de *Pseudomonas aeruginosa* en la biorremediación de suelos afectados por pesticidas organofosforados. En este contexto, la pregunta de investigación es: ¿Cuál es la eficiencia de *Pseudomonas aeruginosa* en la biodegradación de suelos contaminados con pesticidas organofosforados y qué estrategias pueden mejorar su aplicación y escalabilidad en procesos de biorremediación?

II. METODOLOGÍA

Para determinar la eficiencia del género *Pseudomonas aeruginosa* en la biorremediación de suelos contaminados por pesticidas organofosforados, determinando su capacidad de biorremediación y proponiendo estrategias para su aplicación, se realizó una Revisión Sistemática tomando como referencia la adaptación del Protocolo Prisma [20]. Debido a las características del estudio, se ha seguido una metodología de

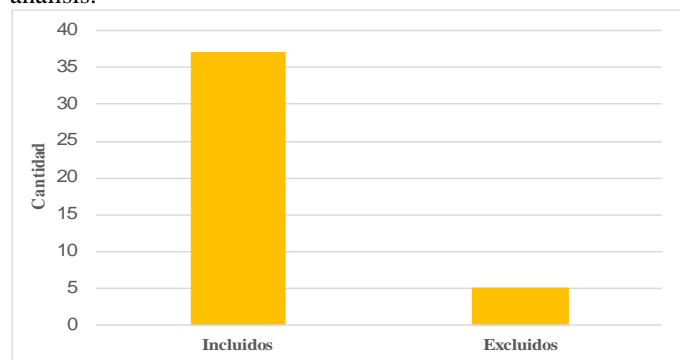
revisión sistemática, teniendo en cuenta las directrices y estándares establecidos en la Declaración PRISMA [21].

Para identificar los estudios primarios relacionados con el análisis de bacterias del género *Pseudomonas aeruginosa*, se realizó una búsqueda en bases de datos académicas que incluyeron artículos tanto en español como en inglés. Se desarrolló una estrategia de búsqueda basada en términos clave con el fin de seleccionar estudios relevantes alineados con el objetivo general y específicos de esta investigación.

Tras una búsqueda exhaustiva, se recopiló un conjunto de publicaciones científicas, las cuales fueron sometidas a un proceso de selección basado en criterios de inclusión y exclusión. Los criterios de inclusión con la pertinencia de los estudios en relación con el tema de investigación, la solidez de su fundamento teórico y metodológico, y la información proporcionada sobre los tipos de pesticidas organofosforados analizados, la especie de *Pseudomonas aeruginosa* involucrada y los mejores procesos de biorremediación.

En contraste, los criterios de exclusión incluyen estudios anteriores a 2014, para garantizar que la información sea actualizada, aquellos en idiomas de difícil acceso, publicaciones provenientes de fuentes poco confiables o de acceso restringido, así como investigaciones que no abordan específicamente la relación entre *Pseudomonas aeruginosa* y la biorremediación de suelos contaminados por pesticidas organofosforados. Para la recopilación de información, se consultarán bases de datos científicos como Redalyc, Dialnet y SciELO. La búsqueda se llevó a cabo mediante el uso de combinaciones de palabras claves en español e inglés, cuentos como: “bacterias OR *Pseudomonas aeruginosa* AND remediación”; “pesticidas AND suelos contaminados AND degradación”; “organofosforados AND biorremediación”.

La Fig. 1 ilustra el proceso de búsqueda y selección de estudios, desde la recopilación inicial hasta la inclusión final, resaltando los criterios de exclusión y las diferentes etapas del análisis.



Selección de artículos
Figura 1. Cantidad de artículos incluidos y excluidos

Como resultado, se identificaron 42 investigaciones, de las cuales, tras un análisis detallado, 37 artículos fueron seleccionados por su alineación con el objetivo del estudio, la Fig. 2 muestra la cantidad de artículos descartados y las razones para su exclusión, tales como indisponibilidad del texto

completo, falta de enfoque en la degradación de plaguicidas o ausencia de datos empíricos.

