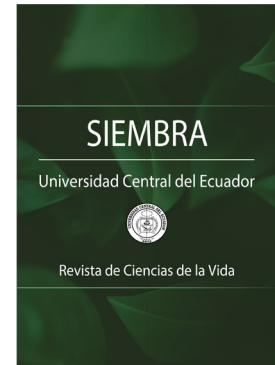


Biodegradación de pesticidas por microorganismos aislados de compost

Biodegradation of pesticides by compost-isolated microorganisms

Ana María Cunachi Pillajo¹, Jimmy Romario Clemente Rivera²,
Talía Luzmila Barragán Rodríguez³



Siembra 12 (2) (2025): e6949

Recibido: 15/07/2024 / Revisado: 07/11/2024 / Aceptado: 11/06/2025

- ¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
Facultad Recursos Naturales. Laboratorio
Ciencias Biológicas. Panamericana Sur km 1½.
CP 060106. Riobamba, Chimborazo, Ecuador.
✉ amcunachip@esPOCH.edu.ec.
<https://orcid.org/0000-0001-6391-3489>
- ² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
Facultad de Ciencias. Panamericana Sur km 1½.
060106. Riobamba. Chimborazo. Ecuador.
✉ jimmy.clemente@esPOCH.edu.ec.
<https://orcid.org/0009-0000-8671-3914>
- ³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
Facultad de Ciencias. Panamericana Sur km 1½.
060106. Riobamba. Chimborazo. Ecuador.
✉ talia.barragan@esPOCH.edu.ec.
<https://orcid.org/0009-0004-1062-4586>

* Autor de correspondencia:
animari4025@hotmail.com

Resumen

La degradación del suelo y la baja productividad agrícola a menudo se han relacionado con el uso indiscriminado de pesticidas. En los últimos años, con el objetivo de restaurar la fertilidad del suelo, los agricultores han recurrido al uso de fertilizantes orgánicos, los cuales aportan tanto macronutrientes como micronutrientes para mejorar la producción agrícola. Sin embargo, la carga microbiana de estos fertilizantes también puede afectar a las poblaciones biológicas del suelo, su diversidad y su actividad. En este contexto, los objetivos de este estudio fueron evaluar la calidad microbiológica de muestras de compost y realizar pruebas de degradación de pesticidas. Los análisis microbiológicos revelaron que la carga microbiana del compost estaba compuesta principalmente por hongos fitopatógenos, como *Fusarium spp.* y *Cladosporium spp.*, así como por bacterias fitopatógenas, incluidas *Pseudomonas spp.* y enterobacterias, las cuales pueden ser patógenas para humanos y animales. La población y diversidad de actinomicetos fue notablemente baja. Análisis previos identificaron la persistencia de pesticidas como glifosato, clorfenapir y difenoconazol en las muestras. Las bacterias y actinomicetos más abundantes, caracterizados como *Pseudomonas spp.* y *Streptomyces spp.* (ACP1 y ACP2), fueron eficaces en la degradación de estos plaguicidas en condiciones in vitro. Específicamente, el difenoconazol se degradó hasta en un 70 %, el clorfenapir en un 44 % y el glifosato en un 30 %, tanto de forma individual como en mezclas, reduciendo así la concentración de estos contaminantes y demostrando el potencial de estos microorganismos en procesos de descontaminación y biorremediación.

Palabras clave: producción agrícola, pesticidas, fertilizantes, hongos fitopatógenos, biodiversidad.

Abstract

Soil degradation and low agricultural productivity have often been linked to the indiscriminate use of pesticides. In recent years, to restore soil fertility, farmers have increasingly turned to organic fertilizers, which supply both macronutrients and micronutrients to enhance crop production. However, the microbial load of these fertilizers can significantly impact soil biological populations, their diversity, and their activity. In

SIEMBRA
<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA>
ISSN-e: 2477-8850
Periodicidad: semestral
vol. 12, núm 2, 2025
siembra.fag@uce.edu.ec
DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v12i2.6949>



Esta obra está bajo una licencia
internacional Creative Commons
Atribución-NoComercial

this context, the objectives of this study were to assess the microbiological quality of compost samples and to conduct pesticide degradation tests. Microbiological analyses revealed that the compost's microbial load was primarily composed of phytopathogenic fungi, such as *Fusarium spp.* and *Cladosporium spp.*, as well as phytopathogenic bacteria, including *Pseudomonas spp.* and Enterobacteriaceae, which are pathogenic to humans and animals. The population and diversity of actinomycetes were notably low. Previous analyses identified the persistence of pesticides such as glyphosate, chlorfenapyr, and difenoconazole in the samples. The most abundant bacteria and actinomycetes, identified as *Pseudomonas spp.* and *Streptomyces spp.* (ACP1 and ACP2), were effective in degrading these pesticides under in vitro conditions. Specifically, difenoconazole was degraded by up to 70%, chlorfenapyr by 44%, and glyphosate by 30%, both individually and in mixtures. These results demonstrate the potential of these microorganisms for use in decontamination and bioremediation processes by reducing pesticide concentrations in soil.

Keywords: agricultural production, pesticides, fertilizers, phytopathogenic fungi, microbiodiversity.

1. Introducción

Los agroquímicos son compuestos ampliamente usados en la agricultura para controlar el crecimiento de maleza, enfermedades y plagas en los cultivos. Su modo de acción incluye acción repelente, mitigación o destrucción de hierbas, plagas y enfermedades. Según su propósito, los agroquímicos pueden ser clasificados en insecticidas, herbicidas, bactericidas, fungicidas, acaricidas, molusquicidas, nematocidas, protectores de madera y raticidas (Ahamad y Kumar, 2023; Durán-Lara et al., 2020; Parra-Arroyo et al., 2022). Los herbicidas son comúnmente usados para mejorar el rendimiento del cultivo y su calidad, reduciendo o inhibiendo el brote de maleza. Éstos también sirven como desecantes para varios granos como cereales (por ejemplo: trigo, cebada, avena, maíz, sorgo), semillas oleaginosas (por ejemplo: soya, canola), legumbres (como fréjol, arveja, garbanzo, lenteja) y pseudo cereales (como: trigo sarraceno, quinoa). Entre los herbicidas, los que están elaborados a base de glifosato (GBH), son globalmente conocidos y ampliamente usados en el control de hierbas perennes como el pasto quackgrass y el cardo, así mismo son usados para acelerar el secado de cultivos para la cosecha (Fuchs et al., 2022; Xu et al., 2019).

Sin embargo, glifosato es considerado toxicológicamente dañino y ha sido potencialmente vinculado a cáncer y otras enfermedades crónicas en humanos, incluyendo desórdenes reproductivos y mentales. Los obstáculos para el análisis y demostración de su toxicidad están posiblemente ligados a sus propiedades de quelante de metales, interferencia de compuestos orgánicos en el ambiente y a su estructura similar con el glifosato y sus subproductos (Peillex y Pelletier, 2020; Valle et al., 2019).

Otros pesticidas, como el clorfenapir, también han generado preocupación. Después de su registro inicial para el uso en cebolla verde en 1996, el uso de clorfenapir en Corea del Sur incrementó significativamente de 5.539 toneladas métricas en el 2006 a 15.821 toneladas métricas en 2014. Este incremento ha generado preocupación sobre los riesgos potenciales en la salud de los residuos de los pesticidas, a pesar de haberse establecido ya un límite máximo de residuos e intervalos de precosecha en los cultivos (An et al., 2024; Jeong et al., 2019).

Similarmente, el uso excesivo de difenoconazol puede causar daños irreversibles y crónicos a la salud humana y efectos adversos en el medio ambiente. Estudios previos han demostrado que el difenoconazol se une a la albúmina sérica humana y está asociado con el incremento en la incidencia de adenomas y carcinomas hepatocelulares en ratones después de una exposición alimenticia a largo plazo. Como resultado, la determinación de residuos de difenoconazol en frutas y vegetales poscosecha se ha convertido en una práctica esencial para garantizar la inocuidad de los alimentos para productores, autoridades regulatorias y consumidores (Qin et al., 2021; Shalaby et al., 2022; Wang et al., 2019).

El comportamiento de los pesticidas en el suelo y en el ambiente está gobernado primordialmente por dos procesos: adsorción/desorción y degradación. Los pesticidas aplicados en el suelo son adsorbidos por la materia orgánica, la cual es comúnmente añadida en forma de fertilizantes orgánicos (Rassol et al., 2022).

Los fertilizantes orgánicos o estiércol son considerados biodegradables y son mayormente derivados de plantas o recursos animales, residuos sólidos municipales, subproductos de la industria alimenticia, residuos de cultivos y varios tipos de compost, como el vermicompost, compost de residuos de cocina y efluentes de destilería (Jakubus y Michalak-Oparowska, 2022). Estos materiales orgánicos no solo suplementan nutrientes esenciales a las plantas, sino que también ayudan a reducir la necesidad de fertilizantes químicos – particularmente micronutrientes – y eliminan la necesidad de gestión o eliminación de residuos (Singh et al., 2020b; Van Gijn et al., 2021).

Sin embargo, los materiales orgánicos pueden contener también trazas de pesticidas y subproductos de su metabolismo que pueden acumularse excesivamente en el suelo a través de su difusión en agua y aire, o su persistencia en las plantaciones (Lau et al., 2023). Los residuos de pesticidas pueden degradarse tanto en el suelo como en los materiales de desecho orgánicos a través de la actividad microbiana, interacciones químicas o radiación ultravioleta. La tasa de degradación y la eliminación de pesticidas son influenciados por factores medio ambientales como la disponibilidad de agua, pH del suelo, temperatura y las propiedades químicas de los pesticidas. Los factores clave incluyen la solubilidad, volatilidad, ionización, hidrofiliicidad y lipofiliicidad. La descomposición de pesticidas ocurre a través de tres mecanismos primarios: microbiológico, químico y termal (Carpio et al., 2021; Lau et al., 2023; Rassol et al., 2022).

En este contexto, los objetivos de este estudio fueron evaluar la calidad microbiana de muestras de compost y determinar la degradación de pesticidas mediante actividad microbiana.

