

Fecha de recibido: 23-04-2025

Fecha de aceptado: 20-02-2026

DOI: 10.22490/21456453.9781

CAPACIDAD FUNCIONAL DE BACTERIAS SOLUBILIZADORAS DE FOSFATO AISLADAS DE SUELOS CULTIVADOS CON *ELAEIS GUINEENSIS*

FUNCTIONAL CAPACITY OF PHOSPHATE- SOLUBILIZING BACTERIA ISOLATED FROM SOILS CULTIVATED WITH *ELAEIS GUINEENSIS*

Karen Margarita Cotes Solano¹

Luz Elena Márquez Jiménez²

Carla Cecilia Bolaños Contreras³

Juan Carlos Prada Herrera⁴

Citación: Cotes Solano, K. M., Márquez Jiménez, L. E., Bolaños Contreras, C. C. y Prada Herrera, J. C. (2026). Capacidad funcional de bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de suelos cultivados con *Elaeis guineensis*. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(2), 229-246.

<https://doi.org/10.22490/21456453.9781>

¹ Estudiante de pregrado de microbiología, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia.
kmargaritacotes@unicesar.edu.co

² Estudiante de pregrado de microbiología, Universidad Popular de Cesar, Valledupar, Colombia.
lemarquez@unicesar.edu.co

³ Magíster en Gerencia de Proyectos de Investigación y Desarrollo, Docente de la Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. carlaceciliaabc@gmail.com

⁴ Magíster en Microbiología, Docente de la Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. juanprada@unicesar.edu.co

RESUMEN

Contextualización: Las bacterias solubilizadoras de fosfato son importantes en los suelos agrícolas para la transformación del fósforo insoluble en formas asimilables por las plantas, mejorando su fertilidad, la eficiencia en el uso de fertilizantes y la sostenibilidad de los sistemas productivos. El fósforo es un nutriente esencial para el desarrollo vegetal; sin embargo, en muchos suelos agrícolas se encuentra en formas poco disponibles, lo que limita su absorción en cultivos de importancia económica como la palma africana (*Elaeis guineensis*).

Vacío de conocimiento: En el departamento del Cesar, donde este cultivo tiene alta relevancia económica, existe escasa información sobre la diversidad y el potencial funcional de las BSF presentes en la rizósfera, lo que restringe el desarrollo de biofertilizantes adaptados a condiciones locales.

Propósito: El objetivo fue aislar, identificar y caracterizar bacterias solubilizadoras de fosfato en suelos cultivados con palma africana en el Cesar, evaluando su capacidad de producción de ácidos orgánicos.

Metodología: Se recolectaron 30 muestras de suelo rizosférico en cinco plantaciones comerciales. Las bacterias se aislaron en medio selectivo con fosfato insoluble y se evaluó su índice de solubilización. La identificación se realizó mediante amplificación del gen 16S rRNA y el perfil de ácidos orgánicos se determinó por cromatografía líquida de alta resolución.

Resultados y conclusiones: Se aislaron nueve cepas con alta capacidad solubilizadora, identificándose *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Enterobacter cloacae* y *Burkholderia cepacia*, esta última no reportada previamente en el Cesar. Las cepas produjeron ácido glucónico, cítrico y oxálico, evidenciando su potencial para el desarrollo de biofertilizantes regionales.

Palabras clave: ácidos orgánicos, biodiversidad microbiana, cromatografía líquida, microbiología del suelo, palma africana, rizósfera.

ABSTRACT

Contextualization: Phosphate-solubilizing bacteria are important in agricultural soils for the transformation of insoluble phosphorus into forms that can be assimilated by plants, improving fertility, fertilizer use efficiency and the sustainability of production systems. Phosphorus is an essential nutrient for plant growth; however, in many agricultural soils it is found in poorly available forms, which limits its uptake in economically important crops such as African palm (*Elaeis guineensis*).

Knowledge gap: In the department of Cesar, where this crop has high economic relevance, there is little information on the diversity and functional potential of BSF present in the rhizosphere, which restricts the development of biofertilizers adapted to local conditions.