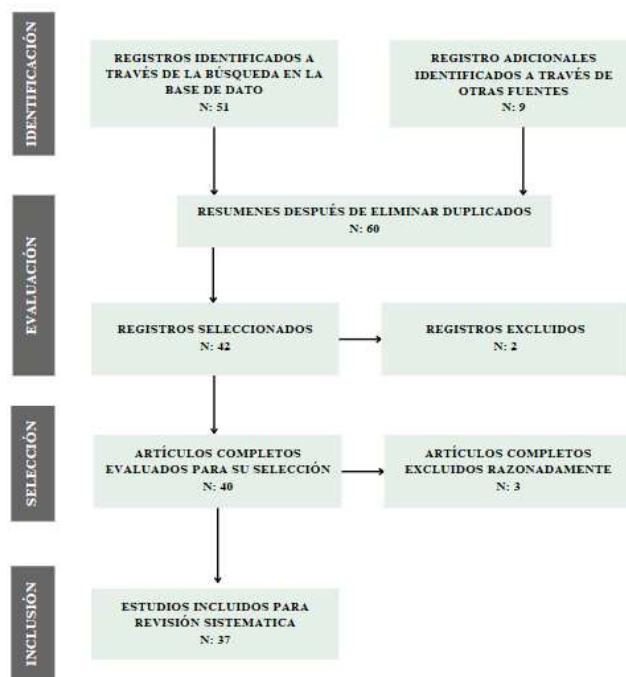


Figura 2. Flujoograma de búsqueda

La metodología aplicada en esta investigación ha permitido recopilar, analizar y sintetizar información relevante sobre la eficiencia de la biorremediación de pesticidas organofosforados mediante *pseudomonas aeruginosas*. A través de un enfoque sistemático y riguroso, se seleccionan estudios que ofrezcan evidencia científica actualizada, lo que garantiza la validez de los hallazgos. Los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de estrategias efectivas de remediación ambiental y promoverán la implementación de prácticas sostenibles para la recuperación de suelos afectados por pesticidas.

III. RESULTADOS

La contaminación de suelos por pesticidas organofosforados representa un desafío ambiental significativo, especialmente en áreas agrícolas donde su uso es intensivo. La acumulación de estos compuestos en el suelo no solo afecta la calidad del ecosistema edáfico, sino que también representa riesgos para la biodiversidad y la salud humana [3]. En este contexto, la biorremediación mediante el uso de bacterias de género *Pseudomonas aeruginosa* ha surgido como una alternativa efectiva y sostenible para la degradación de estos contaminantes. A continuación, se presentan los resultados organizados de acuerdo con los objetivos de estudio.

A. Análisis de la capacidad de *Pseudomonas aeruginosa* en la degradación de pesticidas organofosforados

Los estudios revisados en Irak, India y Colombia han demostrado que *Pseudomonas aeruginosa* es altamente eficiente en la biodegradación de pesticidas organofosforados. En particular, se ha reportado su capacidad para degradar compuestos como el clorpirifos y el monocrotofós, los cuales pueden persistir en el suelo y el agua, acumularse en los organismos vivos y alterar los ecosistemas, representando un peligro para la salud humana. Con el uso de la *Pseudomonas aeruginosa* se puede alcanzar tasas de eliminación superiores a 90% [19].

En Irak, específicamente en Al-Diwaniyah, los suelos contaminados con clorpirifos presentan una alta concentración de este pesticida, lo que afecta su actividad microbiana y sus propiedades fisicoquímicas. En este estudio de biorremediación, se aislaron tres cepas de *Pseudomonas putida* con capacidad degradadora. La cepa PB1 mostró la mayor eficiencia, logrando una degradación del 98% en 6 días y alcanzando una eliminación completa del 100% en 12 días. Además, se identifican otras bacterias con actividad degradadora, como *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus*, *Klebsiella sp.*, *Serratia marcescens* y *Flavobacterium sp.* El análisis de los productos de degradación, incluyendo 3,5,6-tricloro-2-piridinol y ácido dietiltiofosfórico, se llevó a cabo mediante cromatografía de líquidos de alto rendimiento (HPLC), confirmando la efectividad del proceso [22].

En Hamadan, India, específicamente en suelos de huertos de manzanas contaminados con clorpirifos en el distrito de Shimla, se llevó a cabo un estudio sobre la biodegradación de este pesticida. En dicha investigación, se evaluó el potencial de *Pseudomonas indoloxydans* (cepa ASK3.2). La contaminación inicial afectaba la calidad del suelo, dificultando la regeneración natural. La cepa ASK3.2 alcanzó una reducción del 82,72% del clorpirifos en 4 días. Para su identificación, se empleó la secuenciación del gen 16S rRNA, análisis filogenético y pruebas bioquímicas. La degradación del pesticida se evaluó mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID) y cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), lo que permitió cuantificar con precisión la disminución del contaminante. Además, el uso de un medio mineral salino (MSM) como sustrato para el crecimiento bacteriano permitió evaluar la actividad de la enzima organofosforada hidrolasa (OPH), la cual desempeña un papel clave en la biodegradación del clorpirifos [23].