2. Materiales y Métodos

2.1. Calidad microbiana del compost

Las muestras de compost fueron recolectadas usando el método de cuarteo en los lotes, tomando cinco submuestras de cada uno, resultando en un total de 12 toneladas de producto (Buol et al., 2011; Salazar Calvo et al., 2020). El pH de las muestras fue determinado en el Laboratorio de Ciencias Biológicas, Facultad de Recursos Naturales, ESPOCH. Las diluciones seriales fueron preparadas de 10^{-1} a 10^{-6} , y 100 μL de cada dilución fueron utilizados para inocular agar nutritivo [NA], agar papa dextrosa [PDA], agar dextrosa Sabouraud [SDA] y medio selectivo: agar eosina azul de metileno [EMB] para enterobacterias, agar *Pseudomonas* [PA] para el género *Pseudomonas* y agar glucosa extracto de levadura [GYM] para actinomicetos. Todas las cepas fueron incubadas a temperatura ambiente, de 17°C a 22°C . El crecimiento bacteriano fue evaluado a las 72 horas, mientras que el crecimiento de hongos y actinomicetos fue evaluado a las 120 horas. El número de unidades formadoras de colonias por gramo de suelo fue calculado (Bhimani et al., 2024; Harrigan y McCance, 2014; Ibrahim y Hameed, 2015; O'Hara, 2005; Wellington y Toth, 1994; Williams y Cross, 1971).

2.2. Aislamiento y caracterización de microorganismos con capacidad degradativa de muestras de compost

Las colonias bacterianas más abundantes fueron seleccionadas por aislamiento de cultivos puros, y las cepas fueron caracterizadas en base a su morfología macroscópica y microscópica, junto con test bioquímicos. Para la identificación del género *Pseudomonas*, la prueba de API E20 fue usado (Mashi, 2018; Mohammad et al., 2020), junto con agar MacConkey (Midhat y Abed, 2023; Pant et al., 2022). La población de hongos dominante fue aislada y caracterizada a través de la morfología macroscópica y microscópica (Agu y Chidozie, 2021; Fischer y Dott, 2002). Adicionalmente, las colonias de actinomicetos más abundantes fueron aisladas para obtener cultivos puros. Usando el medio GYM, su micelio aéreo, micelio del sustrato, pigmentos difusibles, morfología microscópica y crecimiento con diferentes aminoácidos fueron caracterizados (Kumar y Jadeja, 2016; Rodríguez et al., 2018; Sapkota et al., 2020).

2.3. Ensayos de degradación de pesticidas bajo condiciones in vitro

Tres de los microorganismos más abundantes del compost fueron seleccionados por la prueba de degradación de pesticidas: una bacteria identificada como *Pseudomonas spp.* y dos cultivos de actinomicetos, ACP1 y ACP2. Un hongo de la colección DCB fue usado como referencia para la degradación.

El medio de cultivo usado en la prueba de degradación consistió en un pesticida comercial disuelto en agua destilada solidificada con agar Bacto. Las concentraciones fueron 4,6 ppm de glifosato, 4,4 ppm de clorfenapir y 4,1 ppm de difenoconazol, mientras que la mezcla de pesticidas alcanzó una concentración de 13,21 ppm. En cada medio de cultivo, 50 μL de suspensión microbiana fue añadida. Las concentraciones de microorganismos fueron: (1) *Pseudomonas spp.* ($5,25 \times 10^7$ CFU μL^{-1}), (2) ACP1 ($3,80 \times 10^7$ CFU μL^{-1}), (3) ACP2 ($1,20 \times 10^7$ CFU μL^{-1}), (4) *T. harzianum* ($2,75 \times 10^7$ CFU μL^{-1}), and (5) tratamiento control, que recibió 50 μL de agua destilada estéril (Esimbekova et al., 2022; Pizzul et al., 2009; Rossi et al., 2021).

Las pruebas fueron incubadas a temperatura ambiente ($17^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) por 15 días. La capacidad degradati-

va de los microorganismos fue evaluada midiendo el diámetro de las colonias y determinando su morfología. Los residuos de pesticidas en el medio de cultivo fueron analizados usando cromatografía de gases y espectrometría de masas [GC-MS/MS], siguiendo el procedimiento Lab 1-01-105 de la Compañía Agrolab (Lab Innovation Analytical, una Compañía Tentamus) (Hernández-Mesa y Moreno-González, 2022; Riedo et al., 2023).

3. Resultados y Discusión

3.1 Calidad microbiológica del compost suge

La carga microbiológica de las muestras de compost fue dominada por hongos y bacterias con niveles bajos de actinomicetos (Tabla 1). Estos resultados son consistentes con estudios previos que describen comunidades microbiológicas durante el compostaje, que típicamente incluye a bacterias, hongos y protozoarios. La composición de estas comunidades varía dependiendo de factores como la temperatura, contenido de humedad, proporción de C/N y la naturaleza de los materiales orgánicos usados. Bacterias y hongos son generalmente los microorganismos más abundantes y de rápida aparición durante el compostaje, ya que los sustratos y la microbiota nativa influyen significativamente la calidad del compostaje final (Palaniveloo et al., 2020; Rastogi et al., 2020; Singh et al., 2022).

Tabla 1. Cuantificación de las Unidades formadoras de colonias por gramo (CFU g⁻¹) en las muestras de compost.
Table 1. Quantification of Colony Forming Units per gram (CFU g⁻¹) in the compost samples.

Muestra	Bacteria			Hongo		Actinomicetos
	NA	PA	EBM	PDA	SDA	GYM
Compost 1	5,73E+05	7,80E+05	3,59E+05	5,30E+05	2,50E+04	3,63E+05
Compost 2	4,52E+06	6,14E+05	3,81E+05	4,87E+05	2,32E+04	3,30E+05
Compost 3	6,02E+05	7,10E+05	3,09E+05	4,95E+05	2,41E+04	3,17E+05
Compost 4	5,11E+05	6,57E+05	3,47E+05	5,53E+05	2,55E+04	3,84E+05
Compost 5	5,81E+05	7,80E+05	3,24E+05	5,76E+06	2,76E+04	3,69E+05
$\bar{x}$	1,36E+06	7,08E+05	3,44E+05	1,57E+06	2,51E+04	3,53E+05

Ha sido demostrado que, durante las fases mesofílicas y termofílicas del compostaje, la abundancia relativa de los hongos patógenos de plantas disminuye significativamente gracias a las altas temperaturas que son críticas para su eliminación. Sin embargo, durante las etapas de enfriamiento y maduración, la abundancia de los hongos patógenos puede retornar a los niveles iniciales, sugiriendo que algunas especies sobreviven el proceso de compostaje. Mientras que ciertos hongos pierden viabilidad, otros pueden recolonizar el compost, ya que las temperaturas bajan durante la maduración. Nuestros resultados se alinean a previos reportes que indican un incremento en abundancia de hongos durante la fase de enfriamiento, probablemente debido a condiciones nutricionales en el compost maduro que favorecen el crecimiento de hongos (Danish et al., 2021; Lv et al., 2023; Xu et al., 2024).

Notablemente, la población de hongos estuvo compuesta predominantemente por especies fitopatógenas, lo que contrastó con otros reportes que indicaban la ausencia de hongos debido a inhibición durante la descomposición (Boiu-Sicuiu et al., 2021). La caracterización microscópica y morfológica de las colonias de hongos revelaron la presencia de *Fusarium sp.*, *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, y *Cladosporium sp.* (Ameen y Al-Homaidan, 2020; Chorolque et al., 2021). La abundancia de especies de *Aspergillus* and *Penicillium* en nuestras muestras es consistente con otros estudios que reportaron estos géneros como los más comunes y generalizados durante varios procesos de compostaje (Akyol et al., 2019; Kurakov y Bilanenko, 2023; Zhang et al., 2022).

La población de bacterias en las muestras analizadas indicó niveles de diversidad comparables a los reportados en la literatura. La riqueza bacteriana tiende a incrementar a medida que el compostaje progresa, típicamente alcanzando el pico durante el compost maduro. Sin embargo, la diversidad microbiana es también influenciada fuertemente por los tipos de residuos usados, los cuales afectan directa o indirectamente a la ca-

lidad del compost, particularmente en términos de estabilidad y fitotoxicidad debido a sus amplias habilidades bioquímicas (Chen et al., 2024; Liu et al., 2023; Singh et al., 2023; Zhan et al., 2023; Zhao et al., 2018). En base a sus características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas, la mayoría de las colonias bacterianas en nuestras muestras fueron identificadas como parte de la familia de Enterobacteriaceae, *Pseudomonas spp.* y otras bacterias Gram negativas (Liu et al., 2020; Meng et al., 2019; Naeem et al., 2022).

Los actinomicetos, otro grupo de microorganismos clase, fueron identificados en las muestras de compost. Estos microorganismos están bien documentados en el compost maduro y ambientes naturales. Muchos géneros son conocidos por promover la germinación de semillas, el desarrollo de raíces y control biológico (Ayed et al., 2021; Ćwiertniewicz-Wojciechowska et al., 2023; Kannan y Kallapiran, 2022). Nuestros resultados son consistentes con los de Buzón-Durán et al. (2020), quien reportó la proliferación de actinobacterias durante los períodos de bajas temperaturas y su presencia en amplias variedades de compost, residuos agrícolas y suelos (Chopkova et al., 2023). Muchos estudios sugieren que la abundancia de los actinomicetos incrementa con la temperatura del compost. La baja diversidad de actinomicetos observada en nuestras muestras puede estar atribuida a factores fisicoquímicos, particularmente pH y temperatura que influyen a las comunidades de microorganismos a través de las diferentes fases del compost (Grigorova-Pesheva et al., 2024; Narsing Rao y Li, 2022).