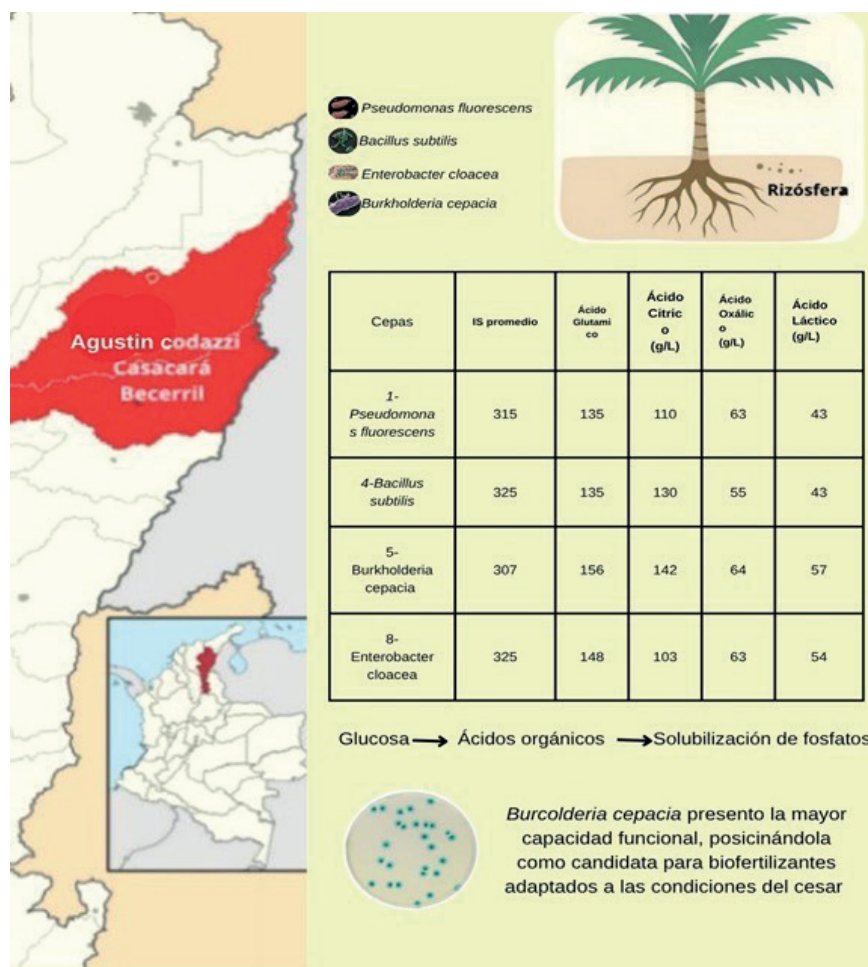
Objective: To isolate, identify and characterize phosphate-solubilizing bacteria in soils cultivated with African palm in Cesar, evaluating their capacity to produce organic

acids. **Methodology:** Thirty rhizospheric soil samples were collected from five commercial plantations. Bacteria were isolated on selective medium with insoluble phosphate and their solubilization rate was evaluated. Identification was performed by amplification of the 16S rRNA gene and the organic acid profile was determined by high performance liquid chromatography.

Results and conclusions: Nine strains with high solubilizing capacity were isolated, identifying *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Enterobacter cloacae* and *Burkholderia cepacia*, the latter not previously reported in Cesar. The strains produced gluconic, citric and oxalic acid, showing their potential for the development of regional biofertilizers.

Keywords: Organic acids; Microbial biodiversity; Liquid chromatography; Soil microbiology; African palm; Rhizosphere

RESUMEN GRÁFICO



1 INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es uno de los macronutrientes más importantes para el desarrollo de las plantas (García et al., 2020), desempeñando funciones importantes en procesos bioquímicos como la fotosíntesis (Rodríguez & Fraga, 1999), la transferencia de energía y la biosíntesis de ácidos nucleicos (Sharma et al., 2013). A pesar de su abundante presencia en los suelos, el fósforo suele encontrarse en formas insolubles no disponibles para las

plantas, lo que limita su absorción y eficiencia agronómica (Khan et al., 2007), obligando al uso intensivo de fertilizantes químicos fosfatados que, aunque resulten ser eficaces en el corto plazo, pueden generar impactos negativos en el ambiente, como la eutrofización de cuerpos de agua y la alteración de la microbiota del suelo (Glick, 2012).

Ante las limitaciones que impiden el acceso de las plantas al fósforo presente en

los suelos, debido a su forma insoluble, las bacterias solubilizadoras de fosfato (BSF) se presentan como una alternativa biológica y eficaz, debido a su potencial metabólico de transformar los compuestos fosfatados insolubles en formas solubles, mediante la secreción de ácidos orgánicos, enzimas y otras sustancias (Rashid et al., 2004a), lo cual facilita la absorción del fósforo por las raíces (Moreno-Conn et al., 2021) y mejora la nutrición vegetal de manera sostenible. Estas bacterias representan una alternativa prometedora a los fertilizantes químicos, ya que promueven el crecimiento vegetal y reducen el impacto ambiental asociado al uso excesivo de insumos sintéticos (Glick, 2012).

Además de facilitar la disponibilidad de fósforo, las bacterias solubilizadoras de fosfato contribuyen a mejorar la estructura y fertilidad del suelo al estimular la actividad microbiana y aumentar la biodiversidad rizosférica (Vassilev et al., 2006). Estas bacterias han sido ampliamente estudiadas por su capacidad de promover el crecimiento vegetal mediante múltiples mecanismos, como la producción de fitohormonas, la fijación biológica de nitrógeno, la síntesis de sideróforos y la inducción de resistencia sistémica en las plantas (Rodríguez & Fraga, 1999). En sistemas agrícolas sostenibles, su uso como biofertilizantes representa una estrategia eficiente y ecológica para disminuir la dependencia de fertilizantes químicos, reducir costos de producción y mejorar el rendimiento de los cultivos (Khan et al., 2009).