Además, en Himachal Pradesh, India, se llevó a cabo un estudio sobre la biodegradación de clorpirifos y diazinón. En esta investigación, se emplearon *Pseudomonas aeruginosa* y *Acinetobacter olivarius* en un medio mineral salino (MSM) donde los pesticidas se utilizaron como única fuente de carbono. En este proceso, se observaron tasas de degradación del 88.27% y 82.45% para clorpirifos, y 81.07% y 88.35% para diazinón, lo que evidencia la alta eficiencia de estas bacterias en la biorremediación de suelos contaminados. La degradación fue cuantificada mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) y el crecimiento bacteriano fue monitoreado por espectrofotometría a 600 nm (OD 600 nm) [24].

En Cartagena de Indias, Colombia, específicamente en suelos contaminados con monocrotofós, se llevó a cabo un estudio sobre la biodegradación de este pesticida. En dicha investigación, se evaluó el potencial de *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella oxytoca* y *Enterobacter cloacae*. La contaminación inicial afectaba la calidad del suelo, dificultando la regeneración natural. Estas bacterias alcanzaron una degradación del 100% del monocrotofós. Para su identificación, se empleó el uso de un medio de cultivo M9 suplementado con monocrotofós como única fuente de carbono. El crecimiento bacteriano fue monitoreado por espectrofotometría UV-VIS, mientras que la degradación del pesticida se evaluó mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID), lo que permitió confirmar su completa eliminación del suelo tratado [25].

Otro caso en Colombia, específicamente en suelos agrícolas contaminados con organofosforados, se llevó a cabo un estudio sobre la biorremediación de estos compuestos. En dicha investigación, se evaluó el potencial de hongos y bacterias para degradar pesticidas como clorpirifós, paratión y fenitrotión. La contaminación inicial afectaba la calidad del suelo, dificultando la regeneración natural. Se identificaron microorganismos de los géneros *Serratia*, *Bacillus* y *Pseudomonas aeruginosa*, con alta capacidad degradadora de organofosforados, logrando una degradación del 85% del clorpirifós en 15 días. Para su identificación, se empleó la secuenciación del gen 16S rRNA y análisis bioquímicos. La degradación del pesticida se evaluó mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID) y espectrometría de masas (GC-MS), lo que permitió cuantificar con precisión la disminución del contaminante [5].

En la Tab. I se resumen los principales hallazgos en cuanto a la relación entre tipo de pesticidas organofosforados y porcentaje de degradación obtenido, según los artículos analizados.

Tabla I.
Porcentaje de degradación de plaguicidas según la especie de *Pseudomonas aeruginosa*

Tipo de pesticidas	Porcentaje de degradación
Clorpirifos	100%
Clorpirifos	82.72%
Clorpirifos y diazinón	82.45% - 88.35%
Monocrotofós	100%
Clorpirifós,	85%

B. Estrategias para la aplicación y escalabilidad de *Pseudomonas aeruginosa* en la biorremediación.

1) Uso de Biofertilizantes para potenciar la biorremediación

La *Pseudomonas aeruginosa* es reconocida por su capacidad para adaptarse a entornos complejos, lo que la convierte en una de las bacterias más prometedoras en aplicaciones biotecnológicas, particularmente en la biorremediación de suelos contaminados con compuestos peligrosos como los organofosforados. Esta bacteria puede descomponer una amplia gama de contaminantes, incluidos los

plaguicidas organofosforados, debido a su resistencia a factores ambientales adversos [16].

