Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

Abanico Microbiano. Enero-Diciembre, 2026; 5: 1-16. https://doi.org/10.21929/abanicomicrobiano/2026.5
Artículo Original. Recibido: 28/08/2026. Aceptado: 01/10/2026. Publicado: 05/11/2026. Clave: e2026-5.
https://www.youtube.com/watch?v=PD3lQ5j0bbA



Caracterización de bacterias halotolerantes aisladas de suelos salinos del delta del río Cauto, Cuba

Characterization of halotolerant bacteria isolated from saline soils of the Cauto river delta, Cuba

Ortega-García Marisel*[1] ID, Ríos-Rocafull Yoania[1] ID, Zelaya-Molina Lily[2] ID, Chávez-Díaz Ismael[2] ID**

[1]Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt", Departamento de Recursos Microbianos y Productos Bioactivos. La Habana, Cuba. [2]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Recursos Genéticos. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. [3]Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Departamento de Fisiología Vegetal, Mayabeque, Cuba. *Autor Responsable: Ortega-García Marisel. **Autor para correspondencia: Zelaya-Molina Lily. E-mail: mariselortega9@gmail.com, dpagrobiotec@inifat.co.cu, zelaya.lily@inifap.gob.mx, chavez.fernando@inifap.gob.mx

RESUMEN

La salinidad del suelo constituye una limitante para la productividad agrícola y plantea la necesidad de identificar microorganismos adaptados a estas condiciones con potencial para favorecer el crecimiento vegetal. El objetivo de este estudio fue aislar y caracterizar bacterias halotolerantes procedentes de suelos salinos del delta del río Cauto, Cuba, y evaluar sus atributos funcionales y su efecto sobre el crecimiento de plantas de tomate. Se obtuvieron 21 morfotipos bacterianos, de los cuales cuatro mostraron crecimiento a 200 mM de NaCl y fueron seleccionados para su caracterización. El análisis filogenético del gen 16S rRNA permitió asignarlos al género *Bacillus*. Las cuatro cepas mostraron crecimiento en medio libre de nitrógeno, capacidad para solubilizar fosfato de calcio y producir sideróforos; además, se detectó actividad enzimática para peroxidasas, amilasas, esterasas y celulasas, mientras que algunas cepas presentaron actividad proteasa y lipasa. Ninguna produjo compuestos indólicos ni solubilizó potasio. En condiciones de invernadero, la inoculación de las cepas favoreció el crecimiento de los cultivares de tomate T-60 y FL-5 respecto al control. La cepa GR3 destacó por el incremento en la longitud de las raíces, mientras que GR13 presentó los mayores valores de número de hojas, diámetro del tallo y masa seca. Estos resultados evidencian la presencia de bacterias halotolerantes con diversos atributos funcionales y efectos favorables sobre el crecimiento de tomate, lo que las posiciona como recursos microbianos de interés para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de inoculantes para sistemas agrícolas afectados por salinidad.
Palabras clave: *Bacillus,* bioinoculantes, rizobacterias.

ABSTRACT

Soil salinity is a major constraint to agricultural productivity and highlights the need to identify microorganisms adapted to saline conditions with the potential to promote plant growth. This study aimed to isolate and characterize halotolerant bacteria from saline soils in the Cauto delta river, Cuba, and to evaluate their functional traits and effects on tomato plant growth. Twenty-one bacterial morphotypes were obtained, of which four showed growth at 200 mM NaCl and were selected for further characterization. Phylogenetic analysis of the 16S rRNA gene assigned the isolates to the genus Bacillus. All four strains

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

grew in nitrogen-free medium and were able to solubilize calcium phosphate and produce siderophores. In addition, peroxidase, amylase, esterase, and cellulase activities were detected, while some strains also showed protease and lipase activities. None of the strains produced indolic compounds or solubilized potassium. Under greenhouse conditions, inoculation with the bacterial strains promoted the growth of tomato cultivars T-60 and FL-5 compared with the control. Strain GR3 showed the greatest increase in root length, whereas GR13 presented the highest values for leaf number, stem diameter, and seedling dry mass. These results demonstrate the presence of halotolerant bacteria with diverse functional traits and beneficial effects on tomato growth, highlighting their potential as microbial resources for further research aimed at developing inoculants for agricultural systems affected by salinity.
Keywords: *Bacillus,* bioinoculants, rhizobacteria.

INTRODUCCIÓN

La salinidad del suelo constituye uno de los principales factores limitantes para la productividad agrícola en zonas áridas, semiáridas y costeras, debido a sus efectos osmóticos, iónicos y oxidativos sobre el crecimiento de las plantas y la actividad biológica del suelo (Wille *et al*., 2019). A escala mundial, este problema afecta grandes extensiones de tierra y provoca la degradación de agroecosistemas, la disminución del rendimiento de los cultivos y la pérdida de biodiversidad microbiana (da Silva *et al.,* 2023).

En Cuba, la salinidad tiene una importancia especial, ya que más de un millón de hectáreas se encuentran afectadas, lo que representa una proporción significativa del territorio agrícola. De ellas, el 14% se localiza en zonas cultivadas (García-Reyes *et al*., 2021). Las provincias orientales figuran entre las más impactadas, con cerca del 65 % de sus suelos agrícolas salinizados. En este contexto, el delta del río Cauto, en la provincia Granma, constituye una de las áreas cubanas donde la salinidad del suelo representa una restricción ambiental persistente (Vázquez-Glaría *et al*., 2021). Además, estudios previos han señalado que en el Valle del Río Cauto existen suelos con conductividad eléctrica elevada y condiciones edáficas adversas para la agricultura, lo que ha favorecido la búsqueda de microorganismos residentes adaptados a estos ambientes (Ávila-Amador *et al*., 2022). Este interés se relaciona no solo con la ecología del suelo, sino también con su posible aplicación en biotecnología agrícola, especialmente en la obtención de bioinoculantes con capacidad de tolerar o mitigar el estrés salino (Fanai *et al*., 2024).