En materia metabólica, las BSF destacan por su habilidad de secretar diversos ácidos orgánicos, como ácido glucónico, cítrico,

oxálico y láctico (Oliveira et al., 2017), los cuales, liberan el fósforo inmovilizado en minerales como fosfato de calcio, hierro o aluminio (Illmer & Schinner, 1995). Este proceso de solubilización es altamente eficiente y varía entre especies y condiciones del suelo, lo que resalta la importancia de caracterizar las cepas locales para su aplicación específica (Zúñiga-Silgado et al., 2020). Además, la interacción sinérgica entre diferentes géneros bacterianos, como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Burkholderia* y *Enterobacter*, potencia la efectividad de los consorcios microbianos en programas de biofertilización (Sharma et al., 2013).

En Colombia, la palma africana (*Elaeis guineensis*) es un cultivo de gran importancia económica, especialmente en regiones como el departamento del Cesar. Sin embargo, la degradación del suelo reduce la materia orgánica y altera su estructura, disminuyendo la retención y liberación de nutrientes esenciales como el fósforo; aunque el fósforo total puede ser relativamente alto, la fracción disponible para absorción por las plantas suele ser menor al 1 %, lo que limita procesos clave de crecimiento y desarrollo, afectando directamente la productividad de la palma africana (Jindo et al., 2023).

Algunos estudios han caracterizado comunidades microbianas rizosféricas con potencial de solubilización de fosfato. Por ejemplo, Acevedo, E. et al. (2014) identificaron microorganismos solubilizadores de fosfato en la rizósfera de palma africana en Colombia, incluyendo bacterias y hongos con alta eficiencia de solubilización, y observaron liberación de ácidos orgánicos asociados a la

solubilización de P. Asimismo, estudios en Malasia aislaron bacterias solubilizadoras de fosfato de la rizósfera de palma africana relacionadas con especies de *Burkholderia*, destacando su potencial como biofertilizantes (por ejemplo, *B. arboris* y *B. gladioli*) (Smith et al., 2020). En cultivos distintos, como maíz y trigo, la inoculación con BSF ha demostrado mejorar la disponibilidad de fósforo en el suelo y promover el crecimiento vegetal, lo que respalda la relevancia agronómica de estos microorganismos a nivel

global (De Oliveira et al., 2025; Beltran-Medina et al., 2023). A pesar del potencial de las BSF, pocos estudios han caracterizado la diversidad microbiana rizosférica asociada a este cultivo en el Cesar. El presente estudio tuvo como objetivo aislar e identificar bacterias solubilizadoras de fosfato en suelos cultivados con palma africana en el departamento del Cesar, utilizando herramientas moleculares y cromatográficas para analizar su capacidad funcional.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo y enfoque de investigación

Esta investigación es de tipo experimental con enfoque cuantitativo, dado que se planteó un diseño basado en la recolección y análisis sistemático de datos numéricos, tanto en laboratorio como en campo. Se utilizaron técnicas microbiológicas, moleculares y cromatográficas para el aislamiento, identificación y caracterización funcional de cepas bacterianas solubilizadoras de fosfato. El enfoque cuantitativo permitió establecer relaciones entre variables microbiológicas y agronómicas, generando resultados objetivos, medibles y reproducibles que pueden ser comparados con investigaciones similares a nivel nacional e internacional.

Muestreo

Se recolectaron 30 muestras compuestas de suelo rizosférico en cinco plantaciones

comerciales de palma africana en los municipios de Becerril, Agustín Codazzi y Casacará, todos en el departamento del Cesar (Colombia). El muestreo se realizó siguiendo un diseño sistemático en zig-zag, de acuerdo con las recomendaciones del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2021), lo que permitió obtener una representación de la variabilidad del suelo. En cada sitio de muestreo y siguiendo lo sugerido por Borbón Valverde (2023), se tomaron las muestras entre 0 y 20 cm de profundidad. Las muestras fueron transportadas en condiciones refrigeradas (4 °C) al laboratorio para su análisis inmediato, siguiendo el protocolo de Vassilev et al. (2006).

Procesamiento de muestras

Las muestras fueron homogeneizadas y tamizadas (2 mm). Se tomaron 10 g de suelo de cada muestra, se diluyeron en 90 mL de agua destilada estéril y, luego, se agitaron durante 30 minutos y se realizaron diluciones seriadas

hasta 10^{-6} , siguiendo las recomendaciones de Cappuccino & Sherman (2013).

Aislamiento de cepas

Las diluciones se sembraron por dispersión en placas de agar Pikovskaya (PVK), suplementado con fosfato de calcio insoluble ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) (Pikovskaya, 1948). Las placas se incubaron a 28 °C durante siete días. Pasado el tiempo, se seleccionaron las colonias que formaron halos claros de solubilización y se calcularon los índices de solubilización (IS) mediante la relación diámetro del halo/diámetro de la colonia, ello, acatando lo sugerido por Nautiyal (1999). Se seleccionaron las cepas que presentaron índice de solubilización entre 3,0 y 3,4.

Identificación de cepas mediante PCR

Para la identificación de las cepas, se extrajo el ADN genómico mediante el método de lisis térmica. La amplificación del gen 16S rRNA se realizó utilizando los cebadores universales 27F (5'-AGAGTTTGATCMTG-GCTCAG-3') y 1492R (5'-TACGGYTACC-TTGTTACGACTT-3') (Lane, 1991). Las secuencias obtenidas se compararon con la base de datos NCBI mediante BLAST para identificar las especies de bacterias aisladas.