3.2 Aislamiento y caracterización de microorganismos con capacidad degradativa de las muestras de compost

Las cepas de hongos fueron excluidas del estudio de degradación de pesticida debido a sus características patógenas. La microbiota presente en los fertilizantes como el compost, puede crear condiciones medioambientales adversas para la microbiota nativa del suelo, añadiendo un nivel de supresión alejado de los naturales (Araujo, 2022; de Corato, 2020; Kraut-Cohen et al., 2023). Mientras que algunos hongos fitopatógenos han sido reportados como biorremediadores, preservar la biodiversidad microbiana permanece como algo esencial para mantener la calidad del suelo y promover la salud de los cultivos (Ahmad, 2020; Esparza-Naranjo et al., 2021; Fauriah et al., 2021; Leskovic y Petrović, 2023; Matúš et al., 2023; Rigolin et al., 2024; Sharma, 2021; Tawfik Ali ElHaty et al., 2022). Las cepas más abundantes de bacterias y actinomicetos fueron aisladas y caracterizadas. La morfología de las colonias bacterianas (pequeñas, colonias redondeadas), características microscópicas (bacilos curvados, Gram negativos), y pruebas bioquímicas (catalasa y oxidasa positivas), así mismo con la producción de un pigmento fluorescente color verdusco-amarillo debajo de luz UV, indicaron que las cepas pertenecen al género de *Pseudomonas spp.* (Figura 1), consistente con las descripciones de varios autores (de Sousa et al., 2021; Girard et al., 2021; Lakshmanan et al., 2020; Maleki et al., 2010; Ruiz-Hernandez et al., 2024; Nazem Shirazi et al., 2023).

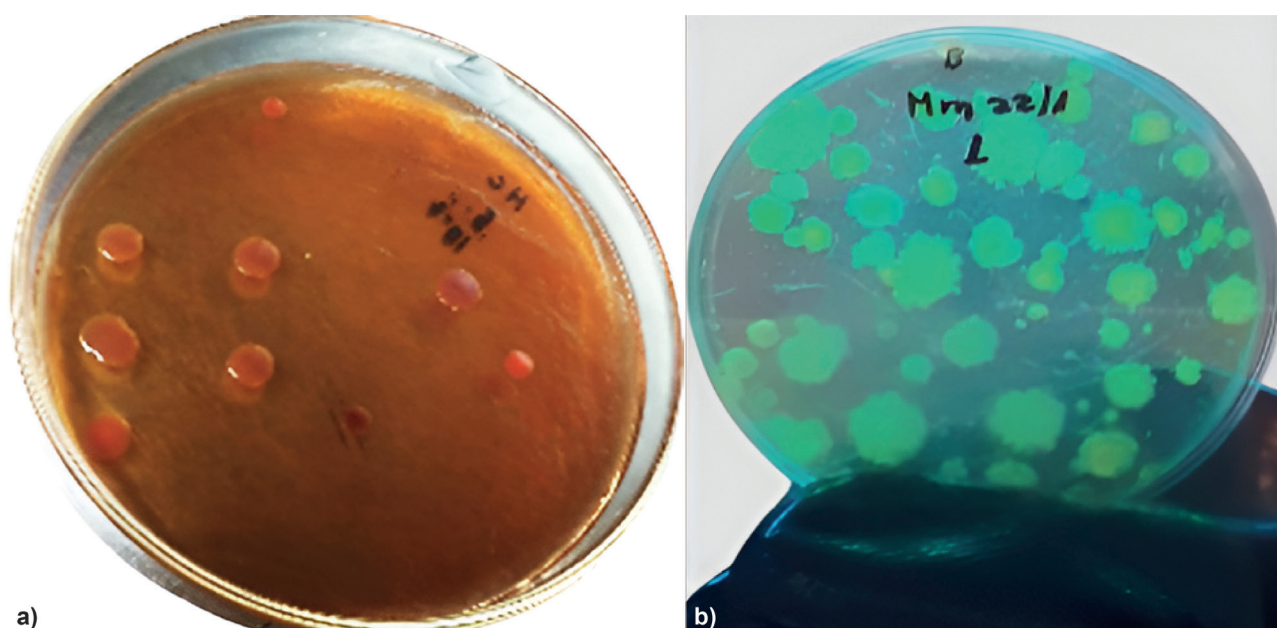


Figura 1. a) Colonias de *Pseudomonas spp.*, en agar MacConkey, 72 horas de incubación a 26°C; b) Fluorescencia en agar *Pseudomonas*.
Figure 1. a) Colonies of *Pseudomonas spp.*, on MacConkey agar, 72 hours of incubation at 26°C; b) Fluorescence on *Pseudomonas* agar.

Numerosas especies de *Pseudomonas* han sido reportadas como degradadoras de pesticidas debido a su flexibilidad genética y versatilidad metabólica. Estas bacterias usan varios mecanismos para la degradación, incluyendo la respiración anaeróbica y aeróbica, quimiolitotrofia, actividad extracelular de enzimas y fermentación. A pesar de existir limitaciones, como la mineralización incompleta o la baja eficiencia en la degradación de mezclas compuestas de pesticidas, sus procesos moleculares y potencial catabólico son claves para la biorremediación (Ahmad et al., 2022; Randika et al., 2022; Rodríguez et al., 2020; Xu et al., 2023).

Las cepas de actinomicetos fueron caracterizadas también. Su micelio aéreo y pigmentos difusibles (Figura 2) descritos por el Estándar Británico BS 381C del cuadro de colores, junto con la morfología de las colonias y microscopía de las esporas (Tabla 2), confirmaron que las cepas ACP1 y ACP2 mostraron las características típicas del género *Streptomyces*. Ensayos de crecimiento con varias fuentes de carbono mostraron que las dos cepas pudieron metabolizar cinco de los ocho sustratos testeados (Tabla 3). Esta habilidad para utilizar diferentes aminoácidos y fuentes orgánicas es típica de los actinomicetos, lo cuales juegan un rol en el ciclo del carbono, desdoblando polímeros complejos y aportando a las dinámicas de comunidades microbianas (Grgas et al., 2023; Mehta y Jadeja, 2022; Oyedoh et al., 2023; Pérez-Corral et al., 2022; Rodríguez-Fonseca et al., 2021; Salem et al., 2023).

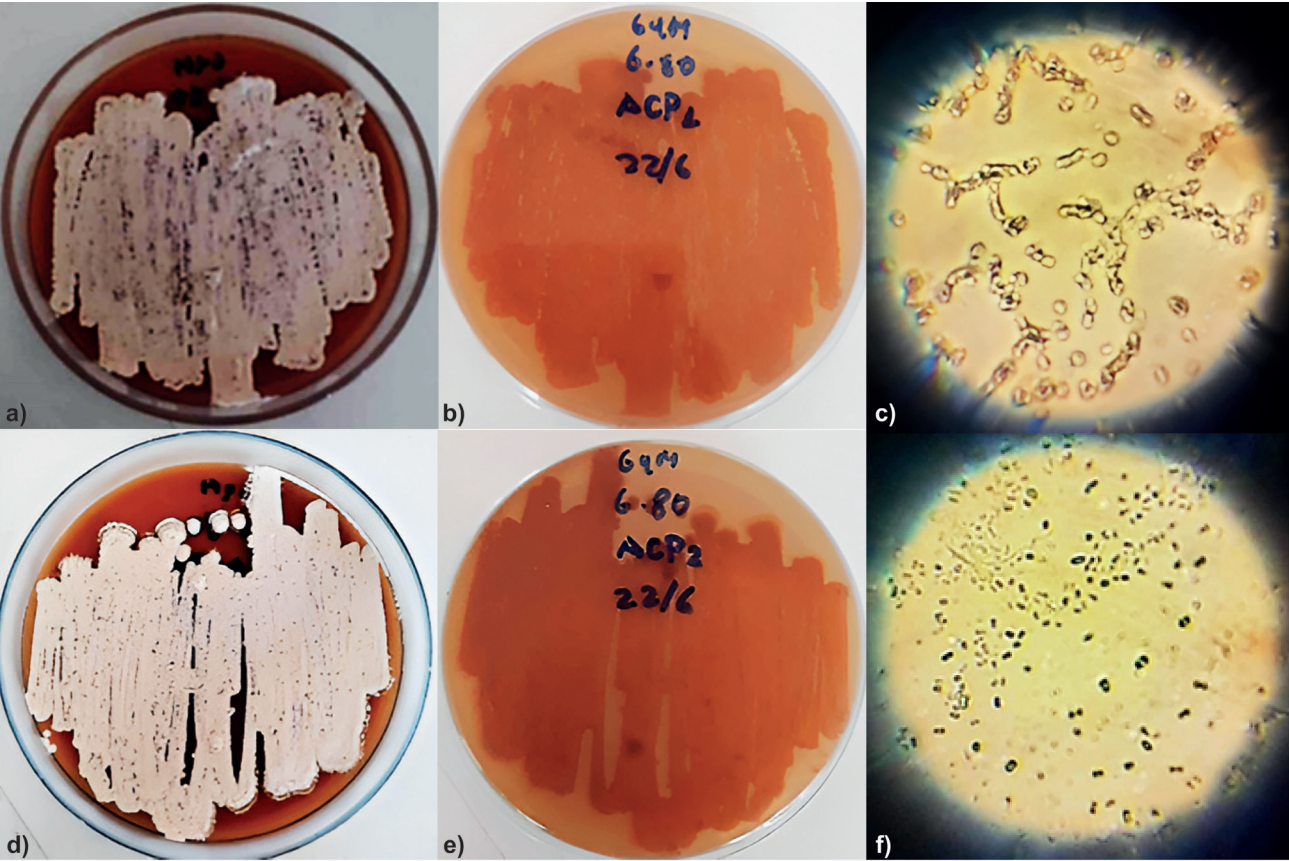


Figura 2. Colonias de Actinomicetos en cultivo puro [GYM] y microscopía de esporas: a) ACP1: micelio aéreo, b) ACP1: pigmento difusible; c) ACP1: esporas_1000X, d) ACP2: micelio aéreo, e) ACP2: pigmento difusible; f) ACP2: esporas_1000X.

Figure 2. Actinomycetes colonies in pure culture [GYM] and spore microscopy: a) ACP1: aerial mycelium, b) ACP1: diffusible pigment; c) ACP1: spores_1000X, d) ACP2: aerial mycelium, e) ACP2: diffusible pigment; f) ACP2: spores_1000X.

Tabla 2. Descripción macro y microscópica de cepas de actinomicetos.
Table 2. Macro and microscopic description of actinomycetes isolates.

Cepas	Micelio aéreo	Pigmento difusible	Esporas
ACP1	380 Camouflage Desert Sand*	592 International Orange*	Cadena larga ovalada
ACP2	460 Deep Buff*	537 Signal Red*	Individuo elongado
	*BS 381C	*BS 381C	1000 X

Table 3. Crecimiento de actinomicetos en diferentes fuentes de carbono.
Table 3. Growth of actinomycetes on different carbon sources.

