RIAA
Revista de Investigación Agraria y Ambiental

• Recibido: 16/06/2021
• Aceptado: 2/07/2021
• DOI: 10.22490/21456453.4818

Área Agrícola

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RIZOBACTERIAS NATIVAS FIJADORAS DE NITRÓGENO DE *Capsicum* sp. DE LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA

IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF NATIVE NITROGEN-FIXING RHIZOBACTERIA FROM *Capsicum* sp. IN CARIBBEAN REGION OF COLOMBIA

María Cristina Serrano Hernández • *mary.csh98@gmail.com*
Laboratorio de Investigación en Microbiología, Facultad de Ciencias Básicas y Biomédicas, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla- Colombia.

Liliana del Socorro Pérez Lavalle • *lperez70@unisimonbolivar.edu.co*
Universidad Simón Bolívar, Barranquilla - Colombia.

Hilda Estrada-López • *hileslo@hotmail.com*
Facultad de Ciencias Económicas, Universidad del Atlántico, Barranquilla - Colombia.

Rosnairy Mancera Benítez • *rosnairys_mancera@hotmail.com*
Laboratorio de Investigación en Microbiología, Facultad de Ciencias Básicas y Biomédicas, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla - Colombia.

Yani Cristina Aranguren Díaz • *yani.aranguren@unisimonbolivar.edu.co*
Laboratorio de Investigación en Microbiología, Facultad de Ciencias Básicas y Biomédicas, Universidad Simón Bolívar, Barranquilla - Colombia.

Citación: Serrano, M., Pérez, L., Estrada-López, H., Mancera, R. y Aranguren, Y. (2022). Identificación y caracterización de rizobacterias nativas fijadoras de nitrógeno de *Capsicum* sp. de la región Caribe Colombiana. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(2), 81 – 91. DOI: https://doi.org/10.22490/21456453.4818

RESUMEN

Contextualización del tema: El uso de inoculantes biológicos o biofertilizantes basados en bacterias promotoras del crecimiento constituye una alternativa biotecnológica sustentable para mejorar la producción agrícola.

Vacío de información: sin embargo, las características ambientales de los agroecosistemas pueden ser muy diferentes entre regiones y estas pueden tener un efecto sobre el crecimiento y supervivencia de dichos inoculantes.

Propósito del estudio: en el presente estudio se aislaron y caracterizaron microorganismos nativos, con capacidad promotora del crecimiento en plantas, que puedan emplearse en los cultivos de la región Caribe de Colombia.

Metodología: Para ello se aislaron bacterias rizosféricas de *Capsicum* sp. Se identificaron molecularmente por *16S* y se determinó su capacidad de fijar nitrógeno en medio Ashby y de solubilizar fosfato en medio NBRIP. Luego se aplicaron inóculos de las bacterias

identificadas a plantas de ají y se evaluó su efecto en la promoción del crecimiento vegetal.

Resultados y conclusiones: Los aislados se identificaron como: *Achromobacter* sp., *Bacillus mycoides*, *Bacillus* sp., y *Paenibacillus dendritiformis,* y su aplicación favoreció el crecimiento vegetal, lo que se evidenció con el aumento de al menos un parámetro de crecimiento, así como la concentración de nitrógeno en los tejidos de las plantas de ají. Finalmente, *Achromobacter* sp. y *B. mycoides* fueron los inóculos que arrojaron mejores resultados, indicando su potencial para ser empleados en la agricultura de la región.

Palabras clave: agricultura sostenible; ají; bacterias promotoras del crecimiento; microorganismos nativos; rizosfera

ABSTRACT

Context: The use of biological inoculants or biofertilizers based on growth-promoting bacteria constitutes a sustainable biotechnological alternative to improve agricultural production.

Knowledge gap: However, the environmental characteristics of agroecosystems can be very different between regions and these can have an effect on the growth and survival of such inoculants.