HPLC para análisis de perfil de ácidos orgánicos secretados

Las cepas seleccionadas en el paso anterior e identificadas por PCR, se cultivaron en medio líquido PVK modificado durante cinco días. El sobrenadante del cultivo fue filtrado y analizado mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) con detector UV a 210 nm, usando una columna C18 y una fase móvil de ácido fosfórico al 0,1 % a 1 mL/min con el fin de cuantificar los ácidos orgánicos de acuerdo con la metodología de Park et al. (2009).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos, como el índice de solubilización (IS) y de la concentración de ácidos orgánicos secretados por las cepas bacterianas fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre cada una de las cepas. Posteriormente, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$) para identificar qué cepas presentaban diferencias significativas entre sí. El análisis fue realizado utilizando el *software* estadístico IBM SPSS Statistics versión 26.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El aislamiento en medio Pikovskaya permitió aislar nueve cepas con halos de solubilización, con índices de solubili-

ción entre 2,66 y 3,25 (Tabla 1). Estas cepas presentaron morfologías coloniales variadas, con bordes regulares y pigmentaciones

blanquecinas o cremosas, lo que sugiere una diversidad fenotípica entre los aislados. La formación de halos claros alrededor de las colonias indicó la capacidad de solubili-

ción de fosfato, lo cual, de acuerdo con Marra et al. (2015), es atribuible a la producción de ácidos orgánicos que disuelven el fosfato de calcio presente en el medio.

Tabla 1.

Índice de solubilización de cepas aisladas

Cepa	Repetición	DC (mm)	DH (mm)	IS (mm)	X IS	DS IS
1	a	5,6	16,7	2,98	3,15	0,15
	b	5,3	17	3,21		
	c	5,2	17	3,27		
2	a	6	18	3,00	2,96	0,10
	b	6,1	17,4	2,85		
	c	6	18,2	3,03		
3	a	4,7	12	2,55	2,80	0,25
	b	4,3	13,1	3,05		
	c	4,8	13,4	2,79		
4	a	5,6	17,4	3,11	3,25	0,13
	b	5,4	18,2	3,37		
	c	5,5	18	3,27		
5	a	5,4	16	2,96	3,07	0,11
	b	4,9	15,6	3,18		
	c	5,1	15,6	3,06		
6	a	6	16,5	2,75	2,70	0,05
	b	6,1	16,4	2,69		
	c	6,2	16,5	2,66		

Cepa	Repetición	DC (mm)	DH (mm)	IS (mm)	X IS	DS IS
7	a	5,1	13,9	2,73	2,86	0,12
	b	5	14,8	2,96		
	c	5	14,5	2,90		
8	a	4,9	16	3,27	3,25	0,04
	b	4,9	15,7	3,20		
	c	4,9	16,1	3,29		
9	a	5,3	14,2	2,68	2,66	0,02
	b	5,5	14,5	2,64		
	c	5,3	14,2	2,68		

DC: Diámetro colonia; DH: Diámetro del halo; IS: Índice de solubilidad.

Fuente: autores.

De acuerdo con Veas Mattheos (2022), las cepas que presentan mayor solubilidad de fosfato mediado por la producción de ácidos orgánicos son aquellas que expresan halos entre 3,0 y 3,4, por tanto, y de acuerdo con la tabla anterior, las cepas que presentaron mayor IS fueron la cepa 1 (3,15 mm), cepa 4 (3,25 mm), cepa 5 (3,07 mm) y la cepa 8 (3,25 mm).

El uso del medio de cultivo Pikovskaya (PVK) en este estudio permitió aislar nueve cepas con índices de solubilización (IS) entre 2,66 y 3,25 mm, lo que indica una alta eficiencia en la solubilización de fosfato. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Yañez-Ocampo (2020), quien reportó halos de solubilización de hasta 20 mm en cepas de *Bacillus pumilus* aisladas de suelos de cultivo de papa. La diferencia en

el tamaño absoluto de los halos puede atribuirse a variaciones en las condiciones a las que son sometidos los experimentos, como el tiempo de incubación, la concentración de fosfato insoluble, el pH del medio y la tasa de crecimiento bacteriano, así como a diferencias metabólicas intrínsecas entre especies y cepas; además, Yañez-Ocampo (2020) reporta diámetros de halo, mientras que en el presente estudio se emplea el índice de solubilización (IS), que normaliza el tamaño del halo respecto al diámetro de la colonia, permitiendo comparaciones más consistentes entre las cepas. Asimismo, Panhwar et al. (2012a) reportaron índices de solubilización entre 1,20 y 3,60 en bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de suelos de arroz, utilizando medio PVK, valores que se encuentran dentro del rango observado en el presente estudio, destacando su utilidad

en la detección de cepas con alta capacidad solubilizadora. Estos hallazgos respaldan la efectividad del medio PVK como herramienta estándar para la selección de BSF en diversos contextos agrícolas.