Aminoácidos	Actinomicetos (120 h)		
	ACP1	ACP2	Control
Úrea	1	1	0
Ácido glutámico	1	1	0
Ácido aspártico	1	1	0
Asparagina	1	1	0
Arginina	1	1	0
Cisteína	0	0	0
Glicina	0	0	0
Tirosina	0	0	0
¹ crecimiento	⁰ sin crecimiento		

Los actinomicetos también desarrollan varias funciones beneficiosas incluida la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato, producción de fitohormonas y enzimas, descomposición de materia orgánica, biocontrol de fitopatógenos y biorremediación de suelos y sustratos. Por esta razón, ACP1 y ACP2 fueron seleccionados para los ensayos de degradación de pesticidas, para explorar los mecanismos comunes entre microorganismos como la competencia por espacio y nutrientes, secreción de antibióticos, sideróforos, enzimas líticas, compuestos orgánicos volátiles, síntesis de fitohormonas e inducción a la resistencia (Nazari et al., 2022; Torres-Rodríguez et al., 2022).

Ambas *Pseudomonas spp.* and *Streptomyces spp.* contribuyen a la degradación a través de mecanismos biológicos y ambientales. Sin embargo, la biorremediación a través de su actividad microbiana es considerada como la estrategia más efectiva para transformar a los pesticidas en compuestos más simples, menos tóxicos usando el fuerte potencial metabólico de los organismos. Este potencial puede estar influenciado por factores como la eficiencia degradativa, fácil cultivo, tamaño del inóculo, tolerancia a las altas concentraciones de pesticidas, adaptabilidad y competitividad con las comunidades nativas de microbios (Conde-Avila et al., 2021; Dar et al., 2023; Guerrero Ramírez et al., 2023; Roumeng et al., 2023).

3.3 Degradación de pesticidas bajo condiciones in vitro

El resultado de las pruebas de degradación de pesticidas reveló cambios notables en el crecimiento y morfología de los microorganismos evaluados. *Pseudomonas spp.* mostraron un lento, irregular crecimiento y sus colonias perdieron su característico brillo. Para las cepas Actinomicetos ACP1 y ACP2, su crecimiento fue también lento, el micelio aéreo perdió pigmentación y la esporulación fue acelerada pero escasa. *Trichoderma harzianum* colonizó el medio en 9 horas con esporulación igual de acelerada, pero limitada (Figura 3). Estas observaciones concuerdan con otros estudios que reportaron los impactos morfológicos y fisiológicos de los pesticidas en el crecimiento y viabilidad de microorganismos (Mohapatra et al., 2022; Shahid et al., 2021).

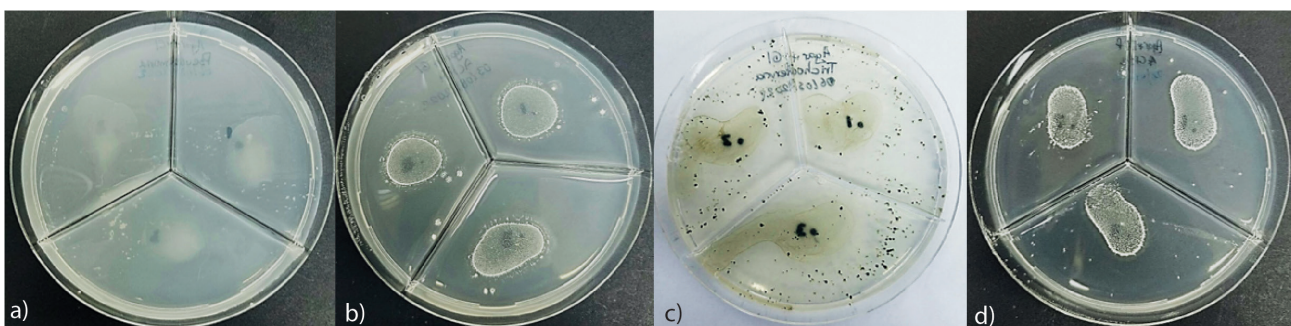


Figura 3. Alteraciones morfológicas de microorganismos degradadores de pesticidas: a) *Pseudomonas* / Clorfenapir, b) ACP1 / Glifosato c) *Trichoderma harzianum* / Glifosato, d) ACP2 / Difenconazol.

Figure 3. Morphological alterations of pesticide-degrading microorganism: a) *Pseudomonas* / Chlorfenapyr; b) ACP1 / Glyphosate c) *Trichoderma harzianum* / Glyphosate, d) ACP2 / Difenoconazole.

Los análisis de residuos (Tabla 4) confirmaron que todos los microorganismos testeados redujeron efectivamente las concentraciones de pesticidas (Figura 4). Entre los compuestos, difenoconazol fue el más degradado con una reducción de hasta 87%. Esto se debe a la eficiencia microbiana y a las condiciones aeróbicas, que se conoce ayudan a la rápida degradación. Los procesos de compostaje aeróbico han estado también asociados con el mejoramiento de degradación del difenoconazol, mientras que las condiciones anaeróbicas la dificultan. Esto es relevante considerando la alta toxicidad de los pesticidas, la cual incluye efectos neurotóxicos y estrés oxidativo en organismos eucariotas (Liu et al., 2022; Man et al., 2021).

Tabla 4. Porcentaje de degradación de pesticidas por acción microbiana.
Table 4. Percentage of pesticide degradation by microbial action.

Pesticida	Microorganismo	Concentración inicial CI ppm	Concentración final CF ppm	Desviación Estándar σ	Degradación (%)
Clorfenapir	<i>Pseudomona</i> spp.	4,4	2,1	0,33040379	52,2
	ACP1	4,4	2,8		36,3
	ACP2	4,4	2,7		38,6
	<i>Trichoderma harzianum</i>	4,4	2,3		47,7
	Control	4,4	4,4		0
Difenoconazol	<i>Pseudomona</i> spp.	4,13	0,91	0,67406108	77,9
	ACP1	4,13	2		51,5
	ACP2	4,13	1,6		61,2
	<i>Trichoderma harzianum</i>	4,13	0,5		87,8
	Control	4,13	4,13		0
Glifosato	<i>Pseudomona</i> spp.	4,68	3,2	0,71355915	31,6
	ACP1	4,68	2,3		50,8
	ACP2	4,68	3,7		20,9
	<i>Trichoderma harzianum</i>	4,68	3,9		16,6
	Control	4,68	4,68		0
Mix_3	<i>Pseudomona</i> spp.	13,21	5,79	0,42762912	56,1
	ACP1	13,21	5		62,1
	ACP2	13,21	5,17		60,8
	<i>Trichoderma harzianum</i>	13,21	5,84		55,7

Clorfenapir fue degradado en un 52%, lo que sugiere que el microorganismo evaluado no cuenta con algunos mecanismos enzimáticos necesarios para la degradación completa. Dada su relación con la neurotoxicidad, efectos gastrointestinales y leucoencefalopáticos, su persistencia es un riesgo potencial. A pesar de que se han reportado algunos microorganismos que degradan clorfenapir, la reducción observada puede incluir vías metabólicas, como oxigenasas, comúnmente encontradas en *Pseudomonas* spp. (Cheng et al., 2022; Schaeffer y Wijntjes, 2022; Sun et al., 2023; Wu et al., 2020; Yang et al., 2020).

La degradación de glifosato alcanzó solo 50% lo que es relativamente bajo dado el riesgo toxicológico a la salud humana y su documentada letalidad a plantas y animales en bajas concentraciones (Singh et al., 2024). Estos resultados son consistentes con estudios previos que muestran una degradación parcial del glifosato por *Pseudomonas* spp. y *Trichoderma harzianum* (Rafieenia et al., 2022; Singh et al., 2020).

En la mezcla de pesticidas, la degradación fue alta, alcanzando 62%, lo que sugiere un efecto de sinergia en la degradación. Esto se alinea con otros estudios que enfatizan la habilidad de especies de bacterias, hongos y actinomicetos en degradar las mezclas de pesticidas a través de vías metabólicas y enzimáticas (Bamdad et al., 2022; Raffa y Chiampo, 2021). En este estudio, las *Pseudomonas* spp. demostraron su capacidad de degradar contaminantes en diferentes ambientes. Otros géneros como *Flavobacterium*, *Achromobacterium*, *Sphingomonas*, *Arthrobacter* y *Bacillus*, también han mostrado resultados prometedores en la degradación de pesticidas (Esikova et al., 2023; Huang et al., 2023; Mustapha et al., 2019).

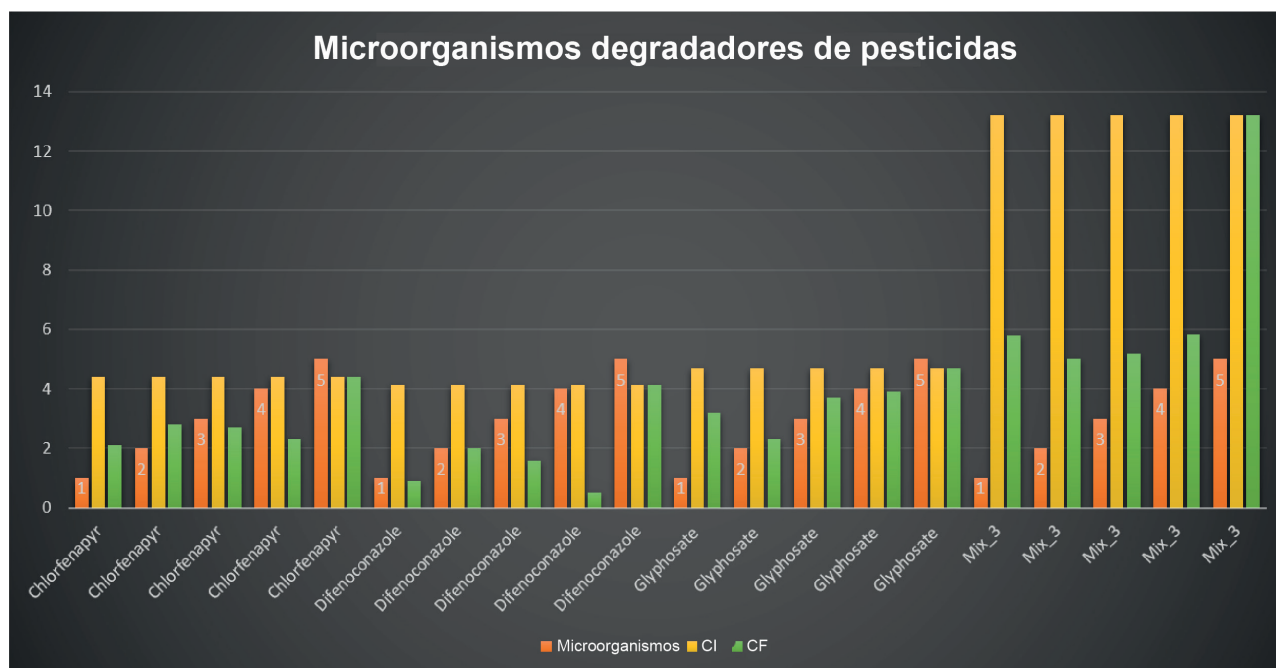


Figura 4. Degradación de pesticidas por acción microbiana.