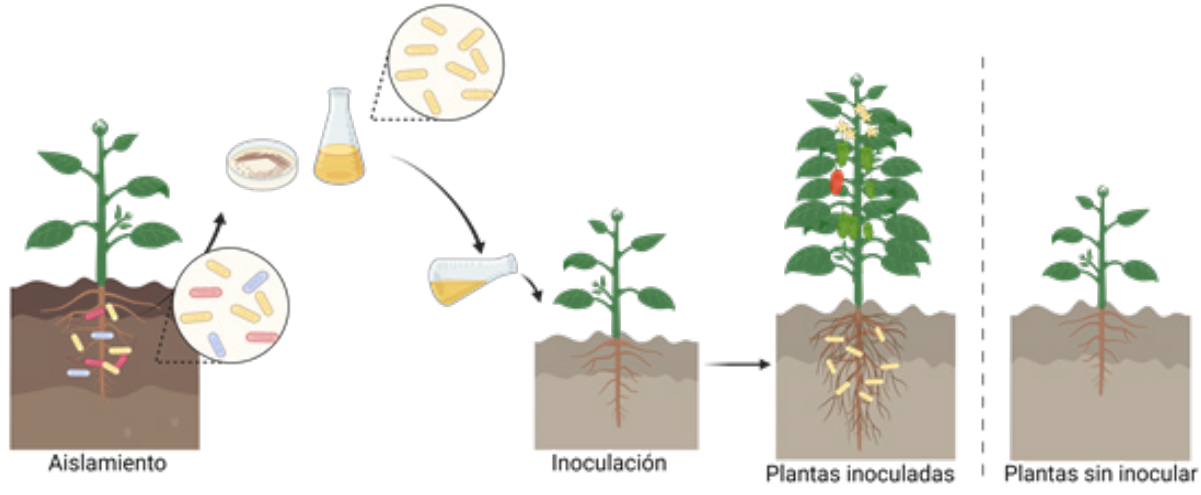
Purpose: In this study, native microorganisms with plant growth-promoting capacity that can be used on crops in the Caribbean region of Colombia were isolated and characterized.

Methodology: Rhizosphere bacteria were isolated from *Capsicum* sp. They were molecularly identified by 16S and their capacity to fix nitrogen in Ashby medium and to solubilize phosphate in NBRIP medium was determined. Inoculum of the identified bacteria were then applied to chili pepper plants and their effect on plant growth promotion was evaluated.

Results and conclusions: The isolates were identified as *Achromobacter* sp., *Bacillus mycoides, Bacillus* sp., and *Paenibacillus dendritiformis*, and their application promoted plant growth, which was evidenced by the increase of at least one growth parameter, as well as nitrogen concentration in the tissues of chili pepper plants. Finally, *Achromobacter* sp. and *B. mycoides* were the inoculums with the best results, indicating their potential for use in agriculture in the region.

Keywords: chili peppers, growth-promoting bacteria; native microorganisms; rhizosphere sustainable agriculture.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: *Autores*

1. INTRODUCCIÓN

El suelo posee propiedades físico-químicas y biológicas que pueden ser alteradas por el uso intensivo de este, conduciendo a su deterioro y afectando su fertilidad (Jaurixje et al., 2013). Entre estos usos está el agrícola que, además, afecta el suelo por el uso de fertilizantes.

Los fertilizantes químicos son benéficos para el sector agrícola; no obstante, su uso desmesurado genera residuos que producen salinización, acidificación, problemas en el drenaje, compactación del suelo y la emanación de gases tóxicos (Jaurixje et al., 2013; Massah & Azadegan, 2016). Una alternativa es el compostaje de materia orgánica y la producción de biofertilizantes usando microorganismos nativos de la región de cultivo, favoreciendo la recuperación de suelos y la producción agrícola sustentable (Sevilla-Perea & Mingorance, 2015; Vassilev et al., 2015; Pérez-Lavalle et al., 2016).

Los biofertilizantes contienen microorganismos beneficiosos que promueven el crecimiento vegetal garantizando la disponibilidad de nutrientes primarios (Vessey, 2003). Sin embargo, existen factores que afectan la eficiencia de estos, como las condiciones ambientales y el tipo de planta cultivada (Malusà et al., 2016). En Colombia se producen y usan biofertilizantes principalmente en la región andina y en la mayoría de los casos emplean micorrizas de los géneros *Glomus* y *Acaulospora*, y bacterias de los géneros *Azotobacter* y *Bradyrhizobium* (Pérez-Lavalle et al. 2016).

Entre los microorganismos usados en la agricultura se incluyen bacterias que colonizan raíces denominadas rizobacterias o bacterias promotoras del crecimiento vegetal [BPCV] (Plant growth-promoting rhizobacteria [PGPR]), las cuales estimulan el proceso metabólico de las plantas o facilitan la asimilación de nutrientes y promueven la resistencia sistémica inducida (Márquez et al., 2020; Wang et al., 2012).