La *Pseudomonas aeruginosa* es un componente clave en la formulación de biofertilizantes debido a su capacidad para mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento vegetal. Su acción en los biofertilizantes radica en su habilidad para solubilizar nutrientes vitales, como el fósforo y el potasio, mediante la generación de ácidos orgánicos y sustancias que convierten estos componentes en formas más biodisponibles para las plantas. Adicionalmente, desempeña un rol fundamental en la biorremediación al disminuir la toxicidad de metales transformándolos en formas menos biodisponibles o depositándolos en el suelo, lo que, a su vez, disminuye su toxicidad y optimiza la disponibilidad de concentraciones beneficiosas. Además, la *Pseudomonas aeruginosa* fomenta la actividad de las enzimas en el suelo, potenciando enzimas como la ureasa y la β -D-glucosidasa, que resultan fundamentales para el reciclaje de nutrientes y la optimización de la estructura del terreno. Igualmente, su habilidad para generar compuestos bioactivos, tales como fitohormonas y sideróforos, no solo impulsa el desarrollo de las plantas, sino que también resguarda contra enfermedades y fomenta la estabilidad del ecosistema del terreno. Esto transforma a la *Pseudomonas aeruginosa* en un elemento esencial para la creación de biofertilizantes sostenibles y de gran eficacia [26].

2) Optimización de *Pseudomonas aeruginosa* mediante Ingeniería Genética

El uso de técnicas de ingeniería genética puede optimizar la capacidad degradadora de *Pseudomonas aeruginosa*, debido a que estas producen ramnolípidos, biosurfactantes con propiedades emulsificantes que facilitan la biodegradación de pesticidas, hidrocarburos y otros contaminantes. Esto ha demostrado que la modificación de enzimas clave en su biosíntesis, como RhIA, puede aumentar significativamente la producción de ramnolípidos, permitiendo mejorar su eficiencia en procesos de biorremediación [27].

Además, una estrategia para producir ramnolípidos diseñados, mediante la ingeniería genética permite controlar la diversidad de congéneres sintetizados, optimizando sus propiedades para aplicaciones específicas. Esto ha sido logrado mediante la modificación de *Pseudomonas aeruginosa* y *putida*, unas bacterias no patógenas, lo que facilita la producción segura y sostenible de estos biosurfactantes a partir de fuentes de carbono renovables como el glicerol y la xilosa [28].

3) Uso de consorcios microbianos para sinergia en la degradación

La aplicación de consorcios microbianos en la degradación de contaminantes ha resultado ser una estrategia eficiente para optimizar la eliminación de compuestos tóxicos, como pesticidas y plásticos [29]. En lugar de depender únicamente de *Pseudomonas aeruginosa*, la combinación de diferentes microorganismos, incluidas bacterias y hongos, puede potenciar el proceso de biodegradación.

Una de las combinaciones más prometedoras es la de *Pseudomonas aeruginosa* con bacterias como *Bacillus* y *Serratia*. Estas bacterias son capaces de metabolizar productos derivados de la degradación de pesticidas, lo que sugiere que su inclusión en un consorcio microbiano podría mejorar la eficiencia de la biodegradación [30]. Además, la formación de biopelículas en estos consorcios protege a las comunidades microbianas de cambios ambientales adversos, lo que permite una degradación más efectiva incluso en condiciones de alta concentración de contaminantes [30].

La inclusión de hongos degradadores, como *Trichoderma* y *Aspergillus*, también es crucial. Estos hongos no solo contribuyen a la degradación de compuestos recalcitrantes, sino que su actividad enzimática complementa la de las bacterias, facilitando el procesamiento de materiales complejos como la celulosa y la lignina [31]. Por ejemplo, se ha demostrado que *Aspergillus flavus* tiene una alta capacidad para degradar polietileno, lo que resalta la importancia de estos hongos en la biorremediación de residuos plásticos [32]. Estas bacterias no solo ayudan a restaurar la fertilidad del suelo al aumentar la disponibilidad de nitrógeno, sino que también pueden facilitar la recuperación de ecosistemas degradados [33].

Por ello, el uso de consorcios microbianos que combinan *Pseudomonas aeruginosa* con otras bacterias y hongos degradadores, así como la inclusión de bacterias fijadoras de nitrógeno, representa una estrategia prometedora para mejorar la biodegradación de contaminantes en suelos y aguas. Esta sinergia no solo aumenta la eficiencia de la degradación, sino que también contribuye a la restauración de la calidad del suelo y la salud del ecosistema [29].