Figure 4. Degradation of pesticides by microbial action.

Los actinomicetos, particularmente las cepas de *Streptomyces spp.* ACP1 y ACP2, también contribuyeron significativamente en la degradación. ACP1 fue más eficiente en degradar difenoconazol solo y en la mezcla, mientras que el ACP2 mostró una actividad notable desdoblando difenoconazol solo y clorfenapir en la mezcla. Estos resultados apoyaron previos descubrimientos donde los actinomicetos juegan un rol importante en la degradación de pesticidas y sulfonilureas, a través de mecanismos incluyendo el ciclo de nutrientes y descomposición de polímeros (Castrejón-Godínez et al., 2021; Das et al., 2021; Srinivasulu et al., 2024).

Hongos como *Trichoderma spp.* también han sido reportados por su potencial de biorremediación. En este estudio, *T. harzianum* degradó eficientemente clorfenapir y difenoconazol. Estos resultados se alinean con reportes recientes de *Trichoderma spp.* actuando como un hiperacumulador capaz de absorber metales pesados y degradar residuos de pesticidas en el suelo (Correa et al., 2021; Khazal y Suhail, 2022; Kunanbayev et al., 2019; Sun et al., 2020; Wang et al., 2024; Zin y Badaluddin, 2020). Interesantemente, mientras que la degradación de difenoconazol y clorfenapir fue alta, las concentraciones de glifosato en la mezcla incrementaron, posiblemente por el comportamiento hiperacumulador de *T. harzianum*. Los análisis estadísticos de las desviaciones estándar (Tabla 4) revelaron baja variabilidad entre los tratamientos, indicando una degradación de pesticidas consistente por las cepas microbianas en este estudio.

4. Conclusiones

La presencia de abundantes hongos y enterobacterias fitopatógenos indica baja calidad microbiológica en la mayoría de las muestras analizadas y su uso acarrea un riesgo potencial a la salud del suelo, cultivos y agri-cultores. Es recomendado llevar a cabo pretratamientos antes de su uso para la reducción de la presencia de patógenos.

Las pruebas de degradación de pesticidas usando cepas microbianas obtenidas del compost, identificadas como *Pseudomonas spp.* y *Streptomyces* (ACP1 y ACP2), demostraron su potencial como agentes de biorremediación para los residuos de glifosato, clorfenapir, y difenoconazol.

Adicionalmente, la cepa referencia, *Trichoderma harzianum*, fue efectiva para la degradación de pesticidas, confirmando su rol potencial en los procesos de biorremediación. Por eso, se recomienda enriquecer el compost con una concentración definida de esporas de hongos antes de su aplicación, para promover la actividad biológica, reducir la población de fitopatógenos y mejorar la composición de mecanismos beneficiosos que este hongo provee al suelo de los cultivos.

Reconocimientos

A la Cooperativa de Microempresarios de Productores y Transformadores Agropecuarios de Chimborazo «COMPYTA». A la Parroquia Eclesiástica San Óscar Arnulfo Romero de los Cantones Pallatanga, Alausí y Cumandá «SOAR». Al Comité Europeo para la Formación y la Agricultura (CEFA_Ecuador). A los ingenieros Alex Leguizamo (CEFA), Pamela Andrea Paula Alarcón, Alfonso Rigoberto Mancheno Mariño, Álvaro Mauricio Rivera Casignia y Fernando Romero Cañizares de FRN, ESPOCH. A los ingenieros Jimmy Romario Clemente Rivera y Talía Luzmila Barragán Rodríguez, de ESPOCH.

Contribución de los Autores

- Ana María Cunachi Pillajo: conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, recursos, supervisión, redacción – revisión y edición.
- Jimmy Romario Clemente Rivera: investigación, adquisición de fondos, metodología.
- Talía Luzmila Barragán Rodríguez: investigación, adquisición de fondos, metodología.

Implicaciones éticas

No es aplicable la aprobación ética.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen ningún vínculo con organizaciones que pudieran tener un interés financiero, directo o indirecto, en los resultados reportados en este trabajo.

Referencias

- Agu, K. C., y Chidozie, C. P. (2021). An improved slide culture technique for the microscopic identification of fungal species. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 6(1), 243-254. <https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd45058.pdf>
- Ahamad, A., y Kumar, J. (2023). Pyrethroid pesticides: An overview on classification, toxicological assessment and monitoring. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100284>
- Ahmad, K. S. (2020). Remedial potential of bacterial and fungal strains (*Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus flavus* and *Penicillium chrysogenum*) against organochlorine insecticide Endosulfan. *Folia microbiologica*, 65(5), 801-810. <https://doi.org/10.1007/s12223-020-00792-7>
- Ahmad, S., Ahmad, H. W., & Bhatt, P. (2022). Microbial adaptation and impact into the pesticide's degradation. *Archives of Microbiology*, 204(5), 288. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02899-6>
- Akyol, Ç., Ince, O., y Ince, B. (2019). Crop-based composting of lignocellulosic digestates: Focus on bacterial and fungal diversity. *Bioresource technology*, 288, 121549. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121549>
- Ameen, F., y Al-Homaidan, A. A. (2020). Compost inoculated with fungi from a mangrove habitat improved the growth and disease defense of vegetable plants. *Sustainability*, 13(1), 124. <https://doi.org/10.3390/su13010124>
- An, Y. Q., Dong, Y. L., Hao, S. N., Xiao, H., Tian, Y. P., y Gong, Y. (2024). Survival after chlorfenapyr intoxication by non-gastrointestinal route. *Clinical Toxicology*, 62(2), 134-135. <https://doi.org/10.1080/15563650.2024.2310748>
- Araujo, R. (2022). Advances in soil engineering: sustainable strategies for rhizosphere and bulk soil microbiome enrichment. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 27(6), 195. <https://doi.org/10.31083/j.fbl2706195>
- Ayed, F., Abdallah, R. A. B., Jabnoun-Khiareddine, H., y Daami-Remadi, M. (2021). Selection of compost-derived actinomycetes with plant-growth promoting and tomato stem rot biocontrol potentialities. *Journal*

- of *Phytopathology and Disease Management*, 8(1), 79-91. <https://core.ac.uk/download/483700402.pdf>
- Bamdad, H., Papari, S., Lazarovits, G., y Berruti, F. (2022). Soil amendments for sustainable agriculture: Microbial organic fertilizers. *Soil Use and Management*, 38(1), 94-120. <https://doi.org/10.1111/sum.12762>
- Bhimani, A. A., Bhimani, H. D., Vaghela, N. R., y Gohel, S. D. (2024). Cultivation methods, characterization, and biocatalytic potential of organic solid waste degrading bacteria isolated from sugarcane rhizospheric soil and compost. *Biologia*, 79(3), 953-974. <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01592-3>
- Boiu-Sicuia, O.-A., Stan, V., y Cornea, C. P. (2021). The compost, a source of plant beneficial bacteria with bio-control potential. *Current Trends in Natural Sciences*, 10(20), 32-38. <https://doi.org/10.47068/ctns.2021.v10i20.004>
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., y McDaniel, P. A. (2011). *Soil Genesis and Classification*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470960622>
- Buzón-Durán, L., Pérez-Lebeña, E., Martín-Gil, J., Sánchez-Báscones, M., y Martín-Ramos, P. (2020). Applications of *Streptomyces* spp. Enhanced Compost in Sustainable Agriculture. En M. Meghvansi y A. Varma (eds.), *Biology of Composts. Soil Biology* (Vol. 58, pp. 257-291). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39173-7_13
- Carpio, M. J., Sánchez-Martín, M. J., Rodríguez-Cruz, M. S., y Marín-Benito, J. M. (2021). Effect of organic residues on pesticide behavior in soils: a review of laboratory research. *Environments*, 8(4), 32. <https://doi.org/10.3390/environments8040032>
- Castrejón-Godínez, M. L., Tovar-Sánchez, E., Valencia-Cuevas, L., Rosas-Ramírez, M. E., Rodríguez, A., y Mussali-Galante, P. (2021). Glyphosate pollution treatment and microbial degradation alternatives, a review. *Microorganisms*, 9(11), 2322. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112322>
- Chen, L., Zhang, H., Jia, X., Fang, Y., y Lin, C. (2024). Soil fertility and bacterial community composition in response to the composting of biochar-amended chicken manure. *Agronomy*, 14(5), 886. <https://doi.org/10.3390/agronomy14050886>
- Cheng, M., Chen, D., Parales, R. E., y Jiang, J. (2022). Oxygenases as powerful weapons in the microbial degradation of pesticides. *Annual Review of Microbiology*, 76(1), 325-348. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-041320-091758>
- Chopkova, V., Petkova, M., y Shilev, S. (2023). Uncovering bacterial diversity during mesophilic and thermophilic phases of biowaste composting through next-generation sequencing. *Applied Sciences*, 13(5), 3111. <https://doi.org/10.3390/app13053111>
- Chorolque, A., Pellejero, G., Sosa, M. C., Palacios, J., Aschkar, G., García-Delgado, C., y Jiménez-Ballesta, R. (2021). Biological control of soil-borne phytopathogenic fungi through onion waste composting: implications for circular economy perspective. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(7), 6411-6420. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03561-2>
- Conde-Avila, V., Ortega-Martínez, L. D., Loera, O., el Kassis, E. G., Dávila, J. G., Valenzuela, C. M., y Armendáriz, B. P. (2021). Pesticides degradation by immobilised microorganisms. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 101(15), 2975-3005. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1715375>
- Correa, L. O., Bezerra, A. F. M., Honorato, L. R. S., Cortêz, A. C. A., Souza, J. V. B., y Souza, E. S. (2021). Amazonian soil fungi are efficient degraders of glyphosate herbicide; novel isolates of *Penicillium*, *Aspergillus*, and *Trichoderma*. *Brazilian Journal of Biology*, 83, e242830. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.242830>
- Ćwiartniewicz-Wojciechowska, M., Ślipko, K., Banach-Wisniewska, A., y Ziemińska-Buczyńska, A. (2023). Influence of the autochthonous cellulolytic bacteria on the domestic compost process improvement. *Bio-Technologia*, 104(1), 5-20. <https://doi.org/10.5114/bta.2023.125082>
- Danish, S. A., Haq, T., Liaqat, I., Rubab, S., Qureshi, M., y Zafar, U. (2021). *Succession and Catabolic Properties of Fungal Community During Composting of Fruit Waste at Sub-Tropical Environment*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-704507/v1>
- Dar, M. A., Shahnawaz, M., Hussain, K., Gupta, P., Sirwal, M. Y., Sadaqat, B., Gazal, S., Akhtar, R., Parihar, S., Zhu, D., Adetunji, C. O., Fardos, T., Parihar, J., Omrefosa, O. O., Xie, R., y Sun, J. (2023). Natural compounds for bioremediation and biodegradation of pesticides. En S. N. Meena, V. Nandre, K. Kodam, y R. S. Meena (eds.), *New Horizons in Natural Compound Research* (pp. 445-488). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15232-0.00015-1>
- Das, P., Singh, S. K., Singh, P., Zeyad, M. T., Aamir, M., y Upadhyay, R. S. (2021). Actinomycetes as biostimulants and their application in agricultural practices. En J. White, A. Kumar, y S. Droby (eds.), *Microbiome*

