

## Caracterización de Microorganismos con Potencial Biotecnológico Aislados en Suelos Agrícolas Abonados de Forma Química y Orgánica Characterization of Microorganisms with Biotechnological Potential Isolated from Chemically and Organically Fertilized Agricultural Soils

Fernando Abasolo-Pacheco<sup>2</sup> , Delia Gellibert-Coime<sup>1</sup> ,  
Brayan Llumiluisa-Tapuy<sup>1</sup> , Cristóbal Manzaba-López<sup>1</sup> ,  
Cristhian John Macías-Holguín<sup>1</sup>  y Yarelys Ferrer-Sánchez<sup>3†</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Facultad de Posgrado, <sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, <sup>3</sup> Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Av. Quito, km 1.5 Vía a Santo Domingo. 120150 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (D.G.C.), (B.LI.T.), (C.M.L.), (C.J.M.H.), (F.A.P.), (Y.F.S.).  
† Autora para correspondencia: yferrer@uteq.edu.ec

### RESUMEN

La degradación de los suelos agrícolas es un problema global que afecta negativamente la productividad. Los microorganismos con potencial biotecnológico desempeñan roles cruciales en la remediación de suelos contaminados. La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de Microbiología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo con el objetivo de caracterizar microorganismos con potencial biotecnológico aislados de suelos agrícolas abonados con fertilizantes químicos y orgánicos bajo condiciones controladas. Se implementó un diseño completamente al azar. Las variables evaluadas fueron pH, unidades formadoras de colonias (UFC) ml<sup>-1</sup> y densidad óptica, longitud del hipocótilo, índice de vigor, porcentaje e índice de germinación. Los resultados indican que las cepas de suelos contaminados tienen una carga mayor de 7.40×10<sup>6</sup> a 2.58×10<sup>8</sup> UFC g<sup>-1</sup>. La cepa Mo-7 mostró tolerancia a sulfato de aluminio y actividad de solubilización de fosfato, y MQ-6 elevada capacidad para solubilizar urea, fosfato y tolerancia al Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Ante la turbidez con pendimetalina, MQ-6 alcanzó la mayor densidad óptica a las 72 horas (2.03). En el análisis de pH en presencia de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, MQ-6 fue mayor (8.11). En el crecimiento celular ante Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, la MQ-6 mantuvo 8.80E+10 UFC ml<sup>-1</sup>. La fitotoxicidad *in vitro* con pendimetalina y Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> en semillas de *Oryza sativa*, MQ-6 logró un 100% de germinación, longitud de raíz 6.83 cm y un índice de vigor de 82.50. Con Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, MQ-6 obtuvo un 100% de germinación, longitud de hipocótilo 23.50 cm y el índice de vigor alto (303.00). Estas cepas demostraron su potencial para biotransformar moléculas tóxicas para el suelo y así promover la sostenibilidad agrícola mediante el proceso de biorremediación.

**Palabras clave:** contaminación de suelos, herbicidas, plaguicidas, remediación, solubilización.

### SUMMARY

Agricultural soil degradation is a global issue that negatively impacts productivity. Microorganisms with biotechnological potential play crucial roles in the remediation of contaminated soils and the enhancement of soil fertility. The research was conducted in the Microbiology laboratory of the Universidad Técnica Estatal de Quevedo with the objective of characterizing microorganisms with biotechnological potential isolated from agricultural soils fertilized with chemical and organic fertilizers under controlled conditions. The variables evaluated were pH, colony forming units (CFU) ml<sup>-1</sup>, and optical density, hypocotyl length, vigor index, germination percentage and germination index. The results indicate that strains isolated from contaminated



#### Cita recomendada:

Abasolo-Pacheco, F., Gellibert-Coime, D., Llumiluisa-Tapuy, B., Manzaba-López, C., Macías-Holguín, C. J., & Ferrer-Sánchez, Y. (2025). Characterization of Microorganisms with Biotechnological Potential Isolated from Chemically and Organically Fertilized Agricultural Soils. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-15. e2233. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2233>

Recibido: 25 de febrero de 2025.

Aceptado: 27 de abril de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Mayo de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Fernando Abasolo Pacheco



**Copyright:** © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

soil exhibit a higher microbial load, ranging from  $7.40 \times 10^6$  to  $2.58 \times 10^8$  CFU g<sup>-1</sup>. Strain Mo-7 showed tolerance to aluminum sulfate and phosphate solubilization activity, and MQ-6 showed high capacity to solubilize urea, phosphate and tolerance to  $Al_2(SO_4)_3$ . Turbidity with pendimetalin, MQ-6 reached the highest optical density at 72 hours (2.03). The pH analysis in the presence of  $Al_2(SO_4)_3$ , MQ-6 was higher (8.11). In cell concentration with  $Al_2(SO_4)_3$ , MQ-6 maintained  $8.80E+10$  CFU ml<sup>-1</sup>. *In vitro* phytotoxicity with pendimetalin and  $Al_2(SO_4)_3$  on *Oryza sativa* seeds, MQ-6 achieved 100% germination, root length 6.83 cm and vigor index of 82.50. With  $Al_2(SO_4)_3$ , MQ-6 achieved 100% germination, hypocotyl length 23.50 cm and high vigor index (303.00). These strains demonstrated their potential to biotransform soil-toxic molecules thereby promoting agricultural sustainability through bioremediation processes.

**Index words:** soil contamination, herbicides, pesticides, remediation, solubilisation.

## INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos agrícolas es un problema global que afecta la productividad y la sostenibilidad en la agricultura (Acevedo, Sánchez y Mendoza, 2021). Los fertilizantes químicos y los plaguicidas, aunque esenciales para incrementar la producción agrícola, han contribuido significativamente a la degradación del suelo (Febles-González, Febles, Amaral, Zonta y Maura, 2020). El uso excesivo de estos productos resulta en la contaminación del suelo, la pérdida de biodiversidad microbiana y la disminución de la fertilidad (Angel, Lopez, Granda y Usuga, 2020). Los plaguicidas pueden acumularse y persistir en el ambiente, afectando no solo a las plagas, sino también a organismos no objetivos (Gómez-Beltrán, Cano y Villar, 2021), incluidos microorganismos benéficos del suelo (Estremadoyro, 2022). Estos cambios disminuyen la estructura del suelo y su capacidad para retener agua y nutrientes, así como a la proliferación de patógenos resistentes (Canchola *et al.*, 2021).

Particularmente, la pendimetalina es un herbicida que puede afectar diversos géneros de microorganismos en el suelo, especialmente aquellos que desempeñan roles críticos en la fertilidad y salud de este. Por ejemplo, las bacterias fijadoras de nitrógeno del género *Rhizobium* son esenciales para la conversión del nitrógeno atmosférico en formas utilizables por las plantas (Bhardwaj, Reddy, Nath y Dubey, 2024). La pendimetalina puede reducir las poblaciones de *Rhizobium*, disminuyendo la disponibilidad de nitrógeno en el suelo y afectando negativamente el crecimiento de las plantas leguminosas que dependen de estas bacterias para su nutrición (Saygılı, Kadioğlu, Belgüzar y Yanar, 2024).

Los hongos micorrízicos arbusculares del género *Glomus* también son afectados. Estos forman asociaciones simbióticas con las raíces de muchas plantas, mejorando la absorción de nutrientes, particularmente fósforo, y ayudando a las plantas a resistir condiciones de estrés (Dennis *et al.*, 2023). La aplicación de pendimetalina puede disminuir la abundancia de *Glomus* en el suelo, lo que puede llevar a una menor eficiencia en la absorción de nutrientes y, por lo tanto, a un crecimiento más débil de las plantas (Paul, Ammayappan, Srinivasan y Vendan, 2023).

Además, otros géneros de microorganismos como *Pseudomonas* y *Bacillus*, que son conocidos por su papel en la descomposición de materia orgánica y en la promoción del crecimiento vegetal a través de la producción de fitohormonas y la supresión de patógenos, también pueden ser afectados por la pendimetalina (Singh, Walvekar y Sharma, 2020). La reducción de estas bacterias beneficiosas puede alterar el equilibrio ecológico del suelo, afectando su capacidad para sostener cultivos saludables y productivos (Rathod, Bhalerao, Margal y Kamble, 2021).

Otro compuesto ampliamente empleado en la agricultura es el sulfato de aluminio, que se usa para ajustar el pH del suelo, haciéndolo más ácido (De Garcia-Fernandez *et al.*, 2023), lo cual es beneficioso para el crecimiento de ciertos cultivos que prefieren suelos ácidos, como los arándanos y las azaleas. Este cambio en la acidez del suelo puede afectar la composición y actividad de las comunidades microbianas, ya que muchos microorganismos tienen rangos de pH específicos en los que prosperan (Carreón-Abud y Gavito, 2021).

Algunos géneros de bacterias beneficiosas, como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, que son esenciales para el ciclo del nitrógeno, pueden verse afectadas negativamente por la acidificación del suelo inducida por el sulfato de aluminio (Varghese *et al.*, 2022). Estas bacterias desempeñan un papel crucial en la conversión de amoníaco a nitrato, una forma de nitrógeno que las plantas pueden absorber fácilmente. La reducción de la actividad de estas bacterias puede llevar a una menor disponibilidad de nitrógeno en el suelo, afectando el crecimiento y desarrollo de las plantas (Li *et al.*, 2022).

Además, la acidificación del suelo puede favorecer el crecimiento de hongos acidófilos y bacterias que toleran o prefieren ambientes ácidos, como algunos miembros del género *Fusarium* y *Pseudomonas acidophila*. Estos cambios en la comunidad microbiana pueden alterar el equilibrio ecológico del suelo y afectar la descomposición de materia orgánica, la liberación de nutrientes y la supresión de patógenos del suelo (Dai et al., 2023).

Ante esta situación, la caracterización de microorganismos con potencial biotecnológico presentes en suelos agrícolas es de gran importancia. Estos microorganismos pueden desempeñar roles cruciales en la mejora de la salud del suelo, la promoción del crecimiento de las plantas y la remediación de suelos contaminados (González-Hernández y Flores, 2022). Transforman compuestos tóxicos en productos menos dañinos o inofensivos, ayudando a mitigar los efectos negativos de la contaminación agrícola (Suarez y Riaño, 2022).