IV. DISCUSIÓN

La presente revisión evidencia que *Pseudomonas aeruginosa* es altamente eficiente en la biodegradación de pesticidas organofosforados, con tasas de eliminación superiores al 90% en distintos entornos de estudio [19]. En investigaciones realizadas en Irak y la India, se reportaron tasas de degradación del 100% de monocrotofós en 12 días y del 93.2% de clorpirifos, lo que valida su capacidad degradadora mediante la acción de enzimas hidrolíticas como la fosfotiesterasa [22], [23]. Estos estudios demuestran que las *Pseudomonas aeruginosa* metaboliza pesticidas a través de biotransformación enzimática, bioacumulación intracelular y producción de biosurfactantes, facilitando la solubilización de compuestos hidrofóbicos [28]. La eficiencia del proceso puede variar según el contexto geográfico y las condiciones ambientales locales. Estas pueden ser diferencias significativas en la textura del suelo, la concentración de materia orgánica, la actividad microbiana endógena, así como parámetros abióticos como el valor pH debe estar entre 7 a 9, la temperatura debe oscilar entre los 30 a 35°C y la humedad debe variar entre el 18% al 30% para maximizar la actividad microbiana, influyen directamente en la tasa de degradación de los compuestos organofosforados [19], [34].

A pesar de la evidencia científica que respalda la capacidad degradadora de *Pseudomonas aeruginosa*, en el Perú no se han identificado estudios específicos que analicen su aplicación en la biorremediación de suelos contaminados con pesticidas organofosforados. Esta ausencia de investigaciones puede deberse a la falta de financiamiento, puesto que el sistema de innovación del Perú no cuenta con un sistema operativo de gobernanza fundamentado en una visión apta para llevar a cabo de manera eficiente la labor de establecer prioridades. Estos elementos generan un sistema de apoyo débil e ineficaz para las actividades de ciencia, tecnología e innovación (CTI), lo que se intensifica cuando se busca orientar hacia la solución de problemas [35]. Considerando la alta contaminación de suelos en regiones agrícolas como San Martín y Lima, su aplicación resulta viable en zonas como la costa y la sierra, donde el uso de pesticidas es intensivo y se han reportado residuos tóxicos persistentes en cultivos hortícolas y frutales [6]. Debido a que la *Pseudomonas aeruginosa* tiene la capacidad de adaptación a condiciones ambientales adversas y actúa en suelos con distintos niveles de contaminación [18].

Para su implementación en el Perú, se recomienda iniciar estudios piloto en estrategias basadas en ingeniería genética, consorcios bacterianos y biofertilizantes en áreas con altos niveles de contaminación por organofosforados, como Chancay-Huaral, Picota – San Martín, donde se han identificado residuos de pesticidas en suelos y cuerpos de agua [10], [11]. Estas zonas representan un escenario propicio para evaluar la eficiencia de la biorremediación en condiciones reales de campo. En estos contextos, es viable instalar unidades de producción local de consorcios microbianos mediante biorreactores artesanales o modulares, permitiendo una producción continua y adaptada a las necesidades de cada región. Estos biorreactores pueden construirse con materiales accesibles y bajo costo, como acero inoxidable y componentes comerciales, siguiendo diseños tipo tanque agitado [36]. Asimismo, se plantea el uso de protocolos de monitoreo basados en espectrofotometría UV-Vis y cromatografía para evaluar el progreso de la biodegradación y la recuperación de los parámetros edáficos.

Un ejemplo exitoso de consorcio bacteriano se dio en Brasil, Maringá realizaron un biofilm para degradar pesticidas en condiciones controladas. El estudio destaca la interacción sinérgica entre cepas como *Bacillus pumilus*, *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas nitroreducens*, demostrando que la formación de biofilms y la comunicación por quorum sensing potencian significativamente la capacidad degradadora del consorcio. En dicho estudio, se logró una degradación de hasta un 100% del pesticida clorpirifós en tan solo seis días, superando ampliamente la eficacia observada con cepas aisladas [37].

La variabilidad de los resultados reportados indica que su eficiencia puede depender de la concentración inicial del contaminante, la composición del suelo y la interacción con otros microorganismos [30]. Se ha identificado que *Pseudomonas aeruginosa* actúa como un biofertilizante natural, ya que solubiliza nutrientes como fósforo y potasio, mejora la

actividad enzimática del suelo y estimula el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas y sideróforos. Su capacidad biofertilizante, combinada con su actividad degradadora de pesticidas, permite la recuperación de suelos contaminados, reduciendo la toxicidad de los organofosforados y mejorando la calidad del suelo. [16] [26].