- stimulants for crops* (pp. 267-282). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822122-8.00021-2>
- de Corato, U. (2020). Disease-suppressive compost enhances natural soil suppressiveness against soil-borne plant pathogens: A critical review. *Rhizosphere*, 13, 100192. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100192>
- de Sousa, T., Hébraud, M., Dapkevicius, M. L. N. E., Maltez, L., Pereira, J. E., Capita, R., Alonso-Calleja, C., Igrejas, G., y Poeta, P. (2021). Genomic and metabolic characteristics of the pathogenicity in *Pseudomonas aeruginosa*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(23), 12892. <https://doi.org/10.3390/ijms222312892>
- Durán-Lara, E. F., Valderrama, A., y Marican, A. (2020). Natural organic compounds for application in organic farming. *Agriculture*, 10(2), 41. <https://doi.org/10.3390/agriculture10020041>
- Esikova, T. Z., Anokhina, T. O., Suzina, N. E., Shushkova, T. V., Wu, Y., y Solyanikova, I. P. (2023). Characterization of a new *Pseudomonas putida* strain Ch2, a degrader of toxic anthropogenic compounds epsilon-caprolactam and glyphosate. *Microorganisms*, 11(3), 650. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030650>
- Esimbekova, E. N., Kalyabina, V. P., Kopylova, K. v., Lonshakova-Mukina, V. I., Antashkevich, A. A., Torgashina, I. G., Lukyanenko, K. A., y Kratasyuk, V. A. (2022). The effects of commercial pesticide formulations on the function of in vitro and in vivo assay systems: A comparative analysis. *Chemosensors*, 10(8), 328. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080328>
- Esparza-Naranjo, S. B., da Silva, G. F., Duque-Castaño, D. C., Araújo, W. L., Peres, C. K., Boroski, M., y Bonugli-Santos, R. C. (2021). Potential for the biodegradation of atrazine using leaf litter fungi from a subtropical protection area. *Current Microbiology*, 78, 358-368. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02288-6>
- Fauriah, R., Amin, N., Daud, I. D., y Harsanti, E. S. (2021). The potential of endophytic fungi as biodegradation of chlorpyrifos in shallots. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 807(3), 032058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/3/032058>
- Fischer, G., y Dott, W. (2002). Quality assurance and good laboratory practice in the mycological laboratory – compilation of basic techniques for the identification of fungi. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 205(6), 433-442. <https://doi.org/10.1078/1438-4639-00190>
- Fuchs, B., Laihonon, M., Muola, A., Saikkonen, K., Dobrev, P. I., Vankova, R., y Helander, M. (2022). A glyphosate-based herbicide in soil differentially affects hormonal homeostasis and performance of non-target crop plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 787958. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.787958>
- Girard, L., Lood, C., Höfte, M., Vandamme, P., Rokni-Zadeh, H., van Noort, V., Lavigne, R., y de Mot, R. (2021). The ever-expanding pseudomonas genus: description of 43 new species and partition of the *Pseudomonas putida* group. *Microorganisms*, 9(8), 1766. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081766>
- Grgas, D., Rukavina, M., Bešlo, D., Štefanac, T., Crnek, V., Šikić, T., Habuda-Stanić, M., y Landeka Dragičević, T. (2023). The Bacterial Degradation of Lignin—A Review. *Water*, 15(7), 1272. <https://doi.org/10.3390/w15071272>
- Grigorova-Pesheva, B., Malcheva, B., y Peshev, a. (2024). Microbial community dynamics of compost mixtures after application of microbiological additive. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 67(1), 1. <https://www.agronomyjournal.usamv.ro/index.php/scientific-papers/current?id=1723>
- Guerrero Ramírez, J. R., Ibarra Muñoz, L. A., Balagurusamy, N., Frías Ramírez, J. E., Alfaro Hernández, L., y Carrillo Campos, J. (2023). Microbiology and Biochemistry of Pesticides Biodegradation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), 15969. <https://doi.org/10.3390/ijms242115969>
- Harrigan, W. F., y McCance, M. E. (2014). *Laboratory methods in microbiology*. Academic press.
- Hernández-Mesa, M., y Moreno-González, D. (2022). Current role of mass spectrometry in the determination of pesticide residues in food. *Separations*, 9(6), 148. <https://doi.org/10.3390/separations9060148>
- Huang, P., Yan, X., Yu, B., He, X., Lu, L., y Ren, Y. (2023). A comprehensive review of the current knowledge of chlorfenapyr: synthesis, mode of action, resistance, and environmental toxicology. *Molecules*, 28(22), 7673. <https://doi.org/10.3390/molecules28227673>
- Ibrahim, I. A. J., y Hameed, T. A. K. (2015). Isolation, characterization and antimicrobial resistance patterns of lactose-fermenter enterobacteriaceae isolates from clinical and environmental samples. *Open Journal of Medical Microbiology*, 5(04), 169-176. <http://dx.doi.org/10.4236/ojmm.2015.54021>
- Jakubus, M., y Michalak-Oparowska, W. (2022). Valorization of quality of vermicomposts and composts using various parameters. *Agriculture*, 12(2), 293. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020293>

- Jeong, D. K., Lee, H. J., Bae, J. Y., Jang, Y. S., Hong, S. M., y Kim, J. H. (2019). Chlorfenapyr residue in sweet persimmon from farm to table. *Journal of food protection*, 82(5), 810-814. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-18-503>
- Kannan, R., y Kallapiran, K. A. (2022). A Review on the Agricultural Waste Residues Management by Different Microbes. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 23(6), 93-113. <https://doi.org/10.9734/jaeri/2022/v23i6502>
- Khazal, S. S., y Suhail, F. M. (2022). Study of the analysis of microbial dusting pesticides caused by *Pseudomonas* bacteria and *Trichoderma* fungi. *International Journal of Mechanical Engineering*, 7(2), 1755-1315. [https://kalaharijournals.com/resources/FebV7_I2_375%20\(1\).pdf](https://kalaharijournals.com/resources/FebV7_I2_375%20(1).pdf)
- Kraut-Cohen, J., Zolti, A., Rotbart, N., Bar-Tal, A., Laor, Y., Medina, S., Shawahna, R., Saadi, I., Raviv, M., Green, S. J., Yermiyahu, U., y Minz, D. (2023). Short- and long-term effects of continuous compost amendment on soil microbiome community. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 21, 3280-3292. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.05.030>
- Kumar, R. R., y Jadeja, V. J. (2016). Isolation of Actinomycetes: A Complete Approach. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(5), 606-618. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2016.505.062>
- Kunanbayev, K., Churkina, G., Rukavitsina, I., Filippova, N., y Utebayev, M. (2019). Potential attractiveness of soil fungus *Trichoderma inhamatum* for biodegradation of the glyphosate herbicide. *Journal of Ecological Engineering*, 20(11), 240-245. <https://doi.org/10.12911/22998993/113580>
- Kurakov, A. V., y Bilanenko, E. N. (2023). Dynamics of mycobiota during composting of cow manure and straw. *Eurasian Soil Science*, 56(4), 453-469. <https://doi.org/10.1134/S1064229322602554>
- Lakshmanan, R., Kalaimurugan, D., Sivasankar, P., Arokiyaraj, S., y Venkatesan, S. (2020). Identification and characterization of *Pseudomonas aeruginosa* derived bacteriocin for industrial applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 2412-2418. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.126>
- Lau, Y. Y., Hernandez, E., Kristanti, R. A., Wijayanti, Y., y Emre, M. (2023). Exploring the potential of composting for bioremediation of pesticides in agricultural sector. *Industrial and Domestic Waste Management*, 3(1), 47-66. <https://doi.org/10.53623/idwm.v3i1.245>
- Leskovac, A., y Petrović, S. (2023). Pesticide use and degradation strategies: food safety, challenges and perspectives. *Foods*, 12(14), 2709. <https://doi.org/10.3390/foods12142709>
- Liu, F., Wang, Y., Chen, L., Bello, B. K., Zhang, T., Yang, H., Li, X., Pan, E., Feng, H., y Dong, J. (2022). Difenoconazole disrupts the blood-brain barrier and results in neurotoxicity in carp by inhibiting the Nrf2 pathway mediated ROS accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 244, 114081. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114081>
- Liu, G., Yang, Y., Ma, R., Jiang, J., Li, G., Wang, J., Wuyun, D., y Yuan, J. (2023). Thermophilic compost inoculating promoted the maturity and mature compost inoculating reduced the gaseous emissions during co-composting of kitchen waste and pig manure. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103427. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103427>
- Liu, Y., Cheng, D., Xue, J., Weaver, L., Wakelin, S. A., Feng, Y., y Li, Z. (2020). Changes in microbial community structure during pig manure composting and its relationship to the fate of antibiotics and antibiotic resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*, 389, 122082. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122082>
- Lv, Z., Tao, C., Zhang, J., Shen, Z., Wang, D., Wang, B., Liu, H., y Li, R. (2023). Moderately delayed maturation of composting promotes the reduction of guild-plant pathogenic fungi within vegetable waste. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3032959/v1>
- Maleki, M., Mostafaei, S., Mokhtarnejad, L., y Farzaneh, M. (2010). Characterization of *Pseudomonas fluorescens* strain CV6 isolated from cucumber rhizosphere in Varamin as a potential biocontrol agent. *Australian Journal of Crop Science*, 4(9), 676-683. https://www.cropj.com/maleki_4_9_2010_676_683.pdf
- Man, Y., Stenrød, M., Wu, C., Almvik, M., Holten, R., Clarke, J. L., Yuan, S., Wu, X., Xu, J., Dong, F., Zheng, Y., y Liu, X. (2021). Degradation of difenoconazole in water and soil: Kinetics, degradation pathways, transformation products identification and ecotoxicity assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 418, 126303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126303>
- Mashi, B. H. (2018). Antibiotic Susceptibility Patterns of *Pseudomonas* spp. Isolated from Soil Samples. *UMYU Journal of Microbiology Research (UJMR)*, 3(2), 27-31. <https://doi.org/10.47430/ujmr.1832.005>
- Matúš, P., Littera, P., Farkas, B., y Urík, M. (2023). Review on performance of *Aspergillus* and *Penicillium* species in biodegradation of organochlorine and organophosphorus pesticides. *Microorganisms*, 11(6),