Diversos estudios han identificado y caracterizado microorganismos con capacidades de remediación del suelo y degradación de sustancias tóxicas. Hkudaygulov, Chetverikova, Bakaeva, Kenjieva, Chetverikov (2022) identificaron cepas de *Pseudomonas fluorescens* con capacidad para degradar plaguicidas organofosforados en suelos agrícolas. Estas cepas degradaron los plaguicidas y promovieron el crecimiento de plantas de tomate. Otro estudio de Srinivasulu et al. (2024) evaluó la capacidad de diversas cepas bacterianas para degradar herbicidas en suelos contaminados. Encontraron que *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas putida* eran eficaces en la degradación de atrazina, reduciendo significativamente la concentración de atrazina en el suelo y promoviendo el crecimiento de plantas. Recientemente, Gupta, Khan, Alqahtani, Hashem y Ahmad (2024) exploraron la comunidad microbiana en suelos tratados con fertilizantes orgánicos y químicos e identificaron que los suelos tratados con fertilizantes orgánicos tenían una mayor diversidad microbiana y una mayor presencia de microorganismos con capacidades de biorremediación, como especies de *Rhizobium* y *Azospirillum*.

Aun cuando existen antecedentes que apoyan la importancia de ciertos microorganismos para la degradación de contaminantes, se requieren más estudios y de mayor profundidad para caracterizar microorganismos con potencial biotecnológico. Es por ello que en la presente investigación se caracterizan microorganismos presentes en suelos sujetos a prácticas de manejo agrícola de tipo químico y orgánico, para así determinar cuáles se adaptan a estos compuestos. Se hace hincapié en la microbiota que presenta la capacidad de biodegradar contaminantes agroquímicos mediante la liberación de metabolitos secundarios. Adicionalmente, los resultados generados en el presente estudio proporcionan información crucial para el desarrollo de estrategias de manejo agrícola que promuevan la restauración de la calidad del suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización

Los trabajos experimentales fueron realizados en el laboratorio de Microbiología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), ubicado en el km 6.5 vía Quevedo - El Empalme, cantón Mocache, provincia Los Ríos, Ecuador (01° 04' 48.6" S, 79° 32' 42" O), a una altitud de 66 metros.

### Diseño Experimental

Para establecer el grado de protección de las bacterias, se implementó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con seis tratamientos y tres repeticiones, cada una compuesta por tres unidades experimentales. Para evaluar las modificaciones de pH, se utilizó un DCA con siete tratamientos y tres repeticiones, cada una compuesta por tres unidades experimentales. Para evaluar el efecto bioestimulante y de biorremediación sobre el proceso de germinación, se llevó a cabo un Diseño Completamente al Azar (DCA con seis tratamientos y tres repeticiones, cada una compuesta por tres unidades experimentales).

### Aislamiento e Identificación de Bacterias de Suelos con Tratamiento Orgánico y Químico

Se recolectaron dos muestras de suelo con tratamiento orgánico (400 g) y suelos con tratamiento químico (400 g) en una zona de cultivos bananeros del cantón Rocafuerte, provincia Manabí, Ecuador. Cada muestra estuvo compuesta de cuatro submuestras de 100 g cada una, tomadas al azar recorriendo el terreno en zig-zag. Las muestras permanecieron almacenadas en fundas Ziploc dentro de una hielera para su transporte al laboratorio.

Para evaluar la carga bacteriana total en cada muestra de suelo (Unidades Formadoras de Colonias: UFC g<sup>-1</sup>), se utilizó la metodología de recuento en placa, que consiste en realizar diluciones seriadas 1:10 y extender 100 µL de cada dilución en una placa. Las placas se incubaron hasta que las colonias fueron apreciables para su recuento (Santana-Flores et al., 2020). Después de 24-48 h, se determinó el número total de UFC por conteo directo utilizando un contador de colonias.

Los aislados obtenidos fueron evaluados por caracteres morfológicos de la colonia: circular, puntiforme, irregular y fusiforme; borde de la colonia: entera, ondulada, lobulada y filamentosa; y elevación de la colonia: plana, convexa y elevada. Se realizó un análisis bioquímico de catalasa, solubilización de urea y fósforo, y tinción Gram (Barua, Kolman, Aguila, Zapata y Alvarenga, 2021). Además, se analizó el grado de tolerancia de las bacterias con potencial para biorremediación en un medio de cultivo King B suplementado con 500 mg L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio y 250 mg L<sup>-1</sup> de pendimentalina (Estrada-Gamboa, Umaña, Sancho y Orozco, 2023).

### **Adaptabilidad de las Bacterias a Sulfato de Aluminio y Pendimentalina a nivel *in vitro***

Las bacterias seleccionadas se inocularon de forma individual en matraces Erlenmeyer de 50 mL con medio de cultivo King B líquido, compuesto por peptona (10 g L<sup>-1</sup>), sulfato de magnesio (1.5 g L<sup>-1</sup>), fosfato dipotásico (1.5 g L<sup>-1</sup>) y glicerina (15 mL L<sup>-1</sup>). Este medio se enriqueció con 500 mg L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> y 250 mg L<sup>-1</sup> de pendimentalina por separado (Vilchez-Chávez, Flores, Calderón, Palma y Zavaleta, 2024). Las muestras se incubaron a 28 °C con agitación constante a 150 rpm y fueron analizadas a las 24, 48 y 72 h.

Posteriormente, se evaluaron tres variables clave: pH, unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC mL<sup>-1</sup>), determinada mediante el método de recuento en placa por siembra en superficie; y la absorbancia a 600 nm. Cada una de estas mediciones se realizó en triplicado para asegurar la precisión y reproducibilidad de los resultados. El pH se midió a través de un pH-metro. Las UFC mL<sup>-1</sup> y la densidad óptica se determinaron con un contador de colonias. Además, se utilizó un espectrofotómetro para medir la densidad óptica a 600 nm. Esta medición proporciona una estimación indirecta de la concentración celular en la muestra.

### **Efecto de las Bacterias sobre el Proceso Germinativo de *Oryza sativa***

Se desarrollaron bioensayos con semillas de arroz (*Oryza sativa* L.) con el material genético SUPREMA I-1480 para determinar el efecto bioestimulante de las bacterias. Las semillas se limpiaron con NaOCl (1% v/v) durante 60 s, y luego se enjuagaron tres veces con agua destilada estéril. Las semillas se sumergieron en un caldo de bacterias crecidas en un medio de cultivo King B líquido durante 48 h, a 28 °C y 160 rpm. Luego se enjuagaron con agua destilada para eliminar residuos del medio de cultivo.

Se colocaron 10 semillas en cajas de Petri estériles que contenían un medio de cultivo en agar-agua enriquecido con 700 mg L<sup>-1</sup> de sulfato de aluminio y pendimentalina por separado. Se usaron muestras de agar sin inoculación de la bacteria como control. Las cajas de Petri se sellaron y se incubaron a temperatura ambiente (25 °C) bajo un fotoperíodo de 12 h luz-12 h oscuridad durante 96 h. Se fotografiaron a los 15 días de finalización del ensayo (Pérez-Cordero, Barraza y Martínez, 2015).

Se midieron las siguientes variables: longitud del hipocótilo, índice de vigor, porcentaje de germinación de semillas, índice de crecimiento relativo e índice de germinación. La longitud del hipocótilo se midió con una regla, considerando la distancia (cm) desde la base de la semilla hasta la apertura de las primeras hojas verdaderas. El índice de vigor de las semillas se evaluó utilizando una fórmula específica que combina la longitud media de la raíz y la longitud media del hipocótilo, ponderada por el porcentaje de germinación.

Para determinar el porcentaje de germinación de semillas, se contabilizó el número de semillas germinadas con éxito, expresado como un porcentaje. El índice de crecimiento relativo se evaluó por medio de RLS, que representa la longitud de la raíz en el tratamiento con la sustancia o condición de estudio, mientras que RLC es la longitud de la raíz en el control. Finalmente, el índice de germinación se calculó mediante la multiplicación de RLS, GSS es el número de semillas germinadas en el tratamiento, dividido para RLC que es la longitud de la raíz en el control, y GSC es el número de semillas germinadas en el control. Todos los datos fueron sometidos a las pruebas de normalidad y homocedasticidad para cumplir con los criterios de las pruebas paramétricas. Para identificar las diferencias entre tratamientos para los ensayos desarrollados, se usó la prueba de ANOVA de una vía y la prueba Tukey como *post hoc*.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Caracterización Macroscópica y Microscópica de las Cepas Aisladas de Suelos con Manejo Orgánico y con Manejo Químico de la Provincia Manabí**

En la caracterización macroscópica y microscópica de cepas bacterianas aisladas de suelos con alta materia orgánica y suelos contaminados en la provincia Manabí, las muestras de suelo orgánico presentaron una carga microbiana que osciló entre 6.00×10<sup>5</sup> y 1.39×10<sup>8</sup> UFC g<sup>-1</sup>, mientras que las muestras de suelo contaminado

variaron entre  $7.40 \times 10^6$  y  $2.58 \times 10^8$  UFC  $g^{-1}$ . Todas las cepas (Mo: cepa de suelo con manejo orgánico, MQ: cepa de suelo con manejo químico) fueron Gram negativas y catalasa positivas. En las muestras de suelo orgánico, las cepas Mo-1, Mo-2, Mo-3 y Mo-4 mostraron morfología circular y convexa, con capacidad de solubilización de urea y fosfato, además de una elevada tolerancia a sulfato de aluminio. Las cepas Mo-5, Mo-6 y Mo-7 presentaron formas puntiformes o circulares y la cepa Mo-7 destacó por su tolerancia significativa a sulfato de aluminio. En suelos contaminados, las cepas MQ-1, MQ-6, MQ-7 y MQ-8 presentaron morfología circular y convexa o elevada, con capacidad de solubilización de urea y fosfato, mostrando alta tolerancia a sulfato de aluminio. Las cepas MQ-2, MQ-3, MQ-4 y MQ-5 se caracterizaron por formas puntiformes y elevadas, con actividad de solubilización de fosfato destacada. La mayoría de las cepas mostró capacidad para solubilizar fosfato y tolerancia a compuestos como pendimentalina y sulfato de aluminio (Cuadro 1).