Las bacterias de los géneros *Azospirillum*, *Azotobacter* y *Rhizobium* han sido las más empleadas como biofertilizantes por mecanismos que incluyen la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfatos y síntesis de fitohormonas, que actúan mejorando diferentes estadios del crecimiento vegetal (Jiménez et al., 2011; Pérez-Lavalle et al., 2016). Además, existen otras bacterias promotoras del crecimiento como las pertenecientes a los géneros *Bacillus*, *Enterobacter*, *Paenibacillus*, *Pseudomonas* y *Serratia* que pueden ser empleadas como inoculantes biológicos (Cabra-Cendales et al., 2017; Vida et al., 2017; Márquez et al., 2020).

La agricultura de cultivos de ají topito, auyama, cebollín, guayaba, limón, mango y melón son esenciales en la economía del departamento del Atlántico, Colombia (Galvis, 2009); sin embargo, la actividad productiva del municipio de Malambo se ve limitada por sus suelos pobres (Osorio, 2012) y estudios referentes al cultivo del ají picante *Capsicum annuum* señalan que requiere altas concentraciones de nitrógeno con relación al fósforo y al potasio (Martínez, 2015). En este sentido, el estudio e identificación de BPCV proveniente de suelos del Atlántico tendría ventajas con respecto a cepas comerciales producidas en otras regiones, dada su capacidad natural de adaptación a las características ambientales de origen. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue aislar e identificar bacterias nativas fijadoras de nitrógeno y a partir de esto evaluar la capacidad de ellas de promover el crecimiento del cultivo de ají topito (*Capsicum* sp.).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Aislamiento de microorganismos. Inicialmente se tomaron muestras de suelo rizosférico de plantas de ají en la finca San José de Malambo, departamento del Atlántico (10°50’45,4884” N; 74°52’4,764” W), en donde las temperaturas oscilaron entre 23 y 36 °C. Para ello se tomó suelo a los 15 cm de profundidad de varias plantas, formando una muestra compuesta. A partir de las muestras de suelo se realizaron diluciones seriadas (10^{-1} a 10^{-7}) y se cultivaron en placas con medio Ashby para microorganismos fijadores de nitrógeno (sacarosa, 10 g; NaCl, 0,2 g; KH_2PO_4, 0,2 g; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0,2 g; $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, 0,1 g; $CaCO_3$, 5 g; agar 15 g; pH 7,0 por cada litro) y se incubaron a 30 °C durante 5 días. Posteriormente, se aislaron colonias puras y se cultivaron en medio NBRIP

(National Botanical Research Institute's phosphate growth medium) constituido por: glucosa, 10 g; Ca_3PO_4, 5 g; $MgCl_2.6H_2O$, 5 g; KCl, 0,2 g; $(NH_4)_2$ SO_4, 0,1 g; agar, 20 g; H_2O destilada, 1L; azul de bromofenol, 0,025 g/l para evaluar la capacidad de solubilizar fosfato, luego se les realizó una coloración Gram y se describieron microscópicamente.

Identificación molecular. La identificación molecular de los microorganismos fue llevada a cabo mediante análisis del gen de ARNr *16S* y la amplificación de las secuencias se hizo por Colony-PCR (Bergkessel & Guthrie, 2013). La PCR se realizó en condiciones estándar, usando cebadores universales para *16S* pA y pc5B (Wilson et al., 1990). Los conjuntos de ADN resultantes de la PCR [amplicones] fueron secuenciados y se analizaron con herramientas bioinformáticas. También se hizo un análisis de parentesco por el procedimiento de agrupamiento de Máxima Verosimilitud, basado en el modelo evolutivo Tamura 3 y distribución gamma, con un método bootstrap de 800 repeticiones, empleando el programa MEGA X.

Efecto de biofertilizantes en el crecimiento vegetal. El ensayo se realizó con plantas de ají topito *Capsicum* sp., en una en una parcela libre de malezas, con condiciones de luminosidad y humedad uniformes. Luego se definieron cuatro tratamientos que consistieron en suelo de la parcela y compost de residuos de la finca (1:1), más cuatro de las cepas aisladas; adicionalmente se incluyeron dos tratamientos control sin inocular, uno con suelo solo y otro con la mezcla de suelo y compost. Se emplearon semillas comerciales de ají (*Capsicum* sp.) que fueron sembradas en bandejas de germinación. A los 10 días de haber germinado se formaron las primeras dos hojas y se hicieron los trasplantes a macetas de 4 kg con el sustrato correspondiente a cada tratamiento.