Las bacterias de ambientes salinos y halotolerantes han despertado creciente atención internacional por su capacidad de sobrevivir bajo estas condiciones y por los beneficios que pueden aportar a las plantas (da Silva *et al.,* 2023). Diversas investigaciones han demostrado que estos microorganismos pueden participar en procesos como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de nutrientes, la producción de fitohormonas, la síntesis de exopolisacáridos y la protección frente al estrés abiótico (Fanai *et al*., 2024). En suelos salinos, además, la microbiota suele verse reducida en número, actividad y diversidad, por lo que el aislamiento de cepas residentes constituye una estrategia útil tanto para comprender el funcionamiento ecológico del sistema, como para identificar recursos microbianos con potencial agronómico (da Silva *et al.,* 2023).

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

En Cuba existen antecedentes importantes sobre el estudio de bacterias asociadas a leguminosas en suelos salinos. Uno de los trabajos más relevantes fue la caracterización de rizobios aislados de nódulos de frijol caupí en suelos salinos del Valle del Río Cauto, donde se identificaron cepas relacionadas con *Bradyrhizobium liaoningense* y *Bradyrhizobium yuanmingense*, además de un aislamiento registrado como *Rhizobium radiobacter*. Este estudio demostró que, aun bajo condiciones de salinidad, alcalinidad y temperatura elevada, existen bacterias nativas capaces de establecer simbiosis y sobrevivir en ambientes adversos, aunque la diversidad observada fue limitada (Gómez-Padilla *et al*., 2017). Asimismo, se ha reportado la respuesta positiva de combinaciones de rizobios nativos y plantas hospedantes en el Valle del Cauto, lo que refuerza la importancia de continuar la búsqueda de microorganismos autóctonos adaptados a estas condiciones (Gómez-Padilla *et al*., 2016).

La importancia de estas investigaciones permite ampliar el conocimiento sobre la diversidad bacteriana de ecosistemas salinos cubanos y contribuye a la identificación de cepas con rasgos de tolerancia que podrían emplearse en futuros programas de biofertilización, biorremediación o mejoramiento de la eficiencia nutricional de cultivos en suelos afectados por sales como estrategias de manejo sostenible en zonas agrícolas vulnerables. Por todo lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo aislar y caracterizar bacterias halotolerantes a partir de suelos salinos del delta del río Cauto con el fin de explorar su posible uso como inoculantes bacterianos promotores del crecimiento vegetal en cultivos expuestos a altas concentraciones de sal.

MATERIAL Y MÉTODOS

Entre los años 2024 y 2025 se realizaron muestreos de suelo de tipo hidromórfico y ligeramente salinizado, con valores de conductividad eléctrica de 2.55 a 4 dS m^{-1} (Hernández-Jiménez *et al*., 2023), en 15 fincas de agroecosistemas agrícolas independientes pertenecientes al delta del río Cauto, municipio Río Cauto, provincia de Granma, Cuba. Estos suelos presentaban un drenaje deficiente, topografía llana, fertilidad natural media a baja y pH ácido. En cada finca se recolectaron cinco submuestras a 20 cm de profundidad con un barreno de suelo, se siguió un patrón zigzag; posteriormente se homogenizaron para obtener una muestra compuesta por finca, con una masa final aproximada de 1 kg (Villalba-Martínez & Encina-Rojas, 2024).

Las muestras compuestas se procesaron mediante dilución seriada para el aislamiento de bacterias en medio de cultivo Agar Nutritivo (Rodríguez-Martínez & Zhurbenko, 2018). A partir de estas se determinaron los morfotipos presentes en la dilución 1×10^{-5}; una cepa representativa de cada morfotipo se purificó y se le asignó un código con la abreviatura GR, en referencia a la provincia de Granma. Para evaluar la tolerancia a la salinidad, Los microorganismos aislados se sembraron en el mismo medio suplementado con diferentes concentraciones de NaCl (0, 50, 150 y 200 mM) y se incubaron a 30 °C

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

durante 24 h, seleccionándose únicamente aquellas capaces de crecer en la máxima concentración evaluada (200 mM).

Identificación y caracterización de los aislados bacterianos

Las bacterias seleccionadas se clasificaron con base en sus características morfológicas a nivel macroscópico (forma, color, borde, elevación y superficie de las colonias). Por microscopía se observó su forma celular y estructura de la pared celular bacteriana mediante la tinción de Gram, para lo cual se utilizaron cultivos frescos de 24 h. Además, se ejecutaron pruebas de DNAsa y coagulasa, para evaluar posible patogenicidad y garantizar la inocuidad de los aislados (Madigan *et al*., 2019).

La identificación de las cepas se realizó mediante el análisis filogenético del gen 16S rRNA. La amplificación y secuenciación fueron efectuadas por la empresa Macrogen Inc., en Seúl, República de Corea, con los cebadores universales 27F/1493R y 785F/907R, respectivamente. Las secuencias obtenidas se editaron con BioEdit v.7.0.9.0 y se compararon con la base de datos GenBank mediante búsquedas BLAST para conformar una base de secuencias de cepas tipo. El árbol filogenético se construyó con MEGA 7. mediante el método de máxima verosimilitud, con 1,000 repeticiones bootstrap; la selección del modelo de sustitución nucleotídica se realizó con jModelTest 2 y los porcentajes de identidad se determinaron con MatGAT v.2.01.

Caracterización de las bacterias como promotoras del crecimiento vegetal

La capacidad de los aislados para promover el crecimiento vegetal se evaluó en medios de cultivo específicos. Las bacterias se sembraron por picadura y se incubaron a 28 °C durante 24-48 h. Para interpretar el índice de actividad (IA), se midió el tamaño del halo (TH) y de la colonia (TC) en tres direcciones. A partir de los promedios se determinó el índice mediante la fórmula (IA=TH/TC).

La capacidad diazotrófica de los aislados se evaluó mediante el crecimiento del microorganismo según Elbeltagy *et al*. (2001), sobre medio Winogradsky libre de nitrógeno. Para las bacterias que crecieron en este medio, se realizó una evaluación complementaria en el medio NFb suplementado con azul de bromotimol como indicador. Se consideraron como positivas las cepas que presentaron crecimiento visible acompañado de un viraje del indicador a color amarillo, como evidencia presuntiva de la capacidad diazotrófica (Baldani *et al*., 2014). Para descartar el arrastre de nitrógeno residual, los cultivos se purificaron mediante cuatro pases consecutivos en medio fresco. La solubilización de fosfatos y potasio se evaluó en medios NBRIP y Alexandrov-BPB suplementados con azul de bromofenol (Nautiyal, 1999; Sugumaran & Janarthanam, 2007). La producción de compuestos indólicos se determinó en TSA con 1% de triptófano mediante el reactivo de Salkowski (Gordon & Weber, 1951), y la producción de sideróforos en medio agar cromoazurol sulfonato (CAS) (Louedn *et al*., 2011). La actividad enzimática se evaluó mediante pruebas para peroxidasas, amilasas, proteasas, lipasas, esterasas, celulasas y peptidasas en medios específicos (Ramos-Garza *et al*., 2016; Al-Mohaini *et al*., 2022).