El uso de técnicas de ingeniería genética ha permitido mejorar la producción de ramnolípidos, biosurfactantes naturales producidos por *Pseudomonas aeruginosa* con propiedades emulsionantes que facilitan la biodegradación de pesticidas e hidrocarburos. Se ha demostrado que la modificación de la enzima RhIA puede incrementar significativamente la producción de ramnolípidos, mejorando su eficiencia en la degradación de contaminantes. Además, la manipulación genética ha permitido controlar la diversidad de ramnolípidos sintetizados, optimizando sus propiedades para aplicaciones específicas. [27] [28].

El empleo de consorcios microbianos en la biodegradación de contaminantes ha resultado ser una estrategia eficiente para optimizar la eliminación de compuestos tóxicos. En lugar de depender únicamente de *Pseudomonas aeruginosa*, la combinación con otras bacterias y hongos puede potenciar el proceso de biodegradación. En particular, la combinación con bacterias como *Bacillus* y *Serratia* permite la metabolización de productos derivados de la degradación de pesticidas, lo que sugiere que su inclusión en consorcios microbianos podría optimizar el proceso [29]. Asimismo, la integración de hongos degradadores como *Trichoderma* y *Aspergillus* complementa la actividad enzimática de *Pseudomonas aeruginosa*, facilitando la degradación de compuestos organofosforados complejos y promoviendo la estabilización del ecosistema microbiano en suelos contaminados [30].

V. CONCLUSIONES

La contaminación de suelos agrícolas por pesticidas organofosforados representa un problema ambiental significativo, afectando la calidad del suelo, la biodiversidad y la salud humana. Se ha demostrado que las *Pseudomonas aeruginosa* es una bacteria altamente eficiente en la biodegradación de estos contaminantes, con tasas de degradación que superan el 90% en diversos entornos agrícolas. Su capacidad para producir enzimas hidrolíticas y biosurfactantes, como los ramnolípidos, facilita la descomposición de compuestos tóxicos como el clorpirifós, monocrotofos y diazinón.

Entre las estrategias de optimización más prometedoras se encuentra el uso de consorcios microbianos, que combinan *Pseudomonas aeruginosa* con otras bacterias y hongos degradadores. Esta sinergia entre microorganismos permite una degradación más eficiente y completa de los contaminantes, ya que diferentes especies pueden metabolizar diversos productos derivados de la degradación de los pesticidas. Por ejemplo, la combinación de *Pseudomonas aeruginosa* con bacterias como *Bacillus* y *Serratia*, así como con hongos como *Trichoderma* y *Aspergillus*, ha demostrado ser particularmente efectiva. Estos

consorcios no solo mejoran la biodegradación de los pesticidas, sino que también contribuyen a la restauración de la calidad del suelo y la salud del ecosistema, al aumentar la disponibilidad de nutrientes y promover la actividad enzimática en el suelo.

Además, la ingeniería genética ha permitido optimizar la capacidad degradadora de *Pseudomonas aeruginosa*, especialmente en la producción de ramnolípidos, biosurfactantes que facilitan la solubilización y degradación de compuestos tóxicos. La modificación de enzimas clave, como RhIA, ha demostrado ser una estrategia efectiva para aumentar la producción de estos compuestos, mejorando así la eficiencia de la biorremediación.

En el contexto peruano, aunque no se han identificado estudios específicos sobre la aplicación de *Pseudomonas aeruginosa* en la biorremediación de suelos contaminados con pesticidas organofosforados, su implementación en regiones con altos niveles de contaminación, como Chancay-Huairal y Picota-San Martín, resulta viable y prometedora. La falta de financiamiento, laboratorios especializados y normativas ambientales estrictas son barreras que deben superarse para fomentar la investigación y aplicación de estas tecnologías en el país.

La *Pseudomonas aeruginosa* se posiciona como una herramienta biotecnológica clave para la remediación de suelos contaminados con pesticidas organofosforados. Su capacidad degradadora, combinada con estrategias de optimización como el uso de consorcios microbianos y la ingeniería genética, ofrece una solución sostenible y eficiente para la recuperación de suelos agrícolas y la reducción de los impactos ambientales y sanitarios asociados a estos contaminantes. La implementación de estas tecnologías, junto con el desarrollo de políticas ambientales más estrictas, es fundamental para garantizar la sostenibilidad agrícola y la protección de los ecosistemas en el Perú y otras regiones afectadas por la contaminación de suelos.