Cada aislado bacteriano se cultivó en caldo Luria Bertani a 30 °C hasta obtener una densidad celular de 10^7 UFC/mL. Al quinto día y décimo día, las plantas fueron inoculadas agregando en la base 10 mL de suspensión bacteriana. Por su parte, a los dos controles se les agregó 10 mL del medio sin bacteria. Una vez inoculadas las plantas se mantuvieron en cultivo hasta completar los 87 días y se realizaron mediciones de variables en 10 plantas por tratamiento para estimar crecimiento vegetal. A cada planta se le evaluó: longitud del vástago, longitud de la raíz, peso fresco y seco del vástago, peso fresco y seco de la raíz, número de flores, número y peso total de frutos. Por último, se realizó un análisis foliar para cada tratamiento a través del laboratorio comercial certificado.

Análisis estadístico. Las variables de medición de crecimiento se estudiaron empleando un análisis de varianza de una vía, con nivel de significancia $\alpha = 0{,}01$ F (0,99;5/54). Además, se realizó una Prueba de Tukey (α=0,05) para determinar diferencias verdaderamente significativas entre tratamientos para cada variable. El manejo y análisis de datos se realizó empleando el programa Excel de Microsoft Office.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aislamiento e identificación de microorganismos. Se obtuvieron cinco aislados con morfología de colonia diferentes en medio para fijadores de nitrógeno. Los aislados A1, A2 y A5 resultaron ser bacilos Gram positivos y las A3 y A4 bacilos, Gram negativos. Además, todos los aislados son solubilizadores de fosfato, excepto el A5. De acuerdo con el análisis de identidad de las secuencias 16S, con un porcentaje de similitud del 99% con bacterias de referencia, las bacterias Gram positivas se identificaron como: A1, *Bacillus mycoides*; A2, *Bacillus* sp.; y A5, *Paenibacillus dendritiformis*. Por otro lado, las bacterias Gram negativas fueron identificadas como: A3, *Achromobacter* sp. y A4, *Klebsiella* sp. Todas estas bacterias han sido frecuentemente asociadas a las comunidades del suelo y poseen actividad promotora de crecimiento (Bulgarelli et al., 2013; Saxena et al., 2019; Wu et al., 2017; Zhang et al., 2019).

Efecto de biofertilizantes en el crecimiento vegetal. Tomando en cuenta los aislados identificados, los tratamientos consistieron en la mezcla de suelo y abono inoculados con *B. mycoides* (ABm), *Bacillus* (AB), *Achromobacter* sp. (AA) y *P. dendritiformis* (Apd). Se observó que, durante los primeros 40 días, el crecimiento

de las plantas fue lento y se mantuvo uniforme entre tratamientos; luego aumentó el crecimiento, acentuándose las diferencias en algunos tratamientos hasta el fin del experimento (Tabla 1). Estas diferencias están determinadas por los nutrientes puestos a disposición por las bacterias aplicadas, ya que poseen la capacidad de fijar nitrógeno y potencialmente podrían solubilizar otros nutrientes (Bulgarelli et al., 2013; Saxena et al., 2019). Este comportamiento también ha sido observado en otros cultivos como la papa, en los que en las primeras fases del desarrollo, desde la germinación, el crecimiento no está limitado por factores externos, predominando la división celular; luego hay mayor influencia de las disponibilidad de nutrientes y se da un aumento de la longitud, volumen y peso (Gregorczyk, 1998).

Al final del experimento se observó que, según las variables evaluadas, el tratamiento con menor crecimiento y desarrollo fue el control SS (Tabla 1). Con relación a la longitud del vástago y la raíz, el análisis de la varianza [ANOVA] reveló con un nivel de significancia $\alpha = 0{,}01$, significando que existen diferencias entre los tratamientos. Además, según la prueba de Tukey ($\alpha = 0{,}05$), existen diferencias significativas entre el suelo solo y el resto de los tratamientos (Figura 1). Los tratamientos con mayor crecimiento son aquellos a los que se les adicionó los inoculantes biológicos *B. mycoides* y *Achromobacter* sp. Esto mismo se observó en el peso fresco del vástago (Tabla 1), con diferencias significativas con respecto al abono solo y suelo solo (Tukey $p \leq 0{,}05$). Al medir el peso seco del vástago y de la raíz se observan mayores diferencias significativas entre tratamientos que en los pesos frescos.