### Carga microbiana de Suelo con Manejo Orgánico y Suelo con Manejo Químico

En la carga microbiana de suelos con diferente manejo se observó que los suelos con manejo orgánico presentaron una carga de  $7.24 \times 10^7$  UFC  $g^{-1}$ , mientras que los suelos contaminados con herbicidas mostraron una carga significativamente mayor de  $1.28 \times 10^8$  UFC  $g^{-1}$ .

**Cuadro 1. Caracterización macroscópica y microscópica de las cepas aisladas de suelos bananeros con manejo orgánico y manejo químico de la provincia Manabí, Ecuador.**

**Table 1. Macroscopic and microscopic characterization of strains isolated from banana soils with organic and chemical management in the Manabí province, Ecuador.**

Cepas	Carga microbiana	Forma			Elevación			Forma de borde			Tinción Gram	Cat	S. U	S. P	Tol Pen	Tol Sulf
		CR	PT	CN	CV	EV	PN	ET	OD	DD						
Mo-1	8.04E+07	+					+	+			-	+	+	-	-	+
Mo-2	4.57E+07	+					+	+			-	+	+	-	-	+
Mo-3	7.50E+06	+					+	+			-	+	+	+	-	-
Muestra de suelo orgánico	Mo-4	1.39E+08	+				+	+			-	+	++	+	++	+
	Mo-5	1.21E+08			+		+	+			-	+	++	+	+	-
	Mo-6	6.50E+07			+	+		+			-	+	+	-	-	+
	Mo-7	1.20E+08			+		+		+		-	+	+	+	+	++
	Mo-8	6.00E+05		+			+		+		-	+	+	-	-	-
	MQ-1	1.19E+08	+				+		+		-	+	+	-	+	++
	MQ-2	2.21E+08		+			+			+	-	+	++	+	+	+
	MQ-3	6.80E+07			+		+		+		-	+	+	-	-	-
Muestra de suelo químico	MQ-4	2.58E+08			+		+		+		-	+	++	+	-	-
	MQ-5	1.56E+08		+			+		+		-	+	++	-	-	-
	MQ-6	1.07E+08	+			+			+		-	+	++	+	+	+
	MQ-7	7.40E+06	+			+			+		-	+	++	+	+	-
	MQ-8	8.82E+07	+			+			+		-	+	+	-	-	-

CR = circular; PT = puntiforme; GN = granular; CV = convexa; EV = elevada; PN = plana; ET = entera; OD = ondulada; DD = dentada; Cat = Catalasa; S.U. = solubilización de urea; S.P. = solubilización de fósforo; Tol Pen = tolerancia a pendimentalina; Tol Sulf = tolerancia a sulfato de aluminio; Mo = cepa de suelo con manejo orgánico; MQ = cepa de suelo con manejo químico.

CR = circular; PT = punctate; GN = granular; CV = convex; EV = raised; PN = flat; ET = entire; OD = wavy; DD = serrated; Cat = catalase; S.U. = urea solubilization; S.P. = phosphorus solubilization; Tol Pen = pendimenthalin tolerance; Tol Sulf = aluminum sulfate tolerance; Mo = soil strain with organic management; MQ = soil strain with chemical management.

## Análisis de Turbidez de Bacterias Tolerantes a Pendimentalina

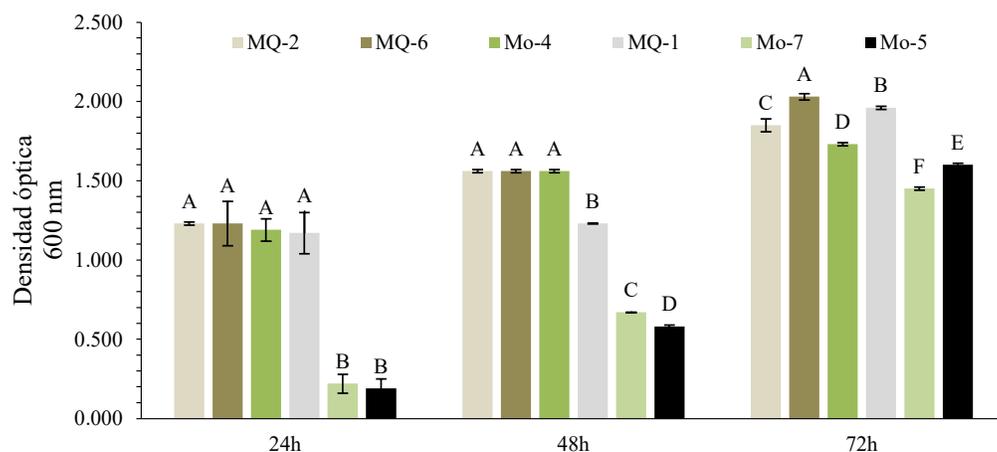
En el análisis de turbidez de bacterias tolerantes a pendimentalina mediante densidad óptica a 600 nm, se observaron diferencias significativas en la respuesta de los diferentes tratamientos a lo largo de los intervalos de tiempo evaluados (24, 48 y 72h). A las 24 h, los tratamientos MQ-2, MQ-6, Mo-4 y MQ-1 no mostraron diferencias significativas entre ellos, con densidades ópticas de 1.23 a 1.19, mientras que Mo-7 y Mo-5 presentaron valores significativamente menores ( $P < 0.05$ ), con 0.22 y 0.19 respectivamente. A las 48 h, las densidades ópticas para MQ-2, MQ-6 y Mo-4 se mantuvieron en 1.56, sin diferencias, mientras que MQ-1 disminuyó a 1.23, siendo diferente ( $P < 0.05$ ). Por su parte, Mo-7 y Mo-5 aumentaron a 0.67 y 0.58 respectivamente, aunque permanecieron más bajas que los demás tratamientos ( $P < 0.05$ ). A las 72 h, MQ-6 alcanzó la densidad óptica más alta de 2.03, superior a los demás tratamientos ( $P < 0.05$ ). MQ-2, MQ-1, Mo-4, Mo-7 y Mo-5 registraron densidades ópticas de 1.85, 1.96, 1.73, 1.45 y 1.6 respectivamente, con diferencias significativas entre cada uno de ellos ( $P < 0.05$ ) (Figura 1).

## Análisis de Turbidez de las Bacterias Tolerantes a Sulfato de Aluminio

En el análisis de turbidez de bacterias tolerantes a sulfato de aluminio, medido mediante densidad óptica a 600 nm, se observaron diferencias en la respuesta de los tratamientos a lo largo de los intervalos de tiempo de 24, 48 y 72 h. A las 24 h, los tratamientos MQ-2 y Mo-4 mostraron las mayores densidades ópticas de 0.55, sin diferencias entre ellos, mientras que Mo-5, MQ-1 y MQ-6 presentaron valores menores de 0.51, 0.50 y 0.43 respectivamente, con MQ-6 siendo inferior ( $P < 0.05$ ). El tratamiento Mo-7 registró la densidad más baja de 0.40, menor que los otros tratamientos ( $P < 0.05$ ). A las 48 h, el tratamiento MQ-1 mostró la mayor densidad óptica de 0.59, superior a Mo-4, Mo-5, MQ-6 y MQ-7 con 0.40, 0.38, 0.35 y 0.18 respectivamente ( $P < 0.05$ ). MQ-2 tuvo una densidad óptica de 0.51, similar a Mo-4 y Mo-5, pero superior a MQ-6 y Mo-7 ( $P < 0.05$ ). A las 72 h, no se observaron diferencias entre los tratamientos ( $P > 0.05$ ) (Figura 2).

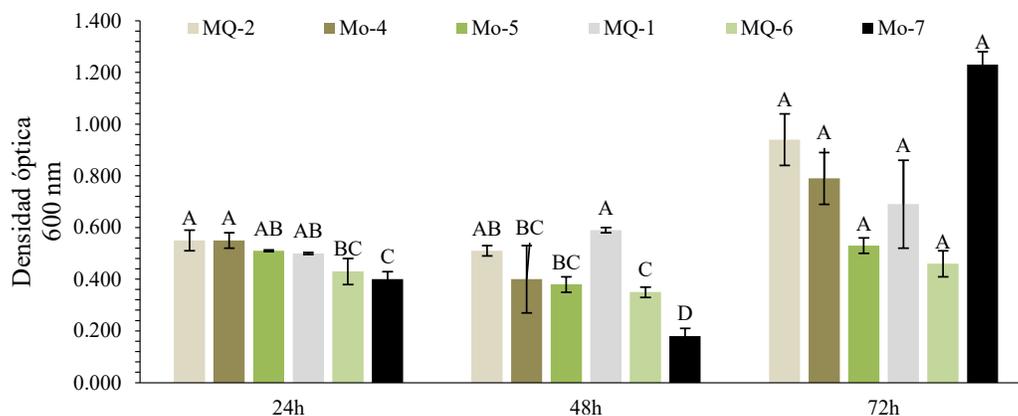
## Determinación de las Variaciones del pH con Pendimentalina en Presencia de las Rizobacterias

En cuanto al potencial de hidrógeno (pH) de bacterias tolerantes a pendimentalina, se observaron variaciones en los valores de pH entre diferentes tratamientos a lo largo de los intervalos de tiempo de 24, 48 y 72h. A las 24 h, el tratamiento MQ-2 mostró el pH más alto (7.3), seguido de MQ-6 y con MQ-1 con 7.03 y 6.93 respectivamente. Los tratamientos Mo-7, Mo-5 y Mo-4 registraron valores de pH más bajos con 6.77, 6.72 y 6.58 respectivamente, mientras que el control tuvo el pH más bajo con 5.33. A las 48 h, MQ-2 continuó mostrando el pH más elevado con 7.52, seguido por MQ-6 con 7.2, mientras que MQ-1, Mo-7, Mo-5 y Mo-4 presentaron pH de 6.96, 6.8, 6.85 y 6.65, respectivamente. El control mantuvo el valor más bajo con 5.13. A las 72 h, MQ-2 alcanzó el pH de 7.72, seguido por MQ-6 y Mo-5, que alcanzaron 7.4 y 7.18 respectivamente. Los tratamientos MQ-1 y Mo-7 tuvieron pH de 7 y 6.96 respectivamente, mientras que Mo-4 presentó el valor más bajo con 6.81. El control alcanzó los 5.95 (Figura 3).