VI. REFERENCIAS

- [1] C. Ocampo, «El potencial de la biorremediación.» *Herreriana*, vol. 2, n° 2, 2021.
- [2] R. Katikala, M. Singh, R. Atmakuru, V. Tyagi, A. Reddy y B. Viswanath, «Recent trends in bacterial enzymatic degradation and toxicity evaluations of organophosphorous pesticides.» *Recent Developments in Applied Microbiology and Biochemistry*, vol. 2, pp. 231 - 239, 2021.
- [3] P. González, «Efecto de los plaguicidas sobre la salud humana.» *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, 2019.
- [4] B. Castillo, J. Ruiz, M. Manrique y C. Pozo, «Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete (Perú).» *espacios*, vol. 41, n° 10, p. 11, 2020.
- [5] M. Hernández, N. Alvarez y L. Ríos, «Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática.» *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*, vol. 18, n° 1, pp. 139 - 159, 2017.
- [6] B. Castillo, J. Ruiz, M. Manrique y C. Pozo, «Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete (Perú).» *REVISTA ESPACIO*, vol. 41, n° 10, p. 11, 2020.
- [7] G. Posada, J. Quintero, D. Arrieta y J. Paez, «Análisis Bibliométrico Acerca de la Contaminación por Organo-Fosforados en Cuerpos de Agua en Colombia, sus Implicaciones, Afectaciones Especialmente de Origen de Fertilizantes en Suelos Agrícolas.» *Ciencia Latina*, vol. 7, n° 5, pp. 7784 - 7796, 2023.
- [8] M. Carranza, M. Contreras, M. Macias, P. Pincay, E. Rendón y R. Herrera, «Uso de los pesticidas y su efecto en el cultivo de Zea mays: Una revisión de la literatura.» *COCIRI*, vol. 4, n° E2, pp. 1258 - 1286, 2023.
- [9] W. Catalan, F. Catalan, J. Alcázar, A. Rodríguez y M. Canta, «Uso de insecticidas y fungicidas en agroecosistemas de papa en la Region de Cusco.» *Q'EUÑA*, vol. 14, n° 2, pp. 13 - 21, 2023.
- [10] S. Rodríguez, O. Ortiz y J. Castillo, «Evaluation of the environmental impact of pesticides for pest control in the main horticultural crops of the Chancay-Huairal valley, Lima.» *Peruvian Journal of Agronomy*, vol. 7, n° 1, pp. 1 - 19, 2023.
- [11] C. Espinoza y J. Peche, «Contaminación de suelos por uso de agroquímicos en cultivos de papaya (Carica papaya), Picota, Perú.» *Ciencias Agroindustriales*, vol. 14, n° 1, pp. 7 -13, 2024.
- [12] M. Marin, A. Hernandez y R. Caceres, «Nanotecnología y Agricultura: Detección, Monitoreo y Remediación de Contaminantes.» *Revista UNSIS*, vol. 8, n° 23, pp. 29 - 35, 2021.
- [13] A. Rodríguez, S. Zarate y A. Bastida, «Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación.» *TROPICAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES*, vol. 56, n° 1, pp. 178 - 208, 2022.
- [14] J. Chiriví, C. Fajardo, A. Gómez y D. Delgado, Revisión y panorama nacional de biorremediación microbiana., Sello Editorial UNAD, 2019.
- [15] P. Rivera, J. Rivera, E. Andrade, L. Heyer, F. De La Garza y B. Castro, «BIOESTIMULACIÓN Y BIORREMEDIACIÓN DE RECORTES DE PERFORACIÓN CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS.» *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 34, n° 2, 2018.
- [16] D. Luján, «Uso de Pseudomonas aeruginosa en biorremediación.» *BioTecnología*, vol. 23, n° 1, 2019.
- [17] N. Rodríguez, M. McLaughlin y D. Pennock, La Contaminación del suelo: Una realidad oculta, FAO, 2019.
- [18] B. e. a. Kuheli, «Microbios potenciales en la biorremediación: una revisión.» vol. 28, 2024.
- [19] K. Paredes, L. Santillán y M. Viteri, «Capacidad degradadora de pseudomonas aeruginosa frente a metales pesados presentes.» *Polo del Conocimiento*, vol. 6, n° 5, 2021.
- [20] [20] -Moher at al., «Ítems de referencia para publicar Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis: La Declaración PRISMA.» *Esp Nutr Hum Diet*, vol. 18, n° 3, 2014.
- [21] Moher at al., «Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement.» *PLOS Medicine*, vol. 6, n° 7, 2009.
- [22] A. Hussain y H. Sabah, «Eficacia de Pseudomonas putida en la biorremediación de la toxicidad del clorpirifos.» *IOPSCIENCE*, vol. 722, 2021.
- [23] A. Kumar, A. Kasture, P. Jyotsana y P. Shirkot, «Aislamiento, caracterización e identificación de una cepa de Pseudomonas tolerante al clorpirifos que exhibe actividad de hidrolasa organofosforada extracelular (OPH) en suelos de huertos de manzanas de Himachal Pradesh.» *Revista asiática de microbiología, biotecnología y ciencias ambientales*, vol. 19, n° 4, pp. 935 - 944, 2017.
- [24] F. Amani, A. Safari, F. Ebrahimi y S. Nazarian, «Biodegradation of Chlorpyrifos and Diazinon Organophosphates by Two Bacteria Isolated from Contaminated Agricultural Soils.» *Biological Journal of Microorganism*, vol. 7, n° 28, 2019.