1485. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061485>
- Mehta, J. S., y Jadeja, B. A. (2022). Biochemical and physiological characterization of actinomycetes isolated from rhizospheric regions in the soils of *Arachis hypogea* L. and *Gossypium herbaceum* L. near the Gir Wildlife Sanctuary. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 13(8), 267-273. <https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.S08.40>
- Meng, Q., Yang, W., Men, M., Bello, A., Xu, X., Xu, B., Deng, L., Jiang, X., Sheng, S., Wu, X., Han, Y., y Zhu, H. (2019). Microbial community succession and response to environmental variables during cow manure and corn straw composting. *Frontiers in Microbiology*, 10, 529. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00529>
- Midhat, M. S., y Abed, S. M. (2023). Isolation and identification of pathogenic species of the genus *Pseudomonas* and study of antibiotic resistance. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 23(1), 087-098. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2023.23.1.0144>
- Mohammad, A. O., Alkurtany, A. E., y Hassan, A. A. (2020). Evaluation of API 20E system in fluorescent *Pseudomonas* identification from button mushroom *Agaricus bisporus* cultivation casing soil. *Notulae Scientia Biologicae*, 12(2), 258-263. <http://dx.doi.org/10.15835/nsb12210628>
- Mohapatra, D., Rath, S. K., y Mohapatra, P. K. (2022). Soil fungi for bioremediation of pesticide toxicants: A perspective. *Geomicrobiology Journal*, 39(3-5), 352-372. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.2019855>
- Mustapha, M. U., Halimoon, N., Johar, W. L. W., y Abd Shukor, M. Y. (2019). An overview on biodegradation of carbamate pesticides by soil bacteria. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 27(2), 547-563. <http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/68692/>
- Naeem, U., Afzaal, M., Haq, I. ul, Qazi, A., Naeem, A., y Mahfooz, Y. (2022). *A Comparative Role of Competent Microbes for Value-added Composting of Agricultural Waste*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2087247/v1>
- Narsing Rao, M. P., y Li, W. J. (2022). Diversity of *Actinobacteria* in various habitats. En L. Karthik (ed.), *Actinobacteria: Microbiology to Synthetic Biology* (pp. 37-58). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-5835-8>. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5835-8_2
- Nazari, M. T., Machado, B. S., Marchezi, G., Crestani, L., Ferrari, V., Colla, L. M., y Piccin, J. S. (2022). Use of soil actinomycetes for pharmaceutical, food, agricultural, and environmental purposes. *3 Biotech*, 12(9), 232. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03307-y>
- Nazem Shirazi, M. H., Soltani Majd, N., y Khodayari, M. (2023). Molecular and Biochemical Characterization of *Pseudomonas aeruginosa* Isolated from a Turkey Flock. *Journal of Poultry Sciences and Avian Diseases*, 1(2), 42-46. <https://doi.org/10.61838/kman.jpasad.1.2.6>
- O'hara, C. M. (2005). Manual and automated instrumentation for identification of Enterobacteriaceae and other aerobic gram-negative bacilli. *Clinical microbiology reviews*, 18(1), 147-162. <https://doi.org/10.1128/cmr.18.1.147-162.2005>
- Oyedoh, O. P., Yang, W., Dhanasekaran, D., Santoyo, G., Glick, B. R., y Babalola, O. O. (2023). Rare rhizo-Actinomycetes: A new source of agroactive metabolites. *Biotechnology Advances*, 67, 108205. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108205>
- Palaniveloo, K., Amran, M. A., Norhashim, N. A., Mohamad-Fauzi, N., Peng-Hui, F., Hui-Wen, L., Kai-Lin, Y., Jiale, L., Chian-Yee, M. G., Jing-Yi, L., Gunasekaran, B., y Razak, S. A. (2020). Food Waste Composting and Microbial Community Structure Profiling. *Processes*, 8(6), 723. <https://doi.org/10.3390/pr8060723>
- Pant, R., Tiwari, K., Singh, A., Srivastava, S., Patrick, N., y Gupta, A. (2022). Screening, Isolation and characterization of Soil microbes at the banks of the Song River. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 12(1), 141-148. https://bepls.com/dec_2022/20.pdf
- Parra-Arroyo, L., González-González, R. B., Castillo-Zacarias, C., Melchor Martínez, E. M., Sosa-Hernández, J. E., Bilal, M., Iqbal, H. M. N., Barceló, D., y Parra-Saldívar, R. (2022). Highly hazardous pesticides and related pollutants: Toxicological, regulatory, and analytical aspects. *Science of The Total Environment*, 807, 151879. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151879>
- Peillex, C., y Pelletier, M. (2020). The impact and toxicity of glyphosate and glyphosate-based herbicides on health and immunity. *Journal of immunotoxicology*, 17(1), 163-174. <https://doi.org/10.1080/1547691X.2020.1804492>
- Pérez-Corral, D. A., Ornelas-Paz, J. de J., Olivas-Orozco, G. I., Acosta-Muñiz, C. H., Salas-Marina, M. Á., Berlanga-Reyes, D. I., Ruiz-Cisneros, M. F., y Rios-Velasco, C. (2022). Molecular, morphological and

- biochemical characterization of actinomycetes and their antagonistic activity against phytopathogenic fungi. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(1), 103. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.1.103>
- Pizzul, L., Castillo, M. D. P., y Stenström, J. (2009). Degradation of glyphosate and other pesticides by ligninolytic enzymes. *Biodegradation*, 20, 751-759. <https://doi.org/10.1007/s10532-009-9263-1>
- Qin, G., Chen, Y., He, F., Yang, B., Zou, K., Shen, N., Zuo, B., Liu, R., Zhang, W., y Li, Y. (2021). Risk assessment of fungicide pesticide residues in vegetables and fruits in the mid-western region of China. *Journal of Food Composition and Analysis*, 95, 103663. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103663>
- Raffa, C. M., y Chiampo, F. (2021). Bioremediation of agricultural soils polluted with pesticides: A review. *Bioengineering*, 8(7), 92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8070092>
- Rafieenia, R., Mahmoud, M., El-Gohary, F., y Rossa, C. A. (2022). The degradation of glyphosate is enhanced in a microbial fuel cell: Electrochemical performance, degradation efficiency, and analysis of the anodic microbial community. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, 102805. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102805>
- Randika, J. L. P. C., Bandara, P. K. G. S. S., Soysa, H. S. M., Ruwandeepika, H. A. D., y Gunatilake, S. K. (2022). Bioremediation of pesticide-contaminated soil: a review on indispensable role of soil bacteria. *Journal of Agricultural Sciences – Sri Lanka*, 17(1), 19-43. <https://doi.org/10.4038/jas.v17i1.9609>
- Rasool, S., Rasool, T., y Gani, K. M. (2022). A review of interactions of pesticides within various interfaces of intrinsic and organic residue amended soil environment. *Chemical Engineering Journal Advances*, 11, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100301>
- Rastogi, M., Nandal, M., y Khosla, B. (2020). Microbes as vital additives for solid waste composting. *Heliyon*, 6(2), e03343. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03343>
- Riedo, J., Wächter, D., Gubler, A., Wettstein, F. E., Meuli, R. G., y Bucheli, T. D. (2023). Pesticide residues in agricultural soils in light of their on-farm application history. *Environmental Pollution*, 331, 121892. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121892>
- Rigolin, F. R., Leite, C. A., Birolli, W. G., Porto, A. L., y Selegim, M. H. (2024). Biodegradation of the pyrethroid pesticide gamma-cyhalothrin by fungi from a Brazilian cave. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 35, e-20240026. <https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20240026>
- Rodríguez, A., Castrejón-Godínez, M. L., Salazar-Bustamante, E., Gama-Martínez, Y., Sánchez-Salinas, E., Mussali-Galante, P., Tovar-Sánchez, E., y Ortiz-Hernández, Ma. L. (2020). Omics Approaches to Pesticide Biodegradation. *Current Microbiology*, 77(4), 545–563. <https://doi.org/10.1007/s00284-020-01916-5>
- Rodríguez, C. A., Gavilánez, T. C., Chamorro, J. P., Vinueza, A. G., Salazar, D. M., y Arancibia, M. Y. (2018). Selective Isolation and Phenotypic Characterization of Bacteria and Actinomycetes from Oil-contaminated Soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 151, 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/012039>
- Rodríguez-Fonseca, M. F., Sánchez-Suárez, J., Valero, M. F., Ruiz-Balaguera, S., y Díaz, L. E. (2021). *Streptomyces* as potential synthetic polymer degraders: A systematic review. *Bioengineering*, 8(11), 154. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8110154>
- Rossi, F., Carles, L., Donnadieu, F., Batisson, I., y Artigas, J. (2021). Glyphosate-degrading behavior of five bacterial strains isolated from stream biofilms. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126651. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126651>
- Ruiz-Hernandez, I. H., Madrigal-Perez, L. A., y González-Hernández, J. C. (2024). The potential use of *Pseudomonas* in terrestrial and space agriculture. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.282664>
- Ruomeng, B., Meihao, O., Siru, Z., Shichen, G., Yixian, Z., Junhong, C., Ruijie, M., Yuan, L., Gezhi, X., Xingyu, C., Shiyi, Z., Aihui, Z., y Baishan, F. (2023). Degradation strategies of pesticide residue: From chemicals to synthetic biology. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 8(2), 302-313. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2023.03.005>
- Salazar Calvo, C., Moya García, A., González Venegas, J. P., Rodríguez Díaz, H., y Corrales Valverde, D. (2020). Comparación de dos métodos de muestreo para el análisis de fertilidad de suelos. *Alcances Tecnológicos*, 13(1), 31-39. <https://doi.org/10.35486/at.v13i1.168>
- Salem, G. S., Baiu, S. H., y Ali, A. A. (2023). Isolation, examination and characterization of actinomycetes as a source of antimicrobial agents from Libyan soil. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 14(6), 322-336. <https://doi.org/10.4236/abb.2023.146020>
- Sapkota, A., Thapa, A., Budhathoki, A., Sainju, M., Shrestha, P., y Aryal, S. (2020). Isolation, Characterization,