**Figura 1. Análisis de turbidez de bacterias tolerantes a pendimentalina, a las 24, 48 y 72 h de cultivo.** Las barras representan la media y las líneas verticales sobre las barras denotan la desviación estándar. Letras distintas denotan diferencias significativas en el análisis de Tukey.

**Figure 1. Turbidity analysis of pendimentalin-tolerant bacteria at 24, 48, and 72 h of culture.** The bars represent the mean, and the vertical lines above the bars represent the standard deviation. Different letters indicate significant differences in the Tukey analysis.



**Figura 2. Análisis de turbidez de las bacterias tolerantes a sulfato de aluminio, a las 24, 48 y 72 h de cultivo.** Las barras representan la media y las líneas verticales sobre las barras denotan la desviación estándar. Letras distintas denotan diferencias significativas en el análisis de Tukey.

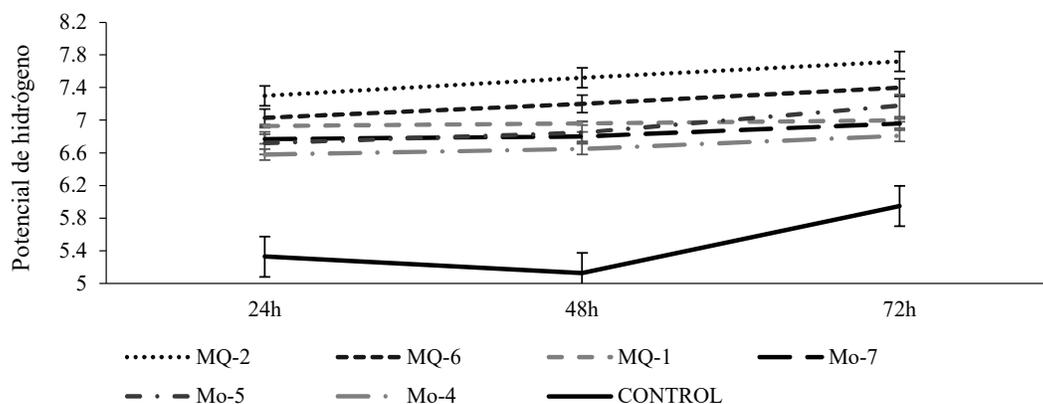
**Figure 2. Turbidity analysis of aluminum sulfate-tolerant bacteria at 24, 48, and 72 h of culture.** The bars represent the mean, and the vertical lines above the bars represent the standard deviation. Different letters indicate significant differences in the Tukey analysis.

### Determinación de las Variaciones del pH con Sulfato de Aluminio en Presencia de las Rizobacterias

El potencial de hidrógeno de bacterias tolerantes a sulfato de aluminio tuvo variaciones significativas a lo largo de los intervalos de tiempo de 24, 48 y 72h. A las 24 h, los tratamientos MQ-6, MQ-1 y MQ-2 presentaron los pH más altos (8.11, 8.06 y 8.06 respectivamente), seguidos por Mo-7 (7.78) y el control (7.59). Mo-4 y Mo-5 mostraron valores de pH menores. A las 48 h, los valores de pH disminuyeron. Contrariamente, Mo-4 y Mo-5 mostraron un incremento en el pH. A las 72 h se observó una disminución significativa para MQ-6, MQ-1, MQ-2 y Mo-7. Mo-4 y Mo-5 registraron pH elevados > 7, superiores a los demás tratamientos y al control (Figura 4).

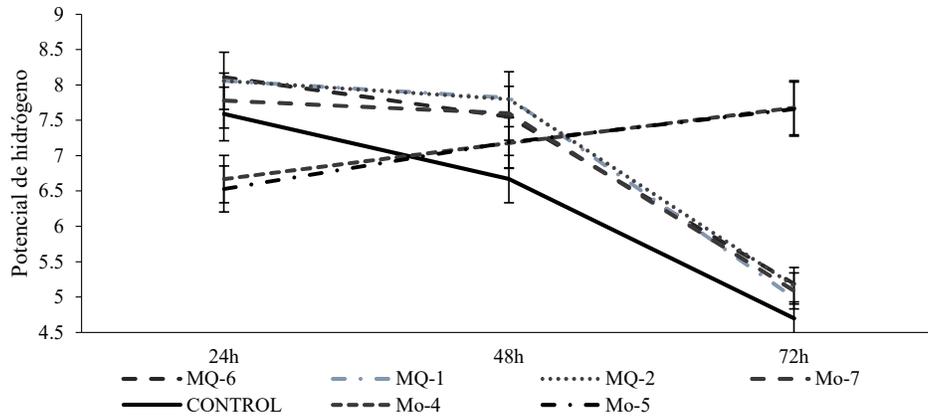
### Determinación de las UFC de Bacterias Tolerantes a Pendimetalina

En cuanto a la concentración celular de diferentes cepas bacterianas tolerantes a pendimetalina en intervalos de tiempo, tras 24 h de exposición a pendimetalina se observaron diferencias. Las cepas MQ-1, MQ-6, MQ-2 y Mo-7 mostraron una alta concentración ( $1.03E+10$ ,  $9.83E+10$ ,  $8.53E+10$  y  $7.11E+10$  UFC mL<sup>-1</sup>, respectivamente). Las cepas Mo-5 y Mo-4 presentaron una disminución en la concentración celular ( $7.93E+10$  y  $5.18E+10$  UFC mL<sup>-1</sup>, respectivamente). A las 48 h, las cepas MQ-1, MQ-2 y Mo-7 mantuvieron su concentración celular (Figura 5).



**Figura 3. Potencial de hidrógeno de bacterias tolerantes a pendimetalina, a las 24, 48 y 72 h de cultivo.** Los puntos representan la media y las líneas verticales sobre los puntos denotan la desviación estándar.

**Figure 3. Hydrogen potential of pendimetalin-tolerant bacteria at 24, 48, and 72 h of culture.** The points represent the mean, and the vertical lines above the points denote the standard deviation.



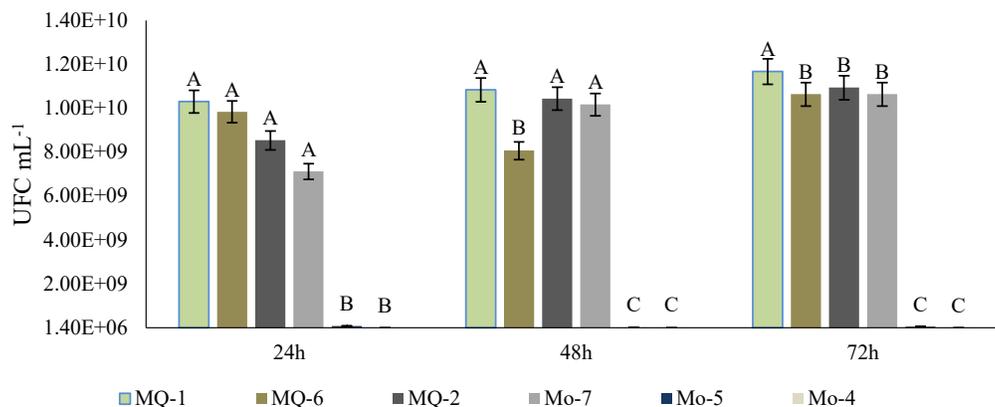
**Figura 4. Potencial de hidrógeno de bacterias tolerantes a sulfato de aluminio a las 24, 48 y 72 h de cultivo.** Los puntos representan la media y las líneas verticales sobre los puntos denotan la desviación estándar.

**Figure 4. Hydrogen potential of aluminum sulfate-tolerant bacteria at 24, 48, and 72 h of culture.** The points represent the mean, and the vertical lines above the points denote the standard deviation.

La cepa MQ-6, por otro lado, experimentó una disminución en concentración celular ( $8.06E+10$  UFC  $mL^{-1}$ ). Las cepas Mo-5 y Mo-4 mostraron una concentración celular menor. Después de 72 h, la cepa MQ-1 mostró la mayor concentración celular con  $1.16E+10$  UFC  $mL^{-1}$ . Las cepas MQ-2, MQ-6 y Mo-7 presentaron una disminución en concentración celular. Las cepas Mo-5 y Mo-4 mostraron los valores bajos de concentración celular ( $4.59E+10$  y  $3.89E+10$  UFC  $mL^{-1}$ , respectivamente) (Figura 5).

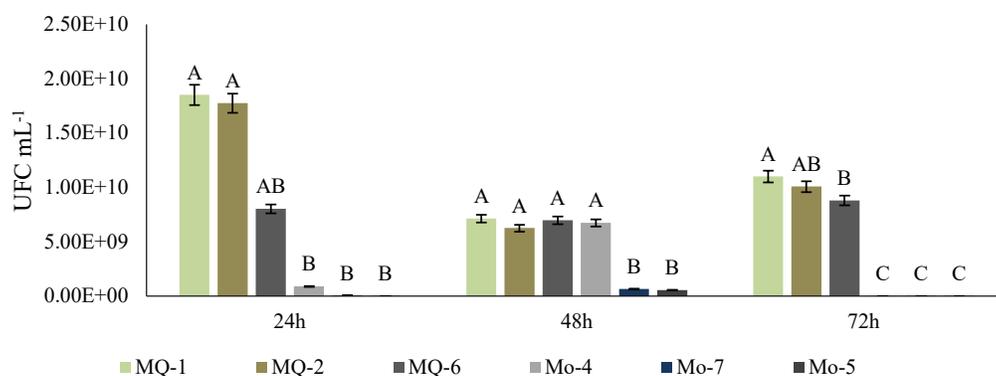
#### Determinación de las UFC de Bacterias Tolerantes a Sulfato de Aluminio

En cuanto al crecimiento celular de diferentes cepas bacterianas tolerantes a sulfato de aluminio, medida en unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC  $mL^{-1}$ ), a lo largo de intervalos de tiempo, a las 24 h de exposición a sulfato de aluminio, se observaron diferencias en la concentración celular entre las cepas investigadas. Las cepas MQ-1 y MQ-2 presentaron las concentraciones celulares más altas, seguido de la cepa MQ-6 (Figura 6). Las cepas Mo-4, Mo-5 y Mo-7 mostraron una concentración celular menor, con valores de  $8.97E+10$ ,  $1.29E+10$  y  $5.98E+10$  UFC  $mL^{-1}$ , respectivamente. A las 48 h, las cepas presentaron diferencias en la concentración celular. Después de 72 h, la concentración celular de la cepa MQ-1 se mantuvo alta, sin diferencias en comparación con MQ-2 (Figura 6). La cepa MQ-6 presentó una concentración de  $8.80E+10$  UFC  $mL^{-1}$ , significativamente menor. Las cepas Mo-4, Mo-5 y Mo-7 mostraron una disminución en la concentración celular (Figura 6).