Los mayores pesos secos del vástago se observaron en los tratamientos de abono con *B. mycoides, Achromobacter* sp. y *P. dendritiformis*, y para el peso de la raíz, los mayores resultaron fueron *Achromobacter* sp. y *Bacillus* sp.; en contraste, el menor peso seco de vástago y raíz fue el tratamiento en suelo solo (Figura 1b). El ANOVA revela que para estas variables los tratamientos son diferentes, y la prueba de Tukey ($\alpha = 0{,}05$) indica que hay diferencias significativas entre el tratamiento de suelo solo y todos los demás tratamientos. Igualmente, con el mismo nivel de significancia, existen diferencias entre el abono solo y los tratamientos inoculados con *Achromobacter* sp., *B. mycoides* y *P. dendritiformis.*

Tabla 1.- Indicadores de crecimiento al final de la prueba de campo.

	Tratamientos					
Variables	**SS**	**A**	**AAc**	**ABm**	**APd**	**AB**
Longitud vástago (cm)	36,43±9, 74^{a}	59,45 7,19^{c}	61,75±6,27^{cd}	63,44±9,57^{d}	55,85±5,18^{b}	56,10±7,15^{bc}
Longitud raíz (cm)	39,04±8,62^{a}	65,75±6,73^{c}	67,60±7,58^{c}	68,25±12,45^{c}	65,03±8,15^{c}	58,50±10,21^{b}
Peso fresco vástago (g)	38,09±4,33^{a}	108,78±20,32^{b}	148,89±18,45^{d}	154,85±24,67^{d}	128,85±22,78^{c}	100,43±19,64^{b}
Peso fresco raíz (g)	15,79±1,55^{a}	39,10±4,91^{b}	63,96±9,90^{d}	66,83±15,52^{d}	57,70±8,43^{c}	58,17±12,65^{c}
Peso seco vástago (g)	5,47±1,93^{a}	22,22±5,56^{b}	26,56±2,98^{c}	29,74±5,96^{d}	25,05±6,74^{c}	20,27±6,8^{b}
Peso seco raíz (g)	1,91±0,78^{a}	8,00±2,49^{b}	15,06±3,10^{d}	12,37±2,56^{c}	13,93±3,33^{d}	17,27±4,65^{e}
N° de flores	6,14±5,74^{a}	41,40±19,12^{b}	50,40±13,34^{bc}	56,14±17,44^{c}	52,00±25,72^{bc}	47,80±28,00^{bc}
N° de frutos	-	9,75±4,12^{a}	10,10±3,91^{a}	11,38±5,68^{ab}	15,89±7,16^{c}	12,67±17,9 ^{b}

SS, suelo solo; A, abono solo, AAc, abono con *Achromobacter* sp.; ABm, abono con *Bacillus mycoides*; APd, abono con *Paenibacillus dendritiformis*; AB, abono con *Bacillus* sp. ($p \leq 0{,}05$).

Fuente: *autores*

Durante el cultivo se observó que las plantas control SS demoraron más en iniciar la floración y desarrollaron menor número de flores, seguido del abono solo. En este sentido, las plantas que primero florecieron y fructificaron fueron las inoculadas con *Achromobacter* sp. y *B. mycoides.* Además, al analizar todas las variables se observa que todos los tratamientos son diferentes del control (Figuras 2). Asimismo, según el análisis foliar, todos los tratamientos con inoculantes mostraron mayor contenido de nitrógeno que los controles (4,3 % del peso seco en tejido de plantas tratadas con *Achromobacter* y *B. mycoides*, y 3,4 % en suelo solo). Esto corresponde con la capacidad de las bacterias aplicadas para fijar N_2.

Al analizar las variables para estimar el efecto de los biofertilizantes sobre el crecimiento del ají, se puede observar a los 87 días, en todos los tratamientos con inoculante y abono, que el crecimiento vegetal se vio favorecido con respecto a las plantas cultivadas en suelo de Malambo. En conclusión, la aplicación de fertilizantes orgánicos y endomicorrizas aumenta la productividad de *C. annuum* (Zayed et al., 2013).

Siendo así, estos abonos, que son producidos aprovechando materiales que normalmente son desechados y causan problemas fitosanitarios, pueden potenciar y beneficiar los cultivos de los pequeños productores de la región Caribe al incrementar la productividad y sanidad del cultivo de ají.