La identificación molecular reveló la presencia de *Pseudomonas fluorescens* (cepa 1), *B. subtilis* (cepa 4) y *Enterobacter cloacae* (cepa 8), todas previamente reportadas en suelos agrícolas del Cesar (García et al., 2020); además de, *B. cepacia* (cepa 5) que no había sido reportada previamente en este departamento, lo cual constituye un hallazgo novedoso. Esta especie ha mostrado gran capacidad para solubilizar fósforo y promover el crecimiento vegetal en otros contextos agrícolas, como cultivos de arroz, maíz y trigo, donde se ha asociado con incrementos en la disponibilidad de fósforo y el crecimiento radicular de las plantas (Mitra et al., 2020).

La identificación molecular de las cepas aisladas en esta investigación se realizó mediante la amplificación del gen 16S rRNA, permitiendo la clasificación taxonómica precisa de las bacterias. Este enfoque es consistente con el utilizado por Hazra & Pratiwi (2013), quienes emplearon la secuenciación del 16S rRNA para identificar cepas de *Gluconacetobacter* y *Enterobacter* con capacidades solubilizadoras de fosfato. De manera similar, Sridevi & Mallaiah (2009) aislaron y caracterizaron bacterias solubilizadoras de fosfato asociadas a la rizósfera de palma aceitera (*E. guineensis*), identificando mediante secuenciación del gen 16S rRNA especies pertenecientes a los géneros *Pseu-*

domonas, *Bacillus* y *Enterobacter*, los cuales coinciden con los géneros identificados en el presente estudio. Asimismo, Panhwar et al. (2014) emplearon análisis del gen 16S rRNA para establecer relaciones filogenéticas entre bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de suelos cultivados con palma aceitera en Malasia, reportando una alta diversidad taxonómica dominada por *Bacillus* y *Burkholderia*, lo que respalda la recurrencia de estos géneros en sistemas de palma. Estos estudios demuestran que la secuenciación del gen 16S rRNA es una herramienta confiable para la identificación y clasificación de BSF.

Con la finalidad de cuantificar la cantidad de ácidos orgánicos que secretan cada una de las cepas identificadas, se realizó la técnica de HPLC, la cual reveló que las cepas secretan principalmente ácido glucónico, seguido de ácido cítrico, oxálico y láctico, todos ellos relacionados con la solubilización de fosfato por disolución de compuestos minerales insolubles (Illmer & Schinner, 1995).

La figura 1 muestra las concentraciones (g/L) de cuatro ácidos orgánicos clave (glucónico, cítrico, oxálico y láctico), en cuanto al ácido glucónico, *B. cepacia* presentó la mayor producción (1,56 g/L), superando a las demás cepas, lo que indica una alta capacidad de oxidación de glucosa mediada por glucosa deshidrogenasa, fundamental en la solubilización de fosfato cálcico (Marra et al., 2015). *E. cloacae* (1,48 g/L) también mostró un buen desempeño, seguida de *P. fluorescens* y *B. subtilis*, ambas con 1,35 g/L.

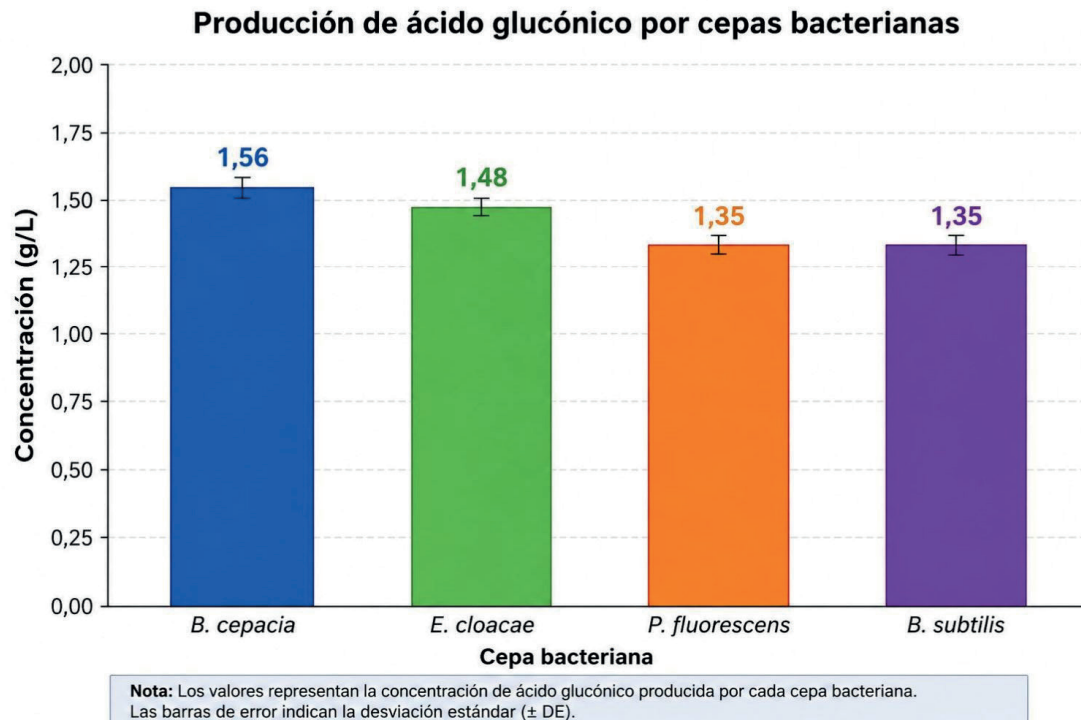


Figura 1. Producción de ácidos orgánicos a partir de bacterias solubilizadoras de fosfato. (Letras diferentes entre tipos de ácidos orgánicos indican diferencia significativa de acuerdo con el test de Tukey).