- and Screening of Antimicrobial-Producing Actinomycetes from Soil Samples. *International Journal of Microbiology*, 2020, 2716584. <https://doi.org/10.1155/2020/2716584>
- Schaeffer, A., y Wijntjes, C. (2022). Changed degradation behavior of pesticides when present in mixtures. *Eco-Environment & Health*, 1(1), 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.02.002>
- Shahid, M., Manoharadas, S., Altaf, M., y Alrefaei, A. F. (2021). Organochlorine pesticides negatively influenced the cellular growth, morphostructure, cell viability, and biofilm-formation and phosphate-solubilization activities of *Enterobacter cloacae* strain EAM 35. *ACS omega*, 6(8), 5548-5559. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05931>
- Shalaby, A. A., Rahman, A. E., y Shalaby, M. A. (2022). Study of Imidacloprid, Azoxystrobin and Difenconazole Residues and their Biochemical effects on Cucumber. *Journal of Plant Protection and Pathology*, 13(7), 161-167. <https://dx.doi.org/10.21608/jppp.2022.148665.1085>
- Sharma, I. (2021). Phytopathogenic fungi and their biocontrol applications. En *Fungi Bio-Prospects in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-Technology* (pp. 155-188). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821394-0.00007-X>
- Singh, B., Bhadu, A., Sharma, J., Ali, O., Neogi, S., Gunri, S. K., y Roy, D. (2022). Effect of microbes in enhancing the composting process: a review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 34(23), 630-641. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i232469>
- Singh, R., Shukla, A., Kaur, G., Girdhar, M., Malik, T., y Mohan, A. (2024). Systemic analysis of glyphosate impact on environment and human health. *ACS Omega*, 9(6), 6165-6183. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08080>
- Singh, S., Kumar, V., Gill, J. P. K., Datta, S., Singh, S., Dhaka, V., Kapoor, D., Wani, A. B., Dhanjal, D. S., Kumar, M., Harikumar, S. L., y Singh, J. (2020). Herbicide glyphosate: Toxicity and microbial degradation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7519. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207519>
- Singh, T. B., Ali, A., Prasad, M., Yadav, A., Shrivastav, P., Goyal, D., y Dantu, P. K. (2020b). Role of organic fertilizers in improving soil fertility. En M. Naeem, A. A. Ansari, y S. S. Gill (eds.), *Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management* (pp. 61-77). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_3
- Singh, Y. P., Arora, S., Mishra, V. K., Gupta, R. H., y Mishra, S. J. (2023). Changes in physicochemical and microbial properties during standardization of on-farm composting of municipal solid waste. *Journal of Natural Resource Conservation and Management*, 4(1), 40-49. <https://10.51396/ANRCM.4.1.2023.40-49>
- Srinivasulu, M., Maddela, N. R., Chandra, M. S., Shankar, P. C., Rangaswamy, V., y Prasad, R. (2024). Microbe-pesticide interactions: Soil enzyme analysis and bacterial degradation of chlorpyrifos. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.05.004>
- Sun, J., Karupiah, V., y Chen, J. (2020). The mechanism of heavy metal absorption and biodegradation of organophosphorus pesticides by *Trichoderma*. En V. K. Gupta, S. Zeilinger, H. B. Singh, y I. Druzhinina (eds.), *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 303-318). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819453-9.00014-3>
- Sun, M., Yi, X., Tong, Z., Dong, X., Chu, Y., Meng, D., y Duan, J. (2023). Residual behavior and dietary risk assessment of chlorfenapyr and its metabolites in radish. *Molecules*, 28(2), 580. <https://doi.org/10.3390/molecules28020580>
- Tawfik Ali ElHaty, M., Ibrahim, M., y Mansour, M. (2022). Effectiveness of pesticides on soil fungal Biota and role of these fungi in bioremediation of pesticides residues. *Alfarama Journal of Basic & Applied Sciences*, 3(2), 239-252. <https://doi.org/10.21608/ajbas.2022.118868.1086>
- Torres-Rodriguez, J. A., Reyes-Pérez, J. J., Quiñones-Aguilar, E. E., y Hernandez-Montiel, L. G. (2022). Actinomycete potential as biocontrol agent of phytopathogenic fungi: mechanisms, source, and applications. *Plants*, 11(23), 3201. <https://doi.org/10.3390/plants11233201>
- Valle, A. L., Mello, F. C. C., Alves-Balvedi, R. P., Rodrigues, L. P., y Goulart, L. R. (2019). Glyphosate detection: methods, needs and challenges. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 291-317. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0789-5>
- Van Gijn, K., Chen, Y. L., Van Oudheusden, B., Gong, S., De Wilt, H. A., Rijnaarts, H. H. M., y Langenhoff, A. A. M. (2021). Optimizing biological effluent organic matter removal for subsequent micropollutant removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106247. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106247>

- Wang, K., Sun, D. W., Pu, H., y Wei, Q. (2019). Surface-enhanced Raman scattering of core-shell Au@ Ag nanoparticles aggregates for rapid detection of difenoconazole in grapes. *Talanta*, 191, 449-456. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.08.005>
- Wang, W., Peng, G., Sun, Y., y Chen, X. (2024). Increasing the tolerance of *Trichoderma harzianum* T-22 to DMI fungicides enables the combined utilization of biological and chemical control strategies against plant diseases. *Biological Control*, 192, 105479. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105479>
- Wellington, E. M. H., y Toth, I. K. (1994). Actinomycetes. En R. W. Weaver, S. Angle, P. Bottomley, D. Bez-dicek, S. Smith, A. Tabatabai y A. Wollum (eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2 Microbiological and Biochemical Properties*, 5 (pp. 269-290). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c15>
- Williams, S. T., y Cross, T. (1971). Chapter XI actinomycetes. En *Methods in microbiology* (pp. 295-334). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0580-9517\(09\)70016-9](https://doi.org/10.1016/S0580-9517(09)70016-9)
- Wu, P., Zhao, R., Zhang, X., Niu, T., Cao, B., Zhu, F., Li, N., Zhang, Y., Wu, Y., y Wang, Y. (2020). Rhodopseudomonas capsulata enhances cleaning of chlorfenapyr from environment. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120271>
- Xu, C., Cui, D., Lv, X., Zhong, G., y Liu, J. (2023). Heterogeneous distribution of carbofuran shaped by Pseudomonas stutzeri biofilms enhances biodegradation of agrochemicals. *Environmental Research*, 229, 115894. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115894>
- Xu, J., Smith, S., Smith, G., Wang, W., y Li, Y. (2019). Glyphosate contamination in grains and foods: An overview. *Food Control*, 106, 106710. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713519302919>
- Xu, P., Shu, L., Yang, Y., Kumar, S., Tripathi, P., Mishra, S., Qiu, C., Li, Y., Wu, Y., y Yang, Z. (2024). Microbial agents obtained from tomato straw composting effectively promote tomato straw compost maturation and improve compost quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 270, 115884. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115884>
- Yang, J., Luo, F., Zhou, L., Sun, H., Yu, H., Wang, X., Zhang, X., Yang, M., Lou, Z., y Chen, Z. (2020). Residue reduction and risk evaluation of chlorfenapyr residue in tea planting, tea processing, and tea brewing. *Science of The Total Environment*, 738, 139613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139613>
- Zhan, Y., Chang, Y., Tao, Y., Zhang, H., Lin, Y., Deng, J., Ma, T., Ding, G., Wei, Y., y Li, J. (2022). Insight into the dynamic microbial community and core bacteria in composting from different sources by advanced bioinformatics methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 8956-8966. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20388-7>
- Zhang, J., Shen, C., Shang, T. H., y Liu, J. L. (2022). Difference responses of soil fungal communities to cattle and chicken manure composting application. *Journal of Applied Microbiology*, 133(2), 323-339. <https://doi.org/10.1111/jam.15549>
- Zhao, X., Wei, Y., Fan, Y., Zhang, F., Tan, W., He, X., y Xi, B. (2018). Roles of bacterial community in the transformation of dissolved organic matter for the stability and safety of material during sludge composting. *Bioresource technology*, 267, 378-385. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.060>
- Zin, N. A., y Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.09.003>