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

Efecto de la interacción de las cepas con cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

El inóculo de cada cepa se preparó en caldo nutriente y se multiplicó en un agitador orbital (EDMUD BUHLER) a 120 rpm y 30 °C durante 24 h hasta alcanzar una concentración final de 1×10^8 UFC mL^{-1}, determinada según la escala de McFarland (1907). Posteriormente, se aplicó al suelo una mezcla del inóculo con agua destilada en proporción 1:10 (v/v). Los ensayos se realizaron en invernadero bajo condiciones semicontroladas; se utilizaron los cultivares de tomate T-60 y FL-5 del INIFAT, sembrados en macetas con suelo Vertisol salinizado de 8 dS m^{-1} (Hernández-Jiménez *et al*., 2023). Se regó con agua potable para evitar el lavado de sales y se verificó que las conductividades finales fueran similares a las iniciales. Se emplearon cinco tratamientos (cuatro cepas bacterianas y un testigo absoluto), con 25 plantas por tratamiento y tres repeticiones, a los que se les determinó a los 60 días la altura de las plantas (cm), la longitud de las raíces (cm), el diámetro del tallo (cm), el número de hojas (u) y la masa seca (g).

Diseño experimental y análisis estadístico

En el laboratorio se utilizó un diseño completamente al azar y en el ensayo con plantas uno de bloques al azar. Los datos se sometieron a pruebas de normalidad, como Kolmogorov-Smirnov, y de homogeneidad, como Cochran C, Hartley y Bartlett, seguidas de un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y la prueba de Duncan con un nivel de significancia de 0.05. El análisis se realizó con STATGRAPHICS Plus versión 5.0. Para la visualización del ensayo con plantas, se elaboró un gráfico heatmap.

RESULTADOS

A partir de la colecta de suelo se obtuvieron 21 morfotipos bacterianos, en concentraciones que oscilaron entre 2 10^6 y 1.5×10^7 UFC g^{-1} de suelo. Un aislado representativo de cada morfotipo se purificó para su posterior caracterización. Al evaluar el crecimiento de los 21 aislados en tres concentraciones de NaCl, solo cuatro se desarrollaron a 200 mM, lo que evidenció su tolerancia a la salinidad y justificó su selección para las evaluaciones posteriores.

Características morfológicas de los aislados

En los aislados seleccionados predominaron las formas bacilares Gram positivas, con colonias de color blanco, bordes enteros y consistencia seca en medio agar nutritivo (Tabla 1). Las pruebas de DNAasa y coagulasa resultaron negativas en todos los casos, lo que indica su inocuidad para continuar los estudios y constituye un criterio favorable para su posterior evaluación como promotoras del crecimiento vegetal.

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

Tabla 1. Características morfológicas de los aislados de suelos salinos procedentes de delta del río Cauto, provincia Granma, Cuba

Cepas	Morfología celular	Tinción de Gram	Color de las colonias	Morfología de las colonias
GR-1	Bacilos largos	Gram +	Gris	Circular con bordes enteros, convexa y de consistencia seca con gránulos
GR-3	Bacilos cortos	Gram +	Blanco	Circular con bordes enteros, seca con el centro hundido y algodonosa
GR-4	Bacilos cortos	Gram +	Amarilla	Irregular con rebordes, seca y con el centro hundido
GR-13	Bacilos largos	Gram +	Blanco	Circular con bordes enteros, ligeramente levantada y de consistencia seca con rebordes y gránulos

GR= código en referencia a la provincia Granma.

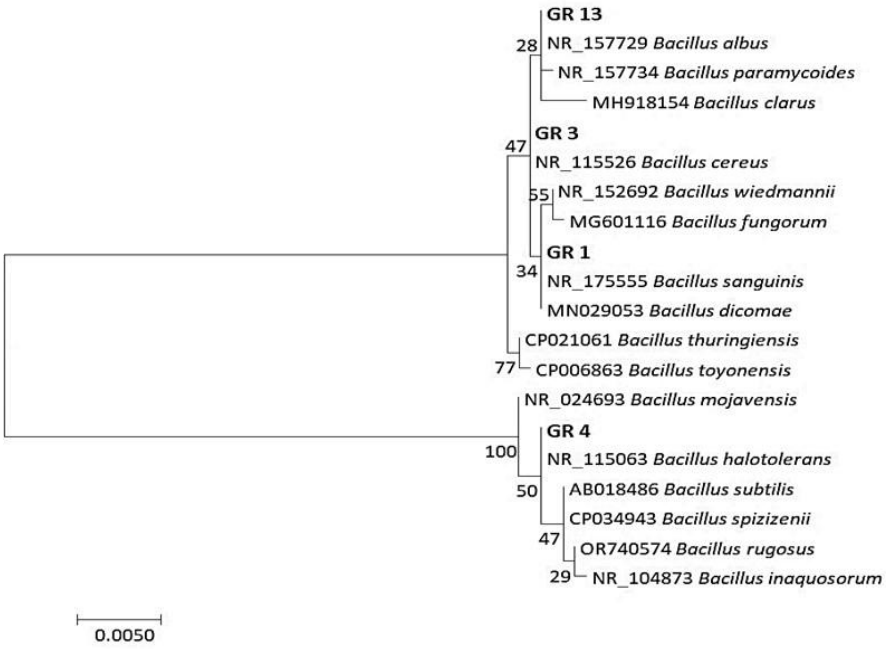
Identificación taxonómica de los aislados

El modelo de sustitución nucleotídica con mejor ajuste determinado mediante el software jModelTest2, fue el modelo Hasegawa-Kishino-Yano (HKY) mediante el cual se realizó la reconstrucción filogenética bajo los parámetros anteriormente mencionados. El análisis filogenético identificó los aislamientos GR1, GR3, GR4 y GR13 como miembros del género *Bacillus*, las cepas se agruparon en dos clados principales (Figura 1). Los aislamientos GR1, GR3 y GR13 se ubicaron dentro del grupo de *Bacillus cereus*, la cepa GR13 con un 100% de identidad con *Bacillus albus*, y 99.7-99.9% de identidad con las otras especies del subclado; la cepa GR3 con 100% de identidad con *B. cereus*, y GR1 con 100% de identidad con *Bacillus sanguinis* y *Bacillus dicomae*. Por otra parte, el aislamiento GR4 se agrupó en el grupo de *Bacillus subtilis*, con 100% de identidad con *Bacillus halotolerans* y 99.9% de identidad con el resto de especies del clado.