Fuente: autores.

La producción de ácido cítrico relacionado en la figura 1, en donde nuevamente *B. cepacia* lidera con 1,42 g/L, seguida de *B. subtilis* (1,30 g/L). La capacidad de estas cepas para liberar ácido cítrico sugiere una implicación del metabolismo del ciclo de Krebs desviado hacia rutas de excreción, útil en la quelación de cationes como Ca^{2+} , Fe^{3+} o Al^{3+} (Aguilar Rivera, 2020), que inmovilizan el fósforo. *P. fluorescens* (1,10 g/L) y *E. cloacae* (1,03 g/L) mostraron niveles más bajos, lo que podría traducirse en una menor capacidad quelante.

En el caso del ácido oxálico, la producción fue relativamente homogénea entre *B. cepacia*, *P. fluorescens* y *E. cloacae* con concen-

traciones de 0,64 g/L, 0,63 g/L y 0,63 g/L, respectivamente; mientras que *B. subtilis* mostró una menor producción (0,55 g/L). Al respecto, Ramos Cabrera et al. (2021), publicaron que este ácido es relevante en la movilización de fosfatos por su alta capacidad para formar complejos con metales.

El ácido láctico se expresó en menor concentración en todas las cuatro cepas, si se compara con los demás ácidos; en este caso, *B. cepacia* (0,57 g/L) también lidera la producción, seguida de *E. cloacae* (0,54 g/L). Los niveles más bajos se observaron en *P. fluorescens* y *B. subtilis* (0,43 g/L). Moreno-Conn et al. (2021) sugieren que el ácido

láctico puede contribuir a la solubilización por reducción del pH en la rizósfera, aunque su rol es menos significativo que el de otros ácidos más fuertemente complejantes.

La cepa *B. cepacia* se destaca como la más eficiente en la producción total de ácidos orgánicos, lo que sugiere un metabolismo robusto y diversificado para la solubilización de compuestos fosfatados (Veas Mattheos, 2022). Esta característica le confiere un alto potencial como biofertilizante. Le siguen *E. cloacae* y *B. subtilis*, que también muestran perfiles interesantes, aunque con menor capacidad para la producción de ácidos con función quelante directa. *P. fluorescens*, si bien tiene valores intermedios, podría considerarse en futuros estudios de consorcios microbianos, dada su capacidad para solubilizar fosfato y adaptarse a las condiciones del experimento.

Este estudio reveló que las cepas aisladas secretan principalmente ácido glucónico, seguido de ácido cítrico y oxálico, todos ellos relacionados con la solubilización de fosfato. Estos resultados coinciden con los de Kaur et al. (2021), quienes encontraron que el ácido glucónico es el principal ácido orgánico producido por cepas de BSF en presencia de diferentes fuentes de fosfato insoluble. Además, estudios previos con bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de suelos de arroz y maíz reportaron la producción significativa de ácido glucónico, cítrico y oxálico mediante HPLC, resaltando la consistencia de

estos metabolitos como mecanismos comunes en BSF (Panhwar et al., 2012b; Rashid et al., 2004b). Estos hallazgos corroboran que la producción de ácidos orgánicos es un mecanismo clave en la solubilización de fosfato por parte de BSF.

Finalmente, los resultados de este estudio amplían el conocimiento sobre la microbiota rizosférica de palma africana en el Cesar, evidenciando la presencia de géneros dominantes como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter* y *Burkholderia*. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos realizados en Colombia y Malasia, donde se reporta que la rizósfera de *Elaeis guineensis* alberga bacterias solubilizadoras de fosfato de los mismos géneros, asociadas a la disponibilidad de fósforo y la promoción del crecimiento vegetal (Sridevi & Mallaiah, 2009; Panhwar et al., 2014; Nugraha et al., 2019; Roslan et al., 2025). En particular, la identificación de *B. cepacia* en el Cesar constituye un hallazgo novedoso, reforzando la importancia de caracterizar cepas locales con potencial biotecnológico para el desarrollo de biofertilizantes adaptados a condiciones agroecológicas regionales. Además, la producción de ácidos orgánicos (glucónico, cítrico, oxálico y láctico) por estas cepas coincide con los perfiles reportados en otros estudios, confirmando que la secreción de metabolitos quelantes es un mecanismo clave en la solubilización de fosfatos minerales.

4 CONCLUSIONES

La investigación evidencia el potencial biotecnológico de las bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas en suelos cultivados con palma africana en el departamento del Cesar. Se identificaron cepas de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Enterobacter* y *Burkholderia*, las cuales demostraron la capacidad para transformar fosfatos insolubles en formas disponibles para las plantas, principalmente mediante la producción de ácidos orgánicos como el glucónico, cítrico, oxálico y láctico. Esta actividad metabólica representa una alternativa ecológica frente al uso intensivo de fertilizantes químicos y un recurso estratégico para mejorar la eficiencia en la nutrición fosfatada, especialmente en agroecosistemas tropicales.