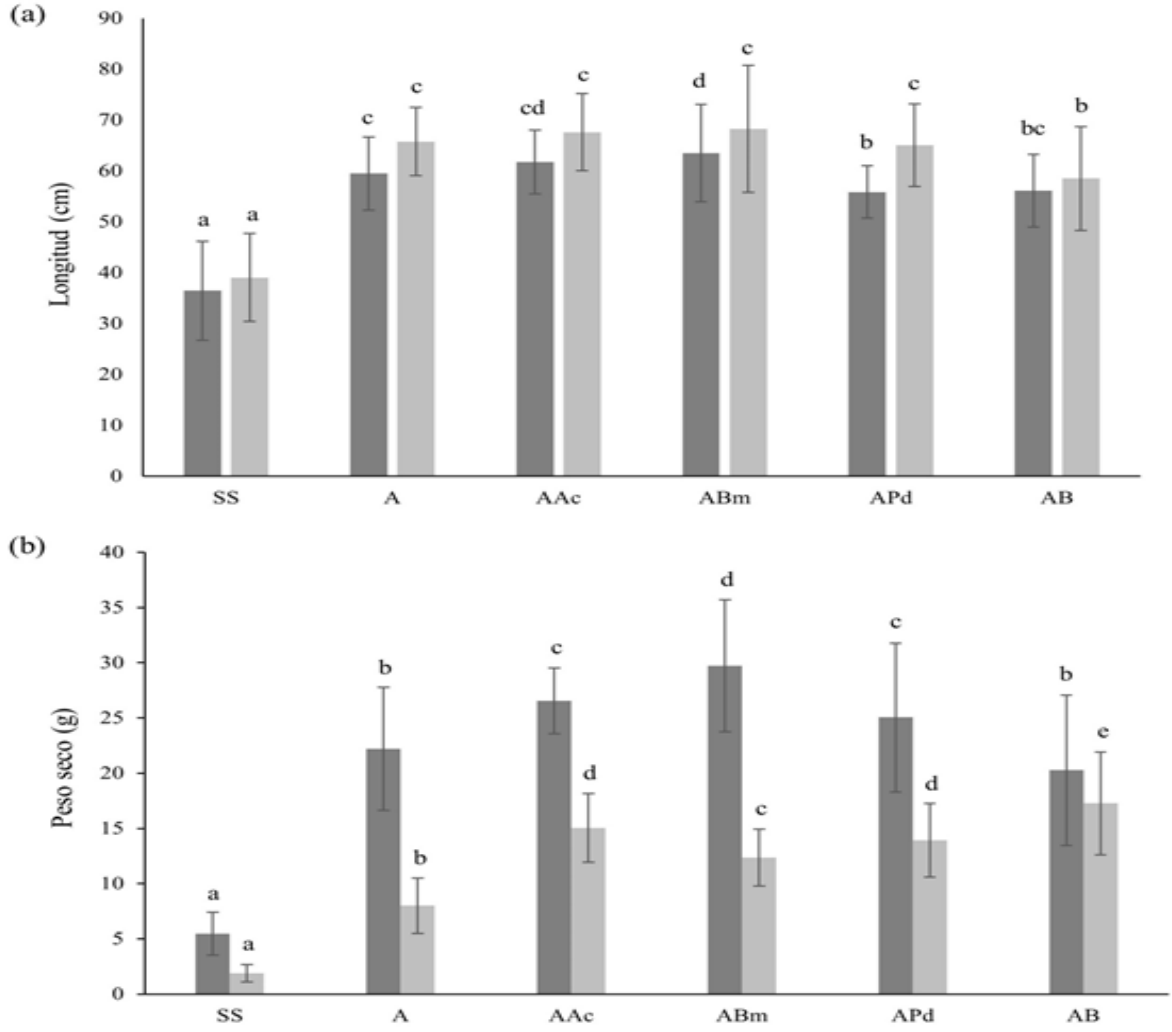


Figura 1. Crecimiento de plantas de ají. (a) Longitud promedio. (b) Peso seco. SS, suelo solo; A, abono solo; AAc, abono con *Achromobacter* sp.; ABm, abono con *Bacillus mycoides*; APd, abono con *Paenibacillus dendritiformis*; AB, abono con *Bacillus* sp. Las barras indican la desviación estándar. Las medias en las barras seguidas por la(s) misma(s) letra(s) no son significativamente diferentes (Tukey p ≤ 0,05). ▪ Vástago ▪ Raíz. ***Fuente:*** autores

Existe mayor efecto benéfico de los tratamientos con ABm sobre el cultivo de ají (Figura 1 y 2). El género *Bacillus* es ampliamente empleado como herramienta biotecnológica en la agricultura y la industria y, en el caso de *B. mycoide*s, se ha demostrado su efecto benéfico, principalmente como promotor de crecimiento y bio-controlador de fitopatógenos en tomate, pimentón, ají picante, tabaco, melón, pepino y caña de azúcar (Bai et al., 2002; Bargabus et al., 2002; Kloepper et al., 2004).