Caracterización de las cepas promotoras del crecimiento vegetal

Las cuatro cepas mostraron crecimiento en medio Winogradsky libre de nitrógeno después de cuatro pases consecutivos, lo que constituye una evidencia presuntiva de capacidad diazotrófica. En medio NFb, únicamente la cepa GR4 presentó crecimiento visible acompañado de un viraje del indicador a color amarillo. En cuanto a la solubilización de fosfatos, las cuatro cepas solubilizaron fosfato, destacándose GR1 con diferencias significativas respecto a las restantes, mientras que solo GR3 solubilizó fosfato de aluminio. Ninguna mostró capacidad para solubilizar potasio. De manera similar, todas produjeron sideróforos, aunque GR3 sobresalió con diferencias significativas. En la producción de compuestos indólicos, todas resultaron negativas (Tabla 2).

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)



El árbol construido con el programa MEGA 7, el método de máxima verosimilitud y el modelo de sustitución nucleotídica HKY. Los valores en las ramas corresponden a porcentajes de bootstrap obtenidos a partir de 1,000 repeticiones.

Figura 1. Árbol filogenético basado en las secuencias del gen 16S rRNA

Tabla 2. Características de promoción de crecimiento vegetal (PGP) de bacterias aisladas de suelos salinos delta del río Cauto, provincia Granma, Cuba

Pruebas	Cepas bacterianas				
	GR1	GR3	GR4	GR13	ESx
Capacidad diazotrófica presuntiva (diámetro de las colonias en cm)					
Medio Winogradsky	1.29 a	0.71 c	1.25 b	0.59 d	0.0077
Crecimiento en medio indicador					
NFb	0	0	1.75	0	
Índice de solubilización de nutrientes					
Fosfato (Calcio)	3.20 a	2.42 d	2.75 b	2.55 c	0.0357
Fosfato (Aluminio)	0	2.50	0	0	
Potasio	0	0	0	0	
Índice de producción de sideróforos					
Hierro	1.46 d	2.04 a	1.51 c	1.76 b	0.0138
Índice de producción de compuestos indólicos					
Compuestos indólicos	0	0	0	0	

Letras iguales no difieren significativamente entre filas (Rangos Múltiples de Duncan, α=0.05, n=10). ESx= error estándar. GR= código en referencia a la provincia Granma.

En relación con la producción de enzimas, los resultados mostraron una notable versatilidad entre las cepas evaluadas. GR1 y GR3 produjeron las siete enzimas líticas estudiadas, lo que resalta su potencial en comparación con las otras dos cepas. Todas mostraron actividad amilasa, sin diferencias estadísticas entre ellas. GR4 sobresalió en actividad proteasa, seguida de GR1; GR13 resultó negativa. GR1, GR3 y GR13 produjeron lipasas, destacándose GR1; todas produjeron esterasas y celulasas, con

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

mejor respuesta de GR13 en ambas enzimas. Respecto a la peroxidasa, todas las cepas fueron positivas (Tabla 3).

Tabla 3. Producción de enzimas por bacterias aisladas de suelos salinos del delta del río Cauto, provincia Granma, Cuba

Enzimas	Cepas bacterianas				
	GR1	GR3	GR4	GR13	ESx
Peroxidasas	+	+	+	+	
Amilasas	2.15 b	2.5 a	2.26 ab	2.38 ab	0.0915
Proteasas	5.64 b	4.69 c	6.77 a	0	0.0247
Lipasas	4.77 a	1.78 b	0	1.64 c	0.0348
Esterasas	1.14 b	1.09 c	1.08 c	1.18 a	0.0115
Celulasas	1.66 b	1.56 c	1.55 c	2.13 a	0.0200
Peptidasas	0	0	0	0	

Letras iguales no difieren significativamente entre filas (Rangos Múltiples de Duncan, α=0.05, n=10).
ESx= error estándar. GR= código en referencia a la provincia Granma.

Efecto de la inoculación de las cepas en cultivares de tomate *(Solanum lycopersicum* L.)