Entre las cepas aisladas, *B. cepacia* destacó por su mayor índice de solubilización (3,25) y alta producción de ácidos orgánicos, posicionándose como una candidata ideal para el desarrollo de biofertilizantes adaptados a las condiciones locales. Su aislamiento en el Cesar constituye un hallazgo novedoso que fortalece el conocimiento sobre el microbiota rizosférica de la palma africana, un cultivo de alta relevancia económica. Además, la identificación molecular y funcional de estas cepas representa un avance clave para la generación de bioinsumos que promuevan una agricultura más sostenible, resiliente y alineada con los objetivos de conservación ambiental.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: revisión bibliográfica, diseño metodológico, muestreo de suelo, aislamiento bacteriano en medio Pikovskaya, evaluación del IS, ejecución de pruebas de laboratorio y análisis de resultados.

Autor 2: búsqueda y análisis de literatura científica, apoyo en la fase experimental (identificación molecular por PCR y análisis

cromatográfico HPLC), organización y tabulación de datos, interpretación de resultados, redacción del manuscrito.

Autor 3: asesoría científica y metodológica, acompañamiento en el diseño experimental, supervisión de la ejecución en laboratorio.

Autor 4: supervisión académica y logística.

AGRADECIMIENTOS

A la Asociación de Palmicultores del Cesar por su apoyo en la recolección de muestras y por facilitar el acceso a las plan-

taciones, lo cual fue fundamental para el desarrollo de esta investigación.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Acevedo, E., Galindo-Castañeda, T., Prada, F., Navia, M., Romero, H. M. (2014). Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Colombia. *Applied Soil Ecology*, 80, 26-33.
- Aguilar Rivera, K. A. (2020). Aislamiento de bacterias solubilizadoras de fosfato del suelo cultivado con papa (*Solanum tuberosum* L.). [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMex. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/109176>
- Beltran-Medina, I., Romero-Perdomo, F., Molano-Chavez, L., Gutiérrez, A. Y., Silva, A. M. M., & Estrada-Bonilla, G. (2023). Inoculation of phosphate-solubilizing bacteria improves soil phosphorus mobilization and maize productivity. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 126, 21-34.
- Borbón Valverde, L. F. (2023). Evaluación de *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* y *Streptomyces sp.*, como potenciales microorganismos solubilizadores de fósforo (P) en un suelo Andisol. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional, Costa Rica]. Repositorio UNA. <https://repositorio.una.ac.cr/items/12c-61fb3-bfd0-4e48-b99b-42abde6bbb89>
- Cappuccino, J. G., & Sherman, N. (2013). Microbiology: A Laboratory Manual (10th ed.). Pearson.
- De Oliveira, R. G., Lana, U. G. d. P., de Oliveira-Paiva, C. A., Campolino, M. L., de Avelar, J. V. S. A., Gomes, E. A., Santos, T. T., dos Santos, F. C., & Tinôco, S. M. d. S. (2025). Phosphate-solubilizing bacteria and phosphorus fertilization shape microbial dynamics in the maize rhizosphere. *Diversity*, 17(10), 711.

- 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>
- Fankem, H., Nwaga, D., Deubel, A., Dieng, L., Merbach, W., & Etoa, F. X. (2006). Occurrence and functioning of phosphate solubilizing microorganisms from oil palm tree (*Elaeis guineensis*) rhizosphere in Cameroon. *African Journal of Biotechnology*, 5(24), 2450-2460.
- García, L., Ramírez, M. y Padilla, D. (2020). Diversidad microbiana rizosférica en suelos del departamento del Cesar. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(1), 45-54.
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 1-15. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.6064/2012/963401>
- Hazra, F., & Pratiwi, E. (2013). Isolation, Characterization, and Molecular Identification of Phosphate Solubilizing Bacteria from Several Tropical Soils. *Journal of Tropical Soils*, 18(1), 67-74. https://www.researchgate.net/publication/271128649_Isolation_Characterization_and_Molecular_Identification_of_Phosphate_Solubilizing_Bacteria_from_Several_Tropical_Soils
- Illmer, P., & Schinner, F. (1995). Solubilization of inorganic calcium phosphates — Solubilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(3), 257-263. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)00190-U](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)00190-U)
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2021). *Descripción y muestreo de suelos* (Código INGAGPC0505). Subdirección de Agrología. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/ingag-pc05-05_descripcion_y_muestreo_de_suelos.pdf
- Irawan, A. F., Baskara, G., Wandri, R., & Asmono, D. (2020). Isolation and solubilisation of inorganic phosphate by *Burkholderia* spp. from the rhizosphere of oil palm. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 23(5), 667-673. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2020.667.673>
- Jindo, K., Audette, Y., Lopez Olivares, F., Canellas, L. P., Smith, D. S., & Voroney, R. P. (2023). Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(29), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00401-y>
- Kaur, C., Selvakumar, G., & Upreti, K. K. (2021). Organic Acid Profiles of Phosphate Solubilizing Bacterial Strains in the Presence of Different Insoluble Phosphatic Sources Under In vitro Buffered Conditions. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 15(2), 1006-1015. <https://doi.org/10.22207/JPAM.15.2.59> Microbiology Journal+1 Microbiology Journal+1
- Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2007). The role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture.