Asimismo, se ha mostrado la capacidad de especies de *Bacillus* de promover el crecimiento e inducir resistencia sistémica contra *Botrytis cinerea* y *Fusarium solani* en pimentón (Márquez et al., 2020), y *B. subtilis* incrementa el crecimiento de plantas de tomate y ají en 16 % y 37 %, respectivamente (Luna-Martínez et al. 2013), e inhibe el crecimiento del moho gris en tomates en condiciones de invernadero (Xiao-Ying et al., 2015). En este sentido, vale la pena resaltar que aunque el crecimiento de las plantas inoculadas con *Bacillus* sp. fue menor que en presencia de *B. mycoide*s, las primeras se desarrollaron sin presentar signos asociados a presencia de fitopatógenos, por lo cual es necesario evaluar las posibles relaciones antagonistas del inóculo (Berg, 2009; Kloepper et al., 2004; Márquez et al., 2020).

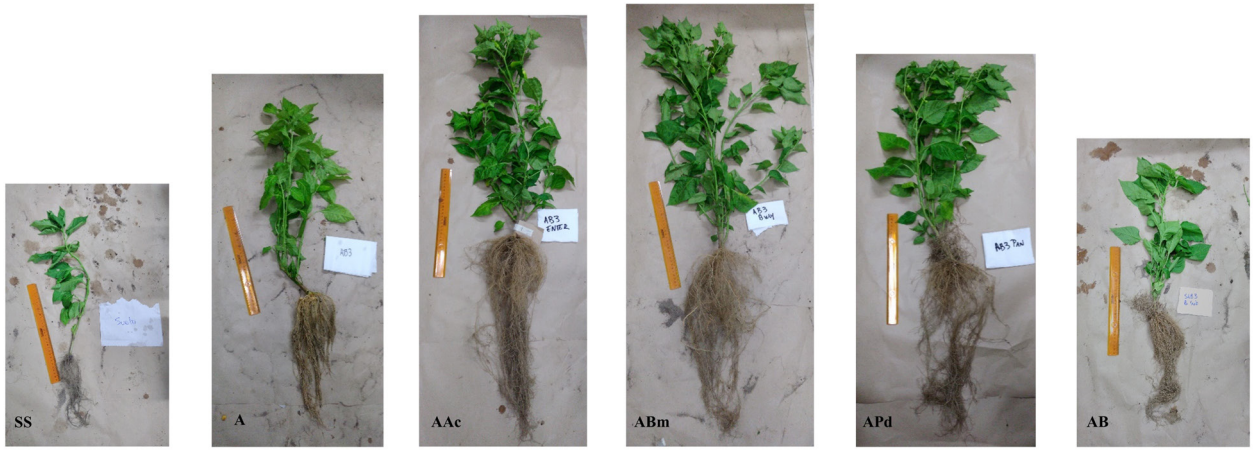


Figura 2. *Desarrollo vegetativo de plantas de ají. SS, suelo solo; A, abono solo; AAc, abono con Achromobacter sp.; ABm, abono con Bacillus mycoides; APd, abono con Paenibacillus dendritiformis; AB, abono con Bacillus sp.*

Fuente: *autores*

De igual forma, se ha observado que *Achromobacter* sp., en cultivos de tomate, aumenta significativamente el crecimiento, parámetros de rendimiento y contenido de fitohormonas endógenas (Abdel-Rahman et al., 2017). También este género, en presencia de *B. cereus, B. subtilis* y *Serratia* sp., se ha asociado a un aumento en la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio; así como al control de fitopatógenos en cultivos de *C. annuum* (Zhang et al., 2019). Además, *A. spanius* y *A. xylosoxidansse* han sido reportadas como solubilizadoras de fosfato y productoras de compuestos indólicos (Gaviria-Giraldo et al., 2018) y proporcionan tolerancia a diferentes ambientes de estrés abiótico, como sequía y salinidad en plantas de tomate y ají (Shrivastava & Kumar, 2015).

Por su parte, *P. dendritiformis* ya ha sido estudiado y probado como bio-controlador y promotor de crecimiento. En cultivos de papa redujo significativamente el área de afectación de tubérculos infectados por *Pectobacterium carotovorum* y aumentó significativamente el rendimiento (Lapidot et al., 2015). *Paenibacillus* sp., a su vez, mostró favorecer la absorción de nutrientes de arroz cultivado en condiciones de exceso de hierro, indicando que permite mitigar dichos efectos (De Souza et al. 2015).