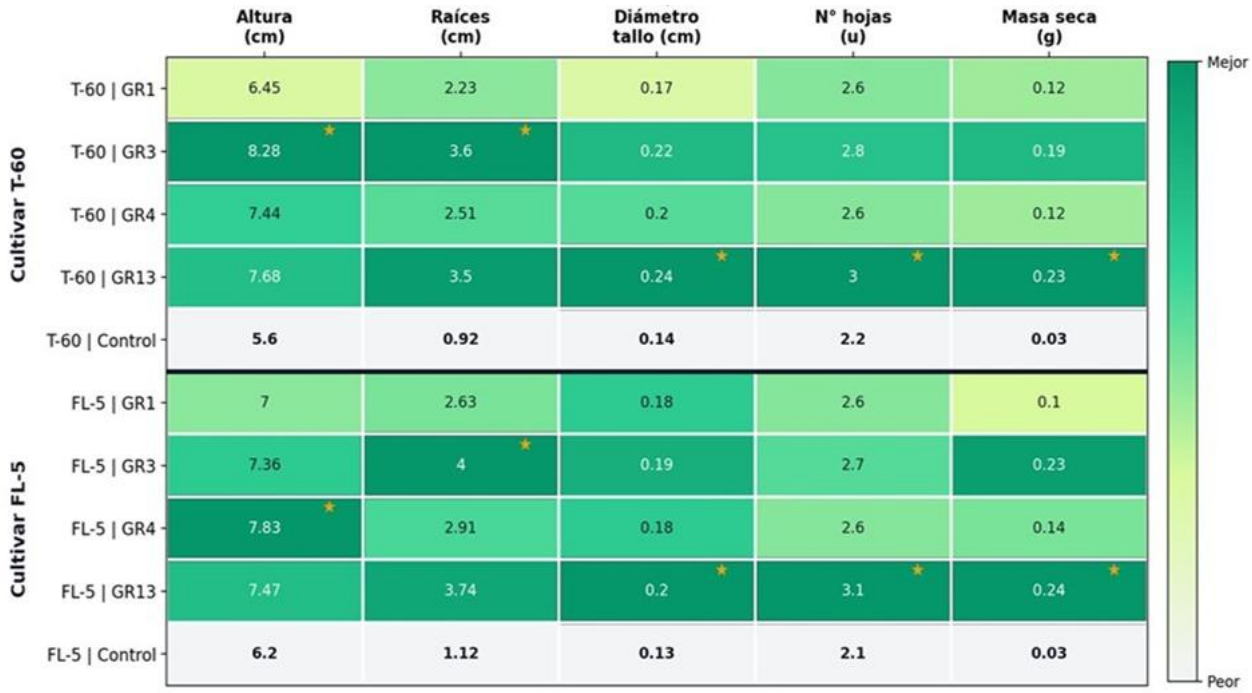
Al evaluar el efecto de la aplicación de las cepas en los cultivares de tomate T-60 y FL-5, establecidos en un suelo Vertisol salinizado, las cuatro mostraron respuestas significativamente superiores al tratamiento control. GR3 (*B. cereus*) destacó por presentar los mayores valores de longitud de raíz en ambos cultivares, mientras que GR13 (*B. albus*) presento mayores valores en número de hojas, diámetro del tallo y peso seco de las plántulas (Figura 2).

DISCUSIÓN

La selección de cuatro aislados con capacidad de crecimiento en medio salino (Agar Nutritivo suplementado con NaCl 200 mM) y su posterior asignación con bacterias pertenecientes al género *Bacillus* concuerdan con la capacidad ampliamente reconocida de este grupo bacteriano para persistir y proliferar en ambientes altamente estresantes. Las especies de *Bacillus*, son reconocidas por su capacidad de formar esporas y sus mecanismos de adaptación fisiológica, estos permiten su supervivencia ante condiciones adversas, entre ellas la presión osmótica, las limitaciones hídricas, las variaciones de temperatura y otros factores ambientales (Cho & Chung, 2020; Zeigler & Perkins, 2021). Dichas características podrían explicar el hecho de que estas cepas hayan sido recuperadas del delta del río Cauto, así como su capacidad para crecer a la concentración máxima de NaCl evaluada en este estudio.

La capacidad de las cuatro cepas aisladas para crecer a alta salinidad puede relacionarse directamente con su capacidad de adaptación a concentraciones de salinidad en el ambiente; sin embargo, la tolerancia bacteriana al NaCl, no implica, por si misma, la capacidad de promover el crecimiento vegetal bajo condiciones de estrés salino en suelos agrícolas. En este estudio, esta capacidad se respaldó adicionalmente por los ensayos

llevados a cabo en un suelo Vertisol salinizado, en donde los cultivares de tomate T-60 y FL-50 mostraron la capacidad promotora de crecimiento vegetal de los aislados. En estos ensayos ambos cultivares de tomate mostraron respuestas favorables a la inoculación con las bacterias ante el estrés generado por las condiciones salinas, lo que sugiere la capacidad de estas cuatro cepas para favorecer las respuestas de la planta ante el estrés salino y posiblemente ante otros tipos diferentes de estrés abiótico mediante diversos mecanismos fisiológicos y funcionales (Ahluwalia *et al*., 2021; Fanai *et al*., 2024). En conjunto, los resultados muestran la capacidad de las cepas seleccionadas para tolerar las concentraciones elevadas de NaCl *in vitro*, que podrían ser las mismas que les permiten adaptarse a ambientes naturalmente salinos como los del delta del rio Cauto y salinizados artificialmente como el Vertisol salinizado, adicionalmente esto demuestra la capacidad de conservar su potencial para favorecer el crecimiento vegetal bajo dichas condiciones. A la par, este estudio fortalece la evidencia regional, al coincidir con avances en los que la inoculación con cepas de *Bradyrhizobium* nativas del Valle del Rio Cauto favorecieron el crecimiento de caupí cultivado en suelo salino (Gómez-Padilla *et al*., 2016).



Los puntos amarillos indican los tratamientos con valores significativamente más altos para cada variable evaluada según la prueba de Rangos Múltiples de Duncan α=0.05 n=25. GR= código en referencia a la provincia Granma. GR1= *B. dicomae*, GR3= *B. cereus*, GR4= *B. halotolerans*, GR13= *B. albus*.

Figura 2. Efecto de las cepas bacterianas aisladas de suelos salinos del delta del río Cauto, provincia Granma, Cuba, sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivares de tomate T-60 y FL-5, en un suelo Vertisol salinizado durante dos ensayos

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

Entre las cepas evaluadas en este estudio, GR4 resulta particularmente relevante, por su relación filogenética con *Bacillus halotolerans,* especie del género *Bacillus* asociada con la capacidad de mitigar el estrés salino en plantas. Wu *et al.*, (2022), demostraron que *B. halotolerans* KKD1indujo respuestas fisiológicas, metabólicas y transcripcionales en trigo harinero (*Triticum aestivum*), principalmente relacionadas al metabolismo antioxidante y el ajuste osmótico en condiciones de salinidad. En este contexto, la tolerancia de GR4 (y de las otras tres cepas evaluadas) a 200 mM de NaCl, su respuesta presuntiva asociada con la capacidad diazotrófica y a la expresión de diferentes actividades funcionales son relevantes al coincidir con su efecto favorable sobre el crecimiento de tomate en el Vertisol salinizado. Estos atributos se han relacionado con mecanismos mediante los cuales las bacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden contribuir al desempeño de las plantas frente al estrés abiótico (Fanai *et al*., 2024). Más que atribuir este efecto a un mecanismo individual, la combinación de rasgos observada sugiere una respuesta multifuncional que podría contribuir a la interacción bacteria-planta bajo salinidad. No obstante, la participación específica de estos mecanismos, debe confirmarse mediante evaluaciones fisiológicas y moleculares.