- Agronomy for Sustainable Development*, 27(1), 29-43.
- Khan, M. S., Zaidi, A., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P. A. (2009). Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi – Current perspective. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 55(2), 125-145. <https://doi.org/DOI:10.1080/03650340902806469>
- Lane, D. J. (1991). 16S/23S rRNA sequencing. In Stackebrandt, E., & Goodfellow, M. (Eds.), *Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics*, 115-175. John Wiley & Sons.
- Marra, L. M., Oliveira-Longatti, S. M., Soares, C. R. F. S., Lima, J. M., Olivares, F. L., & Moreira, F. M. S. (2015). Initial pH of medium affects organic acids production but do not affect phosphate solubilization. *Brazilian Journal of Microbiology*, 46(2), 367-375. <https://doi.org/10.1590/S1517-838246246220131102>
- Moreno-Conn, L. M., López-Casallas, M. y Cruz Barrera, F. M. (2021). Solubilización de fosfatos por bacterias del género *Burkholderia* aisladas de oxisoles de la altillanura colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2), e1897. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1897
- Nautiyal, C. S. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 170(1), 265-270.
- Oliveira, C. A., Alves, V. M. C., Marriel, I. E., Gomes, E. A., Scotti, M. R., Carneiro, N. P., Guimarães, C. T., & Schaffert, R. E. (2017). Phosphate solubilizing microorganisms: their role in crop production. *Biotechnology Advances*, 35(1), 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.10.003>
- Panhwar, Q. A., Othman, R., Rahman, Z. A., Meon, S., & Ismail, M. R. (2012). Iso-lation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from aerobic rice. *African Journal of Biotechnology*, 11(11), 2711-2719. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/100662AJOLDOI:10.5897/AJB10.2218>
- Panhwar(a), Q. A., Radziah, O., Zaharah, A. R., Sariah, M., & Mohd Razi, I. (2014). Iso-lation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from aerobic rice and oil palm soils. *African Journal of Microbiology Research*, 8(3), 179-187.
- Panhwar(b), Q. A., Radziah, O., Zaharah, A. R., Sariah, M., & Mohd Razi, I. (2012). Iso-lation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from aerobic rice and oil palm soils. *African Journal of Microbiology Research*, 8(3), 179-187.
- Park, J. H., Bolan, N., Megharaj, M., & Naidu, R. (2009). Comparative value of phosphate sources on the growth and nutrient uptake of a legume–rhizobium symbiotic system. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(5), 613-620.
- Pikovskaya, R. I. (1948). Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species. *Microbiologiya*, 17, 362-370. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1514468>

- Ramos Cabrera, E. V., Delgado Espinosa, Z. Y., Murillo Muñoz, R. A., Muños Días, V. E. y Hoyos García, J. (2021). Evaluación de bacterias endofíticas solubilizadores de fósforo en café, una alternativa sostenible. *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 1-10. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1554>
- Rashid, M., Charles, T. C., & Glick, B. R. (2004a). Isolation and characterization of new plant growth-promoting bacterial strains from canola and other crops. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(9), 1507-1516.
- Rashid, M., Khalil, S., Ayub, N., Alam, S., & Latif, F. (2004b). Organic acids production and phosphate solubilization by phosphate solubilizing microorganisms (PSM) under in vitro conditions. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7(2), 187-196. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2004.187.196>
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4-5), 319-339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- Roslan, H., Omar, R., & Sariah, M. (2025). Peng, S. H. T., Chee, K. H., Saud, H. M., Yusop, M. R., & Tan, G. H. (2023). Potential Novel Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Bio-Organic Fertilizer Production in the Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Malaysia. *Applied Sciences*, 13(12), 7105. <https://doi.org/10.3390/app13127105>
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
- Sridevi, M., & Mallaiah, K. V. (2009). Phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Journal of Plantation Crops*, 37(2), 158-163. DOI: 10.1007/s12088-009-0005-1
- Vassilev, N., Vassileva, M., & Nikolaeva, I. (2006). Simultaneous P-solubilizing and biocontrol activity of microorganisms: potentials and future trends. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 71(2), 137-144. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0380-z>
- Veas Mattheos, K. (2022). Bacterias solubilizadoras de fosfato asociadas a cianolíquenes *Peltigera rufescens* creciendo en praderas del sur de Chile. [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio UChile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/196114>
- Yañez-Ocampo, G. (2020). Isolated Phosphate-Solubilizing Soil Bacteria Promotes In vitro Growth of *Solanum tuberosum* L. *Polish Journal of Microbiology*, 69(3), 357-365. <https://doi.org/10.33073/pjm-2020-039PubMed+2Sciendo+2Sciendo+2DOI:10.33073/pjm-2020-039>
- Zúñiga-Silgado, D., Rivera-Leyva, J. C., Coleman, J. J., Sánchez-Reyez, A., Valencia-Díaz, S., Serrano, M., deBashan, L.

E., & Folch-Mallol, J. L. (2020). Soil type affects organic acid production and phosphorus solubilization efficiency mediated

by several native fungal strains from Mexico. *Microorganisms*, 8(9), 1337. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091337>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.