**Figura 5. Concentración celular de bacterias tolerantes a pendimetalina, a las 24, 48 y 72 h de cultivo.** Las barras representan la media y las líneas verticales sobre las barras denotan la desviación estándar. Letras distintas denotan diferencias significativas en el análisis de Tukey.

**Figure 5. Cellular concentration of pendimethalin-tolerant bacteria at 24, 48, and 72 h of culture.** The bars represent the mean, and the vertical lines above the bars represent the standard deviation. Different letters indicate significant differences in Tukey's analysis.



**Figura 6. Concentración celular de bacterias tolerantes a sulfato de aluminio, a las 24, 48 y 72 h de cultivo.** Las barras representan la media y las líneas verticales sobre las barras denotan la desviación estándar. Letras distintas denotan diferencias significativas en el análisis de Tukey.

**Figure 6. Cellular concentration of aluminum sulfate-tolerant bacteria at 24, 48, and 72 h of culture.** The bars represent the mean, and the vertical lines above the bars represent the standard deviation. Different letters indicate significant differences in Tukey's analysis.

### Ensayo de Fitotoxicidad en Semillas de *Oryza sativa* con Pendimentalina

En la variable de fitotoxicidad de la pendimentalina en semillas de *O. sativa* a nivel *in vitro*, los resultados revelaron diferencias en la respuesta de las semillas a la pendimentalina. Las semillas tratadas con las cepas MQ-1, MQ-2 y MQ-6 mostraron un 100% de germinación, significativamente superior a las demás cepas. Las cepas Mo-4 y Mo-5 presentaron porcentajes de germinación del 81 y 83%, respectivamente. La cepa Mo-7 tuvo el porcentaje de germinación más bajo con un 56%.

En la longitud de hipocótilo, la cepa Mo-7 presentó la mayor longitud (2.42 cm), significativamente mayor que las otras cepas. Las cepas MQ-1 y MQ-6 mostraron longitudes de hipocótilo de 1.58 cm y 1.42 cm, respectivamente, sin diferencias entre ellas. Las cepas Mo-4, Mo-5 y MQ-2 presentaron longitudes de hipocótilo menores (Cuadro 2). En la longitud de la raíz, las cepas MQ-1, MQ-6 y Mo-7 mostraron los valores más altos con 5.75, 6.83 y 5.67 cm, respectivamente. La cepa Mo-5 mostró una longitud de raíz significativamente menor que las cepas mencionadas (Cuadro 2). Las cepas Mo-4 y MQ-2 presentaron las longitudes de raíz más cortas (Cuadro 2).

El índice de vigor fue más alto en las cepas MQ-1 y MQ-6, con valores de 73.33 y 82.50, respectivamente, seguido de la cepa Mo-7 con 45.83. Las cepas Mo-5 y MQ-2 presentaron índices menores de 29.83 y 29.17, respectivamente. La cepa Mo-4 tuvo el índice de vigor más bajo con 15.07. La cepa Mo-7 presentó el índice de crecimiento relativo más alto con 1.10, seguido por las cepas MQ-1 y MQ-6 con valores de 0.81 y 0.96, respectivamente. Las cepas Mo-5 y MQ-2 mostraron índices de crecimiento relativo de 0.43 y 0.33, respectivamente.

**Cuadro 2. Ensayo de fitotoxicidad de semillas de *Oryza sativa* tratadas con cepas bacterianas aisladas de suelos con cultivo de banano bajo tratamiento orgánico (Mo) y tratamiento químico (MQ) ante pendimentalina.**

**Table 2. Phytotoxicity test of *Oryza sativa* seeds treated with bacterial strains isolated from soils with banana crops under organic treatment (Mo) and chemical treatment (MQ) against pendimentalin.**

Cepa	Porcentaje de germinación	Long. Hipocótilo	Long. Raíz	Índice de vigor	Índice de crecimiento relativo	Índice de germinación
	G%	----- cm -----		IV	RGI	IG
Mo-4	81 b	0.58 c	1.25 c	15.07 d	0.17 c	14.25 d
Mo-5	83 b	0.58 c	3.00 b	29.83 c	0.43 bc	35.93 cd
Mo-7	56 c	2.42 a	5.67 a	45.83 b	1.10 a	54.82 bc
MQ-1	100 a	1.58 b	5.75 a	73.33 a	0.81 ab	80.92 ab
MQ-2	100 a	0.58 c	2.33 bc	29.17 c	0.33 bc	32.97 cd
MQ-6	100 a	1.42 b	6.83 a	82.50 a	0.96 ab	93.60 a

Los valores en las columnas representan la media. Letras distintas denotan diferencias significativas según análisis de Tukey. The values in the columns represent the mean. Different letters denote significant differences according to Tukey's analysis.

La cepa Mo-4 tuvo el índice de crecimiento relativo más bajo con 0.17. El índice de germinación fue más alto en la cepa MQ-6 con 93.60, seguido por la cepa MQ-1 con 80.92, la cepa Mo-7 con 54.82 y Mo-5 y MQ-2 con índices de 35.93 y 32.97, respectivamente. La cepa Mo-4 tuvo el índice de germinación estadísticamente más bajo con 14.25 (Cuadro 2).

### Ensayo de Fitotoxicidad en Semillas de *Oryza sativa* con Sulfato de Aluminio

Los resultados revelaron diferencias entre las cepas. Las semillas tratadas con las cepas MQ-1 y MQ-6 mostraron un 100% de germinación, superior a las demás cepas (Cuadro 3). La cepa MQ-6 presentó la mayor longitud de hipocótilo (23.50 cm), seguida de la cepa MQ-1 (15.83 cm). La cepa Mo-4 tuvo la longitud de hipocótilo más baja (10.33 cm). La longitud de raíz fue mayor en las cepas MQ-6 y Mo-5 (6.80 cm y 5.75 cm, respectivamente). Las cepas Mo-4 y Mo-7 no desarrollaron raíces bajo estas condiciones.

El índice de vigor fue más alto en la cepa MQ-6 (303.00), seguido por MQ-1 (Cuadro 3). Las cepas Mo-7 y Mo-4 mostraron índices de vigor significativamente más bajos (Cuadro 3). Las cepas MQ-6 y Mo-5 mostraron los índices de crecimiento relativo más altos (Cuadro 3). La cepa MQ-1 tuvo un RGI de 0.25, significativamente mayor que MQ-2 con 0.04. Las cepas Mo-4 y Mo-7 no mostraron crecimiento relativo. Las cepas MQ-6 y Mo-5 presentaron el índice de germinación más alto con 95.42 y 64.71, mientras que las cepas Mo-4 y Mo-7 no mostraron índices de germinación (Cuadro 3).

En la presente investigación se identificaron microorganismos con potencial biotecnológico aislados de suelos agrícolas abonados con fertilizantes químicos y orgánicos. Las muestras de suelo con manejo químico tuvieron una mayor proliferación microbiana. Esta observación concuerda con estudios previos que han demostrado que la presencia de contaminantes puede inducir la selección de microorganismos resistentes, aumentando la diversidad y densidad microbiana en estos suelos (Xu *et al.*, 2021). Las cepas aisladas fueron Gram negativas y catalasa positivas, lo que sugiere una adaptación a condiciones ambientales adversas y una capacidad de detoxificación. En suelos orgánicos, las cepas mostraron morfología circular y convexa con capacidad de solubilización de urea y fosfato, además de una elevada tolerancia a sulfato de aluminio. Este comportamiento es crucial para la fertilidad del suelo, conociendo que la solubilización de fosfato es esencial para la disponibilidad de nutrientes (Fatima, Ahmad, Verma y Pathak, 2022).

En suelos con manejo químico, también presentaron morfología circular y convexa con capacidades similares de solubilización y una notable tolerancia a sulfato de aluminio. La mayor densidad microbiana y la capacidad de solubilización observadas en estos suelos contaminados se deben a la presencia de mecanismos de resistencia adaptativa a los herbicidas y otros compuestos tóxicos, lo cual ha sido documentado en estudios previos sobre microbiología del suelo (Zhang, Yuan, Xiong, Wang y Jiang, 2020). Shahid, Khan y Singh (2023) también reportaron que bacterias aisladas de suelos contaminados con herbicidas mostraron una elevada capacidad de desintoxicación y solubilización de nutrientes, indicando una adaptación evolutiva a las condiciones de estrés químico.

Además, se ha señalado que la formación de halos en el medio de cultivo no es necesariamente específica para detectar mineralizadores de fósforo orgánico, lo que podría llevar a una sobreestimación del número de microorganismos positivos (Haridy *et al.*, 2021; Knyazev *et al.*, 2022). Ducousso-Détréz, Lahrach, Fontaine, Sahraoui y Hijri (2024) identificaron 57 morfotipos que mostraron halos en el medio sólido, pero solo 26 de ellos fueron capaces de liberar fósforo en ensayos *in vitro*. Hallazgos similares fueron reportados por Hossain *et al.* (2021). Esto podría estar relacionado con la producción de ácidos orgánicos como ácido cítrico, málico y acético, que reducen el pH del medio, volviendo soluble el fitato de sodio y generando un halo de claridad alrededor de la colonia (Di Lorenzo, Serra, Porro y Branduardi, 2022).