Un patrón diferente se observó con la cepa GR13, la cual se relacionó filogenéticamente con *Bacillus albus*. Aunque compartió diversos atributos funcionales con las otras cepas, esta destacó por una mayor actividad de enzimas esterasas y celulasas y, particularmente por su efecto sobre el crecimiento de las plantas, donde se registraron mayores valores en el número de hojas, diámetro de tallo y peso seco de tomate. Este comportamiento resulta consistente con el potencial funcional descrito para *B. albus* en ambientes sometidos a estrés. En Cuba, la cepa *B. albus* CZ13, aislada en la Ciénaga de Zapata, mostró capacidad para movilizar diferentes nutrientes asociada con la promoción del crecimiento vegetal (Ortega-García *et al.* 2026). De forma similar, *B. albus* se ha reportado como una rizobacteria procedente de ambientes áridos con características similares a GR13, capaz de promover el crecimiento vegetal en condiciones abióticas desfavorables entre las que se incluyó la salinidad (Bibi *et al.* 2023). En este contexto, la respuesta de GR13 sugiere que la promoción del crecimiento bajo salinidad no necesariamente se expresa mediante una mayor elongación radical, sino que puede reflejarse diferencialmente en otros componentes del desarrollo y acumulación de biomasa de la planta.

En contraste con GR13, el efecto más evidente de GR3, relacionada filogenéticamente con *B. cereus*, se observó en el sistema radical, al presentar los mayores valores de longitud de raíz en los cultivares T-60 y FL-5 de tomate. Entre sus atributos funcionales, GR3 destacó por presentar la mayor producción de sideróforos, ser la única cepa capaz de solubilizar fosfato de aluminio y mostrar la mayor actividad amilasa. Este comportamiento resulta particularmente interesante al compararlo con otras cepas de *B. cereus* evaluadas en tomate bajo condiciones de estrés. (Patani *et al.*, 2023) reportaron que la cepa halotolerante *B. cereus* LAT3, caracterizada por la producción de AIA y

Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

sideróforos y la solubilización de fosfatos, favoreció el crecimiento general de plantas sometidas a estrés salino; sin embargo, la longitud radical fue una de las variables menos favorecidas. En cambio, Andrade-Sifuentes *et al*., (2022) observaron que una cepa nativa de *B. cereus*, capaz de producir AIA y sideróforos y solubilizar fosfatos, incrementó 42 % el volumen radical del tomate cuando se aplicó conjuntamente con estiércol solarizado. La coincidencia entre GR3 y estas cepas de *B. cereus* en la producción de sideróforos y la solubilización de fosfatos permite plantear, de manera putativa, que ambos mecanismos podrían haber contribuido al mayor crecimiento radical observado en las plantas inoculadas con GR3. Esta hipótesis adquiere particular interés debido a que GR3 presentó la mayor producción de sideróforos entre los aislados evaluados y fue la única cepa capaz de solubilizar fosfato de aluminio, mientras que no se detectó producción de compuestos indólicos. No obstante, la contribución específica de estos mecanismos deberá comprobarse mediante evaluaciones dirigidas a establecer su relación con la disponibilidad y adquisición de nutrientes por la planta.

Finalmente, GR1 resulta de particular interés por su relación filogenética con *Bacillus dicomae*, especie recientemente descrita como miembro del grupo *B. cereus*, originalmente aislado de *Dicoma anomala* (Sephokoane *et al*., 2023). La información disponible sobre sus características funcionales asociadas con la promoción del crecimiento vegetal es todavía limitada. En este contexto, GR1 mostró tolerancia a 200 mM de NaCl y combinó atributos de interés agrícola, entre los que destacaron la solubilización de fosfato de calcio, la producción de sideróforos y diferentes actividades enzimáticas. Además, su inoculación favoreció el crecimiento de los cultivares T-60 y FL-5 establecidos en el Vertisol salinizado. Estos resultados aportan información novedosa sobre el potencial funcional de GR1 bajo condiciones de salinidad; sin embargo, debido a que su secuencia de 16S rRNA mostró igual identidad con *B. dicomae* y *B. sanguinis*, los atributos observados deben considerarse propios de la cepa GR1 y no extrapolarse a una especie particular hasta alcanzar una mayor resolución taxonómica.

En conjunto, los resultados muestran que la promoción del crecimiento vegetal bajo condiciones de salinidad no estuvo asociada con un perfil único funcional. Las cepas presentaron combinaciones diferentes de atributos *in vitro* y, en paralelo, efectos diferenciales sobre las variables de crecimiento sobre los cultivares de tomate. Esta heterogeneidad sugiere que la respuesta de las plantas de tomate podría depender de la combinación de mecanismos funcionales de cada cepa y de su interacción con el cultivar, más que de la presencia aislada de un determinado atributo relacionado con la capacidad promotora de crecimiento vegetal. En este sentido, los resultados obtenidos constituyen una base para seleccionar cepas con perfiles funcionales complementarios y profundizar en los mecanismos que determinan su desempeño bajo condiciones de salinidad.

Las respuestas favorables observadas en T-60 y FL-50, junto con los atributos funcionales detectados *in vitro*, justifican la continuación en las evaluaciones de estos aislados como candidatos para el desarrollo de bioinoculantes dirigidos a promover el

crecimiento vegetal en sistemas agrícolas afectados por la salinidad. Sin embargo, su potencial deberá validarse mediante ensayos de campo que permitan determinar la estabilidad de sus efectos bajo diferentes condiciones edafoclimáticas y esclarecer los mecanismos involucrados en la interacción bacteria-planta. Asimismo, antes de considerar su aplicación agrícola será necesario profundizar en la evaluación de su inocuidad, particularmente en los aislados filogenéticamente relacionados con el grupo de *Bacillus cereus*.