- [25] B. Jaramillo, A. Bermúdez y I. Tirado, «Bacterias degradantes de pesticidas organofosforados presentes en suelos contaminados,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 25, n° 3, pp. 13 - 22, 2016.
- [26] M. Harún, S. Xie, W. Awadelkareem, J. Wang y X. Qian, «Influencia de los biofertilizantes en la biorremediación de metales pesados y las actividades enzimáticas en el suelo para revelar el potencial de restauración sostenible del suelo,» *scientific reports*, vol. 13, 2023.
- [27] C. Dulcey, Y. Lopez, M. Letourneau, E. Deziel y N. Doucet, «Semi-rational evolution of the 3-(3-hydroxyalkanooyloxy)alkanoate (HAA) synthase RhIA to improve rhamnolipid production in *Pseudomonas aeruginosa* and *Burkholderia glumae*,» *FEBS Journal*, vol. 286, n° 20, pp. 4036 - 4059, 2019.
- [28] T. e. a. Tiso, «Designer rhamnolipids by reduction of congener diversity: production and characterization,» *Microbial Cell Factories*, vol. 16, p. 255, 2017.
- [29] A. Castro, «Enfoques y Métodos para la Aplicación de Biorremediación en la Degradación de Contaminantes Ambientales,» *High Tech Engineering Journal*, vol. 2, n° 2, 2022.
- [30] K. Castillo, D. Ahuatzi, N. Ruiz, C. Sandoval, C. Juárez, J. Galíndez y A. Salmerón, «BIODEGRADATION OF THE COMMERCIAL MIXTURE OF THE HERBICIDES ATRAZINE AND AMETRYN, USING CULTURES WITH SUSPENDED AND IMMOBILIZED CELLS,» *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 35, n° 3, 2019.
- [31] M. Vázquez, E. Valiño, L. Torta, A. Laudicina, M. Sardina y G. Mirabile, «Potencialidades del consorcio microbiano *Curvularia kusanoi* - *Trichoderma pleuroticola* como pretratamiento biológico para la degradación de fuentes fibrosas,» *Revista MVZ Córdoba*, vol. 27, n° 2, 2022.
- [32] M. Mostajo, M. Ochoa y R. Ambur, «Efectividad de cepas de *Aspergillus* y *Penicillium* en la degradación de polietileno de baja densidad aislados en los botaderos de los Distritos de Sicuani y Calca- Cusco,» *CANTUA*, vol. 16, n° 1, 2017.
- [33] -P. Macías, F. Guevara, V. Ruiz, M. Reyes, M. Arias y R. Pinto, «Efecto de tres consorcios microbianos en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas,» *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, vol. 7, n° 13, 2021.
- [34] A. Sawadogo, O. Harmonie, J. Sawadogo, A. Karobé y D. Dianou, «Isolation and Characterization of,» *Journal of Environmental Protection*, vol. 5, pp. 1183 - 1196, 2014.
- [35] U. Harman, P. Corilloclla y B. Alayza, «Hacia una política de ciencia, tecnología e innovación más inclusiva en Perú,» *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, vol. 18, n° 54, pp. 11 - 33, 2023.
- [36] M. Serrat y A. Méndez, «Construcción y Validación Experimental de un,» *Centro de Estudios de Biotecnología Industrial*, vol. 35, n° 3, pp. 362 - 375, 2022.
- [37] P. Pereira y L. Yaskara, «Biodegradação e biorremediação de pesticidas: sistemas de,» *Biodegradação e Biorremediação*, vol. 5, p. 77, 2022.