En otro estudio, Al-Masoodi, Al-Rubaye y Hussein (2023) encontraron un alto número de aislados pertenecientes a los géneros *Penicillium* sp. y *Fusarium* sp. con capacidad para producir fitasas. Sin embargo, *Penicillium* sp. ha sido principalmente reconocido por su capacidad para producir fosfatasas (Doilom *et al.*, 2020; Kumar, Teja, Mathur y Kumari, 2020; Mercl *et al.*, 2020; López-Medina, Naranjo, Quevedo y Ratti, 2023). Además, *Penicillium* sp. y *Fusarium* sp. también han sido informados como solubilizadores de fósforo inorgánico (Gurbanov, Kalkanci, Karadag y Samgane, 2021), mientras que *Acremonium* spp. ha sido relacionado con la producción de fosfatasas (Lu *et al.*, 2022; Parvez, Hussain, Khan y Sajid, 2023), y *Mucor* sp. ha demostrado capacidad para liberar fitasas (Jatuwong *et al.*, 2020). Estos resultados sugieren que todos los microorganismos podrían estar inmovilizando el fósforo mineralizado en su biomasa. Sin embargo, se considera que el fósforo inmovilizado en la biomasa microbiana podría tener un papel importante en la disponibilidad de este elemento para las plantas (Ibrahim *et al.*, 2022), hallazgos similares a los reportados por Wang *et al.* (2022) y Tian, Ge, Zhang, Deng y Liu (2021).

**Cuadro 3. Ensayo de fitotoxicidad de semillas de *Oryza sativa* tratadas con cepas bacterianas aisladas de suelos con cultivo de banano bajo tratamiento orgánico (Mo) y tratamiento químico (MQ) ante sulfato de aluminio.****Table 3. Phytotoxicity test of *Oryza sativa* seeds treated with bacterial strains isolated from soils with banana crops under organic treatment (Mo) and chemical treatment (MQ) against aluminum sulfate.**

Cepa	Porcentaje de germinación	Long. Hipocótilo	Long. Raíz	Índice de vigor	Índice de crecimiento relativo	Índice de germinación
	G%	----- cm -----		IV	RGI	IG
Mo-4	30 d	10.33 bc	0.00 c	31.00 e	0.00 d	0.00 d
Mo-5	80 b	12.83 bc	5.75 a	148.67 bc	0.81 a	64.71 a
Mo-7	50 c	7.83 c	0.00 c	39.17 de	0.00 d	0.00 d
MQ-1	100 a	15.83 b	1.95 b	177.83 b	0.25 b	25.03 b
MQ-2	80 b	12.75 bc	0.30 b	104.40 cd	0.04 c	3.38 c
MQ-6	100 a	23.50 a	6.80 a	303.00 a	0.95 a	95.42 a

Los valores en las columnas representan la media. Letras distintas denotan diferencias significativas según análisis de Tukey.  
The values in the columns represent the mean. Different letters denote significant differences according to Tukey's analysis.

El análisis de la turbidez de bacterias tolerantes a pendimetalina mostró que las cepas mantuvieron altas densidades ópticas, indicando una proliferación en presencia del herbicida. Esto sugiere que estas cepas poseen mecanismos bioquímicos eficaces para neutralizar o metabolizar la pendimetalina (Guerrero-Ramírez *et al.*, 2023), lo cual es consistente con estudios que han demostrado que la presencia de herbicidas en el suelo puede seleccionar bacterias con capacidades enzimáticas para degradar estos compuestos (Pileggi, Pileggi y Sadowsky, 2020). La capacidad de ciertas cepas para mantener el pH en niveles óptimos también sugiere una regulación activa del microbioma, favoreciendo la actividad enzimática y la solubilización de nutrientes (Kour *et al.*, 2020; Saeed *et al.*, 2021).

Las cepas mostraron, además, una alta concentración celular, lo cual puede atribuirse a mecanismos de resistencia intrínsecos como la producción de enzimas degradativas o la modificación de sitios de acción del herbicida. Esto coincide con investigaciones anteriores que sugieren que la exposición continua a herbicidas puede inducir la selección de cepas bacterianas con una alta capacidad de supervivencia y adaptación (Ahmad, Ahmad y Bhatt, 2022; Pileggi *et al.*, 2020; Shahid y Khan, 2022).

Los bajos valores del pH respecto al control podrían explicarse por la presencia de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  como fuente de nitrógeno en el medio de cultivo (Gezahegn, Feyissa y Rezene, 2023). Cuando el ion  $\text{NH}_4^+$  ingresa al citoplasma celular, se activa una bomba de protones que libera  $\text{H}^+$  al medio extracelular, lo que podría explicar la reducción del pH (Guan y Liu, 2020). Además, la liberación de ácidos orgánicos podría justificar su bajo crecimiento; al ser generados en el ciclo de Krebs, se utilizan como precursores de la síntesis de macromoléculas, lo que podría representar un drenaje de carbono que no se utiliza para el crecimiento celular (Raju *et al.*, 2024). La producción de ácidos orgánicos podría ser ventajosa para los microorganismos mineralizadores de fósforo; estos ácidos podrían ayudar a liberar fósforo de fuentes orgánicas e inorgánicas, contribuyendo así a la disponibilidad de fósforo para las plantas (Patel y Goswami, 2020; Silva *et al.*, 2023; Tian *et al.*, 2021; Timofeeva, Galyamova y Sedykh, 2022).

El ensayo de fitotoxicidad en semillas de *Oryza sativa* con pendimetalina mostró que las cepas promovieron una germinación del 100%, superior a otras cepas. Estos resultados indican que la presencia de estas bacterias puede mitigar la fitotoxicidad del herbicida, posiblemente debido a la degradación del compuesto o la producción de compuestos bioactivos que favorecen el crecimiento de las plantas (Hasanuzzaman *et al.*, 2020). Goudarzi, Tabrizi, Alikhani, Nazeri y Najafi (2023) también observaron que ciertas bacterias promotoras del crecimiento de plantas pueden mejorar su germinación y vigor mediante la producción de fitohormonas y la solubilización de nutrientes. En comparación con otros estudios, como el de Lonkar y Bodade (2021), que demostraron que bacterias tolerantes a herbicidas pueden mejorar significativamente el crecimiento y la salud de las plantas, los resultados del presente estudio respaldan la idea de que la selección de cepas adecuadas es crucial para el biocontrol y la biorremediación en suelos contaminados (Saeed *et al.*, 2021). Además, la capacidad de estas cepas para modificar el pH del suelo y solubilizar fosfatos puede tener un impacto positivo en la fertilidad del suelo y la productividad agrícola (Elhaisoufi, Ghoulam, Barakat, Zeroual y Bargaz, 2022). Estos resultados coinciden con diversos estudios previos que ilustran el potencial de las bacterias tolerantes a herbicidas y metales pesados en la agricultura. Los microorganismos pueden sobrevivir en condiciones adversas, y también pueden mejorar la salud del suelo y la productividad de los cultivos al solubilizar nutrientes esenciales y mitigar la fitotoxicidad de compuestos químicos.

Considerando los resultados obtenidos, que evidencian variaciones en las respuestas de las variables según las cepas bacterianas empleadas, se recomienda que futuras investigaciones se enfoquen en la evaluación de consorcios microbianos que promuevan interacciones sinérgicas, tales como mutualismo, simbiosis y cooperación. Estas interacciones positivas tienen el potencial de optimizar integralmente el desarrollo de las plantas en suelos contaminados, facilitando además procesos de biorremediación. Diversas investigaciones han demostrado que la aplicación de consorcios microbianos en sistemas agrícolas mejora la fertilidad y salud del suelo (FAO, 2023), actuando como reguladores de procesos biogeoquímicos esenciales. Estos consorcios incrementan la resistencia de los suelos al estrés, lo cual es crucial ante desafíos como el cambio climático. Además, los bioestimulantes compuestos por microorganismos beneficiosos, como bacterias y hongos, promueven la absorción de nutrientes, aumentan la tolerancia al estrés y mejoran la salud general de las plantas (Sotomayor *et al.*, 2022), siendo una solución sostenible que apoya una agricultura más respetuosa con el medio ambiente. Asimismo, la aplicación de consorcios microbianos autóctonos en suelos contaminados permite eliminar, atenuar o transformar compuestos contaminantes *in situ*, aprovechando la capacidad metabólica de los microorganismos para la biorremediación. Esta estrategia no solo mejora la salud del suelo, sino que también contribuye al desarrollo sostenible de la agricultura (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021).

## CONCLUSIONES

El análisis morfológico y de carga microbiana reveló que las cepas provenientes de suelos contaminados presentaron una carga microbiana significativamente mayor, oscilando entre  $7.40 \times 10^6$  y  $2.58 \times 10^8$  UFC  $g^{-1}$ . Este hallazgo sugiere que la contaminación puede crear nichos ecológicos que favorecen la proliferación de ciertos microorganismos adaptados a condiciones adversas. Estos microorganismos con capacidades específicas para degradar compuestos tóxicos indican una adaptación y potencial biotecnológico para la biorremediación.

Las cepas Mo-7 y MQ-6 destacaron por sus capacidades funcionales. Mo-7, aislada de suelos con materia orgánica, mostró tolerancia al sulfato de aluminio y actividad de solubilización de fosfato. Por su parte, MQ-6, proveniente de suelos contaminados, exhibió una elevada capacidad para solubilizar urea y fosfato, además de tolerancia al sulfato de aluminio. Estas características son indicativas de su potencial aplicación en la promoción del crecimiento vegetal y en la biorremediación de suelos contaminados. La capacidad de solubilizar fosfatos es especialmente relevante, ya que mejora la disponibilidad de fósforo para las plantas, un nutriente esencial que a menudo es limitante en suelos agrícolas. En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de caracterizar y aprovechar microorganismos nativos de diferentes tipos de suelos, ya que poseen adaptaciones específicas que pueden ser utilizadas en aplicaciones biotecnológicas para mejorar la salud del suelo y la productividad agrícola.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FINANCIACIÓN

Proyecto FOCICYT 9<sup>na</sup> convocatoria y beca académica de posgrado otorgada por SENESCYT

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: D.G.C. y Y.F.S. Metodología: F.A.P., B.L.I.T., C.M.L., D.G.C. y C.J.M.H. Software: B.L.I.T., C.J.M.H. y C.M.L. Análisis formal: D.G.C., Y.F.S. y F.A.P. Investigación: D.G.C., Y.F.S., B.L.I.T., C.J.M.H., C.M.L. y F.A.P. Recursos: F.A.P. Curación de datos: D.G.C. Escritura y preparación del borrador original: D.G.C., B.L.I.T., C.M.L., D.G.C. y C.J.M.H. Escritura, revisión y edición: F.A.P. y Y.F.S. Visualización: D.G.C. Supervisión: F.A.P. y Y.F.S. Administración del proyecto: F.A.P. Adquisición de fondos: F.A.P.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, a la dirección de la Facultad de Posgrado, a SENESCYT por la beca académica otorgada (D.G.C.) y al técnico de los laboratorios de microbiología y biología Ángel Cedeño Moreira.