CONCLUSIONES

Las cuatro cepas estudiadas mostraron atributos funcionales asociados con la promoción del crecimiento vegetal, entre ellos capacidad diazotrófica presuntiva, solubilización de fosfato de calcio y producción de sideróforos, peroxidasas, amilasas, esterasas y celulasas. Tres cepas produjeron proteasas y lipasas, mientras que una mostró capacidad para solubilizar fosfato de aluminio. Además, la inoculación de las cepas estimuló indicadores de crecimiento y desarrollo de los cultivares de tomate T-60 y FL-5 en condiciones semicontroladas sobre un Vertisol salinizado. Estos resultados indican que las cepas estudiadas presentan potencial para el desarrollo de bioinoculantes destinados a cultivos establecidos en suelos salinos

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

M.O.G.: Conceptualización, Metodología, Investigación, Análisis formal, Curación de datos, Redacción del borrador original, Redacción, revisión y edición, Supervisión, Administración del proyecto.
Y.R.R.: Análisis formal, Curación de datos.
L.X.Z.M.: Supervisión, Administración del proyecto, Redacción del borrador original.
I.F.C.D.: Supervisión, Adquisición de fondos, Redacción, revisión y edición.
M.C.N.G.: Análisis formal, Curación de datos.

FINANCIAMIENTO

Este estudio fue financiado por el proyecto Código PS211LH003-039 “Empleo de la diversidad de recursos fitogenéticos y microbianos para favorecer la adaptabilidad de los cultivos en agroecosistemas salinos”.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros, institucionales o personales que pudieran influir en la interpretación de los resultados.

REFERENCIAS

AHLUWALIA O, Singh PC, Bhatia R. 2021. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*. 5:e100032. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032

AKHTAR N, Ilyas N, Yasmin H, Sayyed RZ, Hasnain Z, Elsayed AE, El Enshasy HA. 2021. Role of *Bacillus cereus* in improving the growth and phytoextractability of *Brassica nigra* (L.) K. Koch in chromium contaminated soil. *Molecules*. 26(6):e1569. https://doi.org/10.3390/molecules26061569

AL-MOHAINI M, Farid A, Muzammal M, Ghazanfar S, Dadrasnia A, Alsalman AJ, Al-Hawaj MA, Alhashem YN, Ismail S. 2022. Enhancing lipase production of *Bacillus salmalaya* strain 139SI using different carbon sources and surfactants. *Applied Microbiology*. 2(1):237-247. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol2010017

ANDRADE-SIFUENTES A, Fortis-Hernández M, Preciado-Rangel P, Sáenz-Mata J, Coria-Arellano Y, Guigón-López C. 2022. Promoción del crecimiento de tomate saladette con *Bacillus cereus* y estiércol solarizado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13(7):1259-1270. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3120

ÁVILA-AMADOR C, Algentel-Martínez L, Peñuelas-Rubio O, González Aguilera J, Fonseca Reyna I. 2022. Respuesta del cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación de QuitoMax® en condiciones de salinidad. *Research, Society and Development*. 11(12):e10111233870. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.33870

BALDANI JI, Reis VM, Videira SS, Boddey LH, Divan-Baldani VL. 2014. The art of isolating nitrogen-fixing bacteria from non-leguminous plants using N-free semi-solid media: A practical guide for microbiologists. *Plant and Soil*. 384:413-431. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2186-6

BASTA M, Annamaraju P. 2026. Bacterial Spores. *EN:* StatPearls. Treasure Island (FL). https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK556071/

BIBI A, Bibi S, Al-Ghouti MA, Abu-Dieyeh MH. 2023**.** Isolation and evaluation of Qatari soil rhizobacteria for antagonistic potential against phytopathogens and growth promotion in tomato plants. *Scientific Reports*. 13:e22050. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49304-w

CHAMORRO-ANAYA LM, Pérez-Cordero A. 2020*. Bacillus cereus* bacteria endophyte promoter of plant growth. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 22(2):18-23. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n2.81723

CHO WI, Chung M. 2020. *Bacillus* spores: a review of their properties and inactivation processing technologies. *Food Science and Biotechnology*. 29:1447-1461. https://doi.org/10.1007/s10068-020-00809-4

DA SILVA LI, Correa-Pereira M, de Carvalho AMX, Buttrós VH, Pasqual M, Dória J. 2023. Phosphorus-solubilizing microorganisms: A key to sustainable agriculture. *Agriculture*. 13(2):462. https://doi.org/10.3390/agriculture13020462

ELBELTAGY A, Nishioka K, Sato T, Suzuki H, Ye B, Hamada T, Isawa T, Mitsui H, Minamisawa K. 2001. Endophytic colonization and in planta nitrogen fixation by a *Herbaspirillum* sp. isolated from wild rice species. *Applied and Environmental Microbiology*. 67(11):5285-5293. https://doi.org/10.1128/AEM.67.11.5285-5293.2001

FANAI A, Bohia B, Lalremruati F, Lalhriatpuii N, Lalrokimi, Lalmuanpuii R, Singh PK, Zothanpui. 2024. Plant growth promoting bacteria (PGPB)-induced plant adaptations to stresses: An updated review. *PeerJ*. 12:e17882. https://doi.org/10.7717/peerj.17882

GARCÍA-REYES RA, González Posada-Dacosta MD, Torres-Calzado K, Villazón-Gómez JA, Abellón-Molina MI, Velázquez-Sánchez EC. 2021. Sensoramiento remoto de la salinidad en el agroecosistema Mayarí de la provincia Holguín, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 30(1):26-32. https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1370

GÓMEZ-PADILLA E, Ruiz-Díez B, Fajardo S, Eichler-Loebermann B, Samson R, Van-Damme P, López-Sánchez R, Fernández-Pascual M. 2017. Caracterización de rizobios aislados de nódulos de frijol caupí, en suelos salinos de Cuba. *Cultivos Tropicales*. 38(4):39-49. https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1401

GÓMEZ-PADILLA E, Ruiz-Díez B, Fernández-Pascual M, López-Sánchez R, Bloem E, Eichler-Löbermann B. 2016. Inoculation with native *Bradyrhizobia* strains improved growth of cowpea plants cultivated on a saline soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 47(19):2218-2224. https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1228950

GORDON SA, Weber RP. 1951. Colorimetric estimation of indoleacetic acid. *Plant Physiology*. 26(1):192-195. https://doi.org/10.1104/pp.26.1.192

HERNÁNDEZ-HUERTA J, Tamez-Guerra P, Gomez-Flores R, Delgado-Gardea MCE, Robles-Hernández L, Gonzalez-Franco AC, Infante-Ramirez R. 2023. Pepper growth promotion and biocontrol against *Xanthomonas euvesicatoria* by *Bacillus cereus* and *Bacillus thuringiensis* formulations. *PeerJ*. 11: e14633. https://doi.org/10.7717/peerj.14633

HERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, López-Pérez D, Morales-Díaz M. 2023. Métodos de análisis para calcular el contenido en sales de los suelos de Cuba. *Agrotecnia de Cuba*. 47(1):93-97. https://www.agrotecnia.edicionescervantes.com/index.php/agrotecnia/article/view/19

KULKOVA I, Dobrzyński J, Kowalczyk P, Bełecki G, Kramkowski K. 2023. Plant growth promotion using *Bacillus cereus*. *International Journal of Molecular Sciences*. 24:9759. https://doi.org/10.3390/ijms24119759

LIN Y, Briandet R, Kovács ÁT. 2022. *Bacillus cereus* sensu lato biofilm formation and its ecological importance. *Biofilm*. 4:100070. https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2022.100070

LOUDEN BC, Haamann D, Lynne AM. 2011. Use of blue agar CAS assay for siderophore detection. *Journal of Microbiology & Biology Education*. 12(1):51-53. https://doi.org/10.1128/jmbe.v12i1.249

MADIGAN MT, Bender KS, Buckley DH, Sattley WM, Stahl DA, Brock TD. 2019. Brock Biology of Microorganisms. 15th Ed. Ed. Pearson, New York, U.S.A. Pp. 1064.

MCFARLAND J. 1907. The nephelometer: an instrument for estimating the number of bacteria in suspensions used for calculating the opsonic index and for vaccines. *Journal of the American Medical Association*. 49(14):1176-1178. https://doi.org/10.1001/jama.1907.25320140022001f

NAUTIYAL SC. 1999. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganism. *FEMS Microbiology Letters*. 170(1):265-270. https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x

ORTEGA-GARCÍA M, Ríos-Rocafull Y, Socorro-García A, Zelaya-Molina LX, Chávez-Díaz IF, Nápoles-García MC. 2026. Identificación de bacterias halotolerantes aisladas de suelos de la Ciénaga de Zapata, Cuba. *Agronomía Mesoamericana*. 37:e7c4st966. https://doi.org/10.15517/7c4st966

PATANI A, Prajapati D, Ali D, Kalasariya H, Yadav VK, Tank J, Bagatharia S, Joshi M, Patel A. 2023. Evaluation of the growth-inducing efficacy of various *Bacillus* species on the salt-stressed tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Frontiers in Plant Science*. 14:1168155. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1168155

RAMOS-GARZA J, Bustamante-Brito R, Angeles-de Paz G, Medina-Canales MG, Vásquez-Murrieta MS, Tao-Wang E, Rodríguez-Tovar VA. 2016. Isolation and characterization of yeasts associated with plants growing in heavy-metal and arsenic-contaminated soils. *Canadian Journal of Microbiology*. 62(4):307-319. https://doi.org/10.1139/cjm-2015-0226

RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ CF, Zhurbenko R. 2018. Manual de medios de cultivo. (4a. ed.). Centro Nacional de Biopreparados (BIOCEN), Mayabeque, Cuba. Pp. 183.

SAHEED IM, Ikhajiagbe B. 2024. Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) rhizo-inoculation on soil physico-chemical, bacterial community structure and root colonization of rice (*Oryza sativa* L. var. faro 44) grown in ferruginous Ultisol conditions. *Science World Journal*. 19(3):894-899. https://doi.org/10.4314/swj.v19i3.38

SEPHOKOANE CM, Motadi LR, Choene M, Liu Y, Serepa-Dlamini MH. 2023. *Bacillus dicomae* sp. nov., a new member of the *Bacillus cereus* group isolated from medicinal plant *Dicoma anomala*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 73:e006112. https://doi.org/10.1099/ijsem.0.006112

SUGUMARAN B, Janarthanam BS. 2007. Solubilization of potassium-containing minerals by bacteria and their effect on plant growth. *World Journal of Agricultural Sciences*. 3(3):350-355. https://idosi.org/wjas/wjas3(3).htm

VÁZQUEZ-GLARÍA A, Eichler-Löbermann B, Loiret FG, Ortega E, Kavka M. 2021. Root-system architectures of two Cuban rice cultivars with salt stress at early development stages. *Plants.* 10(6):e1194. https://doi.org/10.3390/plants10061194

VILLALBA-MARTÍNEZ CJ, Encina-Rojas A. 2024. El muestreo para análisis químicos de suelos en condiciones subtropicales. *Arandu Poty*. 3(2):10-17. https://divulgacioncientifica.unca.edu.py/index.php/AranduPoty/article/view/134

VILLARREAL-DELGADO M, Villa-Rodríguez E, Cira-Chávez L, Estrada-Alvarado M, Parra-Cota F, de los Santos-Villalobos S. 2018. The genus *Bacillus* as a biological control agent and its implications in the agricultural biosecurity. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 36(1):95-130. https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5

WANG X, Wang Y, Fu Y, Zhai Y, Bai X, Liu T, Li G, Zeng L, Zhu S. 2024. Multiple omics revealed the growth-promoting mechanism of the *Bacillus velezensis* strains on ramie. *Frontiers in Plant Science*. 15:1367862. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1367862

WILLE L, Messmer MM, Studer B, Hohmann P. 2019. Insights to plant-microbe interactions provide opportunities to improve resistance breeding against root diseases in grain legumes. *Plant, Cell & Environment*. 42(1):20-40. https://doi.org/10.1111/pce.13214

WU X, Fang Y, Wang R, Zhao Q, Ali Q, Wu H, Qu H, Borriss R, Xie Y, Gao X. 2022. *Bacillus halotolerans* KKD1 induces physiological, metabolic and transcriptional responses in wheat under salt stress. *Frontiers in Plant Science*. 13:1-17. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.978066

ZEIGLER D, Perkins J. 2021. The genus *Bacillus In:* Green L, Goldman E, *Practical Handbook of Microbiology*. United States of America: Taylor & Francis Group. pp. 249-278. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003099277-24/genus-bacillus-daniel-zeigler-john-perkins?context=ubx&refId=998921c4-3b4b-49ff-b87d-5eba35a2cb72