## LITERATURA CITADA

- Acevedo, I., Sánchez, A., & Mendoza, B. (2021). Evaluación del nivel de degradación del suelo en dos sistemas productivos en la depresión de Quíbor. II. Calidad del suelo. *Bioagro* 33(2), 127-134. <http://www.doi.org/10.51372/bioagro332.6>
- Ahmad, S., Ahmad, H. W., & Bhatt, P. (2022). Microbial adaptation and impact into the pesticide's degradation. *Archives of Microbiology*, 204(288), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02899-6>
- Al-Masoodi, I. H., Al-Rubaye, A. F. M., & Hussein, H. J. (2023). Isolation and diagnosis of the fungi associated with maize seeds collected from local markets in Karbala, Iraq. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 21(3), 665-672. <https://doi.org/10.22124/CJES.2023.6945>
- Angel, M. L. H., Lopez, E. P., Granda, M. C. J., & Usuga, A. P. P. (2020). Identificación de microorganismos biorremediadores de suelos agrícolas del norte de Antioquia para degradación del clorpirifos. *Revista Politécnica* 16(32), 96-110. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n32a9>
- Barua, R. C., Kolman, M. A., Aguila, M. S., Zapata, P. D., & Alvarenga, A. E. (2021). Aislamiento e identificación de microorganismos amilolíticos y tolerantes a cianuro de efluentes de la industria almidonera. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 35, 1-10.
- Bhardwaj, L., Reddy, B., Nath, A. J., & Dubey, S. K. (2024). Influence of herbicide on rhizospheric microbial communities and soil properties in irrigated tropical rice field. *Ecological Indicators*, 158, 111534. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111534>
- Canchola, M., Hernández, M. R., Luna, R. R., Sotelo, M. T. F., Pérez, M. T. Z., Roldan, E. I. C., ... & Arvide, M. G. T. (2021). Contaminantes emergentes: amenaza para la seguridad alimentaria en México. *RD-ICUAP*, 7(20), 220-232. <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2021.20.610>
- Carreón-Abud, Y., & Gavito, M. E. (2021). Tolerance of arbuscular mycorrhizal fungi and microorganisms associated to their hyphosphere to aluminum in soil. *Scientia Fungorum* 51(1304), 1-13. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1304>
- Cruz-Cárdenas, C. I., Zelaya-Molina, L. X., Sandoval-Cancino, G., Santos-Villalobos, S. D. L., Rojas-Anaya, E., Chávez-Díaz, I. F., & Ruíz-Ramírez, S. (2021). Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: consideraciones y retos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 1-15. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2905>
- Dai, X. J., Wang, J. L., Xiao, X., Dong, X. Y., Shen, R. F., & Zhao, X. Q. (2023). Aluminum-Tolerant Wheat Genotype Changes Root Microbial Taxa and Nitrogen Uptake According to Soil pH Levels and Nitrogen Rates. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 1360-1373. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01128-3>
- De Garcia-Fernandez, M. B., dos Anjos-Leal, O., Júnior, A. P., de Oliveira-Islabão, L., Silveira, L. M., Nogueira, H. L., ... & Stumpf, L. (2023). First assessment of soil mesofauna, microbiota, and humic substances associations in a minesoil revegetated with four grasses in Brazil: an 18-year field study. *European Journal of Soil Biology*, 118, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103533>
- Dennis, P. G., Kukulies, T., Forstner, C., Plisson, F., Eaglesham, G., & Pattison, A. B. (2023). The effects of atrazine, diuron, fluzafop-p-butyl, haloxyfop-p-methyl, and pendimethalin on soil microbial activity and diversity. *Applied Microbiology*, 3(1), 79-89. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol3010007>
- Di Lorenzo, R. D., Serra, I., Porro, D., & Branduardi, P. (2022). State of the art on the microbial production of industrially relevant organic acids. *Catalysts*, 12(2), 1-23. <https://doi.org/10.3390/catal12020234>
- Doilom, M., Guo, J. W., Phookamsak, R., Mortimer, P. E., Karunarathna, S. C., Dong, W., ... & Xu, J. C. (2020). Screening of phosphate-solubilizing fungi from air and soil in Yunnan, China: four novel species in *aspergillus*, *gongronella*, *penicillium*, and *talaromyces*. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1-24. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.585215>
- Ducouso-Détré, A., Lahrach, Z., Fontaine, J., Sahraoui, A. L. H., & Hijri, M. (2024). Cultural techniques capture diverse phosphate-solubilizing bacteria in rock phosphate-enriched habitats. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1280848>
- Elhaisoufi, W., Ghoulam, C., Barakat, A., Zeroual, Y., & Bargaz, A. (2022). Phosphate bacterial solubilization: a key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity. *Journal of Advanced Research*, 38, 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.08.014>
- Estremadoyro, D. F. E. (2022). Impacto de la toxicidad de los residuos sólidos generados por plaguicidas. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 9, 1-16. <http://dx.doi.org/10.18800/kawsaypacha.202201.006>
- Estrada-Gamboa, J., Umaña-Castro, R., Sancho-Blanco, C., & Orozco-Aceves, M. (2023). Aislamiento, identificación y caracterización de cepas bacterianas con potencial de degradación de los plaguicidas clorotalonil y clorpirifos. *Uniciencia*, 37(1), 1-16. <http://dx.doi.org/10.15359/ru.37-1.26>
- Fatima, F., Ahmad, M. M., Verma, S. R., & Pathak, N. (2022). Relevance of phosphate solubilizing microbes in sustainable crop production: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(9), 9283-9296. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03425-9>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2023). *Biorremediación y microorganismos e invertebrados de los suelos implicados en el ciclo de los elementos nutritivos. Comisión de Recursos Genéticos para la Alimentación y la Agricultura, CGRFA-19/23/9.1*. Roma, Italy: FAO.
- Febles-González, J. M., Febles-Díaz, J. M., Amaral-Sobrinho, N. M., Zonta, E., & Maura-Santiago, A. V. (2020). Mitos, realidades e incertidumbres sobre la degradación de los suelos Ferralíticos Rojos en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 41(3), 1-25.

- Gezahegn, G., Feyissa, T., & Rezene, Y. (2023). Replacement of ammonium nitrate by alternative nitrogen sources in MS medium to enhance ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) *in vitro* regeneration. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 154, 89-95. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02513-7>
- Gómez-Beltrán, D. A., Cano, P. A., Villar-Argaiz, P. D. (2021). Destino ambiental y efectos ecológicos de los tres herbicidas más utilizados en Colombia. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia* 16(2), 47-75. <https://doi.org/10.21615/cesmvz.6238>
- González-Hernández, J. C., & Flores-Herrejón, R. D. (2022). Debaryomyces hansenii levadura no-convencional y su potencial Biotecnológico. *Revista Milenaria, Ciencia y Arte*, 20, 18-21. <https://doi.org/10.35830/mcya.vi20.271>
- Goudarzi, T., Tabrizi, L., Alikhani, H. A., Nazeri, V., & Najafi, F. (2023). Phytostimulation properties of indigenous plant growth-promoting bacteria from licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.): Benefits for seed germination and seedling growth. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 10(1), 53-68. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2022.323243.466>
- Guan, N., & Liu, L. (2020). Microbial response to acid stress: mechanisms and applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 51-65. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10226-1>
- Guerrero-Ramírez, J. R., Ibarra-Muñoz, L. A., Balagurusamy, N., Frías-Ramírez, J. E., Alfaro Hernández, L., & Carrillo-Campos, J. (2023). Microbiology and Biochemistry of Pesticides Biodegradation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), 1-47. <https://doi.org/10.3390/ijms242115969>
- Gupta, R., Khan, F., Alqahtani, F. M., Hashem, M., & Ahmad, F. (2024). Plant growth-Rhizobacteria (PGPR) assisted bioremediation of heavy metal toxicity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 196(5), 1-29. <https://doi.org/10.1007/s12010-023-04545-3>
- Gurbanov, R., Kalkanci, B., Karadag, H., & Samgane, G. (2021). Phosphorus solubilizing microorganisms. In I. A. I. Mohd, R. Boddula, M. Rezakazemi (Eds.). *Biofertilizers: Study and Impact* (pp. 151-182). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch5>
- Haridy, Y., Osenberg, M., Hilger, A., Manke, I., Davesne, D., & Witzmann, F. (2021). Bone metabolism and evolutionary origin of osteocytes: novel application of FIB-SEM tomography. *Science Advances*, 7(14), 1-11.
- Hasanuzzaman, M., Mohsin, S. M., Bhuyan, M. H. M. B., Bhuiyan, T. F., Anee, T. I., Masud, A. A. C., & Nahar, K. (2020). Phytotoxicity, environmental and health hazards of herbicides: challenges and ways forward. In M. N. V. Prasad (Ed.). *Agrochemicals detection, treatment and remediation pesticides and chemical* (pp. 55-99). Hyderabad, India: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00003-9>
- Hkudaygulov, G., Chetverikova, D., Bakaeva, M., Kenjieva, A., & Chetverikov, S. (2022). Plant growth promoting Rhizobacteria strain role in protecting crops sensitive to sulfonylurea herbicides from stress. *Journal of Crop Protection*, 11(4), 1-11.
- Hossain, M. M., Rahman, G., Akanda, M. A. M., Solaiman, A. R. M., Islam, M. T., & Rahman, M. M. (2021). Isolation, morphological and biochemical characterization of rhizobacteria from arsenic contaminated paddy soils in Bangladesh: An *in vitro* study. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 7(2), 41-55.
- Ibrahim, M., Iqbal, M., Tang, Y. T., Khan, S., Guan, D. X., & Li, G. (2022). Phosphorus mobilization in plant-soil environments and inspired strategies for managing phosphorus: a review. *Agronomy*, 12(10), 1-17. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102539>
- Jatuwong, K., Suwannarach, N., Kumla, J., Penkhrue, W., Kakumyan, P., & Lumyong, S. (2020). Bioprocess for production, characteristics, and biotechnological applications of fungal phytases. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00188>
- Knyazev, Y. V., Ikkert, O. P., Semenov, S. V., Volochaev, M. N., Molochev, M. S., Platunov, M. S., ... & Balaev, D. A. (2022). Superparamagnetic blocking and magnetic interactions in nanoferrihydrate adsorbed on biomineralized nanorod-shaped Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub> crystallites. *Journal of Alloys and Compounds*, 923, 166346. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166346>
- Kour, D., Rana, K. L., Kaur, T., Yadav, N., Halder, S. K., Yadav, A. N., ... & Saxena, A. K. (2020). Potassium solubilizing and mobilizing microbes: Biodiversity, mechanisms of solubilization, and biotechnological implication for alleviations of abiotic stress. In A. K. Saxena (Ed.), *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 177-202). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821140-4.00014-7>
- Kumar, A., Teja, E. S., Mathur, V., & Kumari, R. (2020). Phosphate-solubilizing fungi: Current perspective, mechanisms and potential agricultural applications. In: A. Yadav, S. Mishra, D. Kour, N. Yadav, A. Kumar, (Eds.). *Agriculturally Important Fungi for Sustainable Agriculture* (pp. 121-141). The Netherlands: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45971-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45971-0_6)
- Lonkar, K., & Bodade, R. (2021). Potential role of endophytes in weeds and herbicide tolerance in plants. In H. I. Mohamed, H. Ed. S. El-Beltagi, K. A. Abd-Elsalam, (Eds.). *Plant growth-promoting microbes for sustainable biotic and abiotic stress management* (pp. 227-250). Cham, Switzerland: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66587-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66587-6_10)
- Li, B., Wang, Y., Hu, T., Qiu, D., Francis, F., Wang, S., & Wang, S. (2022). Root-associated microbiota response to ecological factors: role of soil acidity in enhancing citrus tolerance to Huanglongbing. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.937414>
- Lu, H., Tan, Y., Zhang, Y., Li, Z., Chen, J., Gao, C., ... & Luo, X. (2022). Osteoclastogenesis inhibitory phenolic derivatives produced by the Beibu Gulf coral-associated fungus *Acremonium sclerotigenum* GXIMD 02501. *Fitoterapia*, 159, 105201. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2022.105201>
- Mercl, F., García-Sánchez, M., Kulhánek, M., Košnář, Z., Száková, J., & Tlustoš, P. (2020). Improved phosphorus fertilisation efficiency of wood ash by fungal strains *Penicillium* sp. PK112 and *Trichoderma harzianum* OMG08 on acidic soil. *Applied Soil Ecology*, 147, 103360. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.09.010>
- Parvez, M., Hussain, F., Khan, M., & Sajid, H. (2023). Characterization of phosphate solubilizing fungal endophyte associated with roots of *Coriandrum sativum* L growing in water stressed soil. *Symbiosis*, 89, 83-94.
- Patel, D., & Goswami, D. (2020). Phosphorus solubilization and mobilization: mechanisms, current developments, and future challenge. In A. Yadav, A. Rastegari, N. Yadav, D. Kour, (Eds.). *Advances in Plant Microbiome and Sustainable Agriculture: Functional Annotation and Future Challenges* (pp. 1-20). Singapore: Springer Singapore.
- Paul, R. A. I., Ammaiappan, A., Srinivasan, G., & Vendan, R. T. (2023). Efficacy of herbicides on nutrient uptake of crop, weed and its impact on soil microflora of irrigated maize (*Zea mays* L.). *International Journal Plant Soil Science* 35(1), 103-111. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2023/v35i12749>
- Pérez-Cordero, A., Barraza-Roman, Z., & Martínez-Pacheco, D. (2015). Identificación de bacterias endófitas resistentes a plomo, aisladas de plantas de arroz. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2), 267-276. <https://doi.org/10.15517/am.v26i2.19281>
- Pileggi, M., Pileggi, S. A. V., & Sadowsky, M. J. (2020). Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities. *Heliyon*, 6(12), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05767>
- Raju, N. N., Venkatesan, S. N., Ravi, S. N., Zhou, S., Kulothungan, V. K., & Sankaranarayanan, M. (2024). Microbial whole-cell platforms for the synthesis of tricarboxylic acid cyclebased platform chemicals. In D. V. N. Pamidimarri, S. Chauhan, B. Velramar, (Eds.). *Whole-Cell Biocatalysis* (pp. 123-171). New York: Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003413134>
- Rathod, R. K., Bhalerao, V. P., Margal, P. B., & Kamble, B. M. (2021). Soil Microflora as influenced by pre and post emergence herbicide in sweet corn grown in vertisols. *International Journal Curr Microbiology and Applied Science*, 10(1), 2794-2801. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.323>

- Saeed, Q., Xiukang, W., Haider, F. U., Kučerik, J., Mumtaz, M. Z., Holatko, J., ... & Mustafa, A. (2021). Rhizosphere bacteria in plant growth promotion, biocontrol, and bioremediation of contaminated sites: a comprehensive review of effects and mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(19), 1-41. <https://doi.org/10.3390/ijms221910529>
- Santana-Flores, A., Sánchez-Ayala, A., Romero-Ramírez, Y., Toledo-Hernández, E., Ortega-Acosta, S. Á., & Toribio-Jiménez, J. (2020). Aislamiento e identificación de bacterias tolerantes y bioacumuladoras de metales pesados, obtenidas de los jales mineros El Fraile, México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 1-9. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.430>
- Saygılı, V. I., Kadioğlu, İ., Belgüzar, S., & Yanar, Y. (2024). Effect of Some Herbicide (Metribuzin, Pendimethalin and Fluazifop-p-Butyl) on *Bacillus cereus* and *Pseudomonas putida*. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, 40(3), 155-162.
- Shahid, M., & Khan, M. S. (2022). Ecotoxicological implications of residual pesticides to beneficial soil bacteria: a review. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 188, 105272. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105272>
- Shahid, M., Khan, M. S., & Singh, U. B. (2023). Pesticide-tolerant microbial consortia: Potential candidates for remediation/clean-up of pesticide-contaminated agricultural soil. *Environmental Research*, 236(1) 116724. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116724>
- Silva, L. I. D., Pereira, M. C., Carvalho, A. M. X. D., Buttrós, V. H., Pasqual, M., & Dória, J. (2023). Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. *Agriculture*, 13(2), 1-30. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>
- Singh, U., Walvekar, V. A., & Sharma, S. (2020). Microbiome as sensitive markers for risk assessment of pesticides. In P. K. Srivastava, V. P. Singh, A. Singh, D. K. Tripathi, S. Singh, S. M. Prasad, D. K. Chauhan, (Eds.). *Pesticides in Crop Production: Physiological and Biochemical Action*, (pp. 89-108). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119432241.ch6>
- Sotomayor, A., Mejía, P., Morochó, D., Gaona, P., Viteri, P., Medina, L., & Viera, W. (2022). Consorcios microbianos aplicados en un sistema de producción de plántulas de aguacate cultivar 'Criollo'. *Manglar*, 19(1), 15-23. <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2022.002>
- Srinivasulu, M., Maddela, N. R., Chandra, M. S., Shankar, P. C., Rangaswamy, V., & 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>
- Suarez, L. Y., & Riaño, A. L. R. (2022). Potencial biotecnológico de levaduras identificadas en norte de Santander. *Prospectiva* 20(1). 1-10.
- Tian, J., Ge, F., Zhang, D., Deng, S., & Liu, X. (2021). Roles of phosphate solubilizing microorganisms from managing soil phosphorus deficiency to mediating biogeochemical P cycle. *Biology*, 10(2), 1-19. <https://doi.org/10.3390/biology10020158>
- Timofeeva, A., Galyamova, M., & Sedykh, S. (2022). Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. *Plants*, 11(16), 1-23. <https://doi.org/10.3390/plants11162119>
- Varghese, E. M., Kour, B., Ramya, S., Kumar, N. S., Jisha, M. S., & Ramakrishnan, B. (2022). Rhizosphere microbe-mediated alleviation of aluminum and iron toxicity in acidic soils. In R. C. Dubey, P. Kumar, (Eds.). *Rhizosphere Engineering* (pp. 499-526). Cambridge, MA, USA: Academic Press.
- Vera-Morales, M., López-Medina, S. E., Naranjo-Morán, J., Quevedo, A., & Ratti, M. F. (2023). Nematophagous fungi: A review of their phosphorus solubilization potential. *Microorganisms*, 11(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010137>
- Vilchez-Chávez, M., Flores-Santos, J. C., Calderón-Toledo, S., Palma-Villanueva, J., & Zavaleta, A. I. (2024). Bacterias productoras de hidrolasas aisladas de suelos de cultivos de arroz: Caracterización fenotípica y molecular. *Manglar*, 21(2), 177-182. <http://doi.org/10.57188/manglar.2024.018>
- Wang, K., Ren, T., Yan, J., Zhu, D., Liao, S., Zhang, Y., ... & Lu, J. (2022). Straw returning mediates soil microbial biomass carbon and phosphorus turnover to enhance soil phosphorus availability in a rice-oilseed rape rotation with different soil phosphorus levels. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 335, 107991. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107991>
- Xu, H., Chen, Z., Wu, X., Zhao, L., Wang, N., Mao, D., ... & Luo, Y. (2021). Antibiotic contamination amplifies the impact of foreign antibiotic-resistant bacteria on soil bacterial community. *Science of the Total Environment*, 758, 143693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143693>
- Zhang Yuan, X., Xiong, T., Wang, H., & Jiang, H., Yuan, X., Xiong, T., Wang, H., & Jiang, L. (2020). Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods. *Chemical Engineering Journal*, 398, 125657. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125657>