Dado que el nitrógeno es esencial, la fijación de N_2 por parte de las bacterias tiene un efecto positivo en el metabolismo y crecimiento de las plantas (Liu et al., 2019). Sin embargo, el rendimiento de los

cultivos tratados con biofertilizantes está condicionado por la adaptabilidad de los microorganismos al microclima y al suelo no nativo, ya que son aislados de regiones y condiciones diferentes para su uso (Malusà et al., 2016; Sruthilaxmi & Babu, 2017). Por lo tanto, un aspecto significativo de este trabajo es que las cepas evaluadas están adaptadas a las condiciones biológicas y ambientales de la región Caribe. Ya numerosos trabajos han demostrado la interacción benéfica de estas especies en otras regiones (Jiménez et al., 2011; Moreno-Quevedo et al., 2014; Gamez et al., 2015), empero, nunca se habían realizado en la región Caribe y en esta no existen empresas productoras de biofertilizante (Pérez-Lavalle et al., 2016; Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2019).

Así, los inoculantes probados en este estudio tienen gran potencial para emplearse en el desarrollo biotecnológico adecuado para la región Caribe colombiana. Su implementación favorecería el crecimiento y producción de los cultivos tradicionales y traería otros beneficios derivados, como el reciclaje de nutrientes y recuperación de los suelos; la limpieza de los cultivos que contribuye con el control de plagas y patógenos; la disminución del uso de agroquímicos; la autosostenibilidad y la disminución de la inversión económica en el cultivo.

CONCLUSIONES

En este estudio se ha proporcionado una prospección inicial de la comunidad bacteriana presente en suelos del Caribe colombiano. Se han identificado bacterias promotoras de crecimiento, adaptadas a las condiciones ambientales de la región, que favorecen el desarrollo del cultivo de ají. Finalmente, basados en los resultados de la prueba de campo y sustentados estadísticamente, los mejores inoculantes probados son *Bacillus mycoides* y *Achromobacter* sp. Así, dado su gran potencial como promotores de crecimiento y bio-controladores, resulta importante realizar algunos estudios metabólicos, moleculares, pruebas de antagonismo y actividad en consorcio de estos aislados, para garantizar su funcionalidad e inocuidad para aplicaciones biotecnológicas en la agricultura del Caribe colombiano.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

María Serrano: curación de datos, análisis formal, investigación, escritura.
Liliana Pérez: conceptualización, metodología, supervisión, escritura.
Hilda Estrada López: conceptualización, adquisición de fondos, supervisión.
Rosnairy Mancera: investigación.
Yani Aranguren: conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, supervisión, validación, escritura.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Colciencias por la financiación del proyecto "Desarrollo de productos de confitería y fertilizantes para la generación de valor agregado asociado a la producción de productos agrícolas en el departamento del Atlántico" (código No. 153-2016). Asimismo, este trabajo fue posible gracias al equipo del Laboratorio de Investigación en Microbiología, especialmente a María Martínez, Andrea Romero, Leidy Coronado y María Castro. También agradecemos al grupo de investigación Bio-Organizaciones y a las cooperativas agrícolas AGROSUR y ASOFRUMA.

LITERATURA CITADA

Abdel-Rahman, H. M., Salem, A. A., Moustafa, M. M. A. & El-Garhy, H. A. S. (2017). A novice *Achromobacter* sp. EMCC1936 strain acts as a plant-growth-promoting agent. *Acta Physiologiae Plantarum*, *39*(2), 61. https://doi.org/10.1007/s11738-017-2360-6

Bai, Y., D'Aoust, F., Smith, D. L. & Driscoll, B. T. (2002). Isolation of plant-growth-promoting *Bacillus* strains from soybean root

nodules. *Canadian Journal of Microbiology*, *48*(3), 230–238. https://doi.org/10.1139/w02-014

Bargabus, R. L., Zidack, N. K., Sherwood, J. E. & Jacobsen, B. J. (2002). Characterisation of systemic resistance in sugar beet elicited by a non-pathogenic, phyllosphere-colonizing *Bacillus mycoides*, biological control agent. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *61*(5), 289–298. https://doi.org/10.1006/pmpp.2003.0443

Berg, G. (2009). Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *84*(1), 11–18. https://doi.org/10.1007/s00253-009-2092-7

Bergkessel, M. & Guthrie, C. (2013). Colony PCR. En J. Lorsch (Ed.), *Methods in Enzymology* (pp. 299–309. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418687-3.00025-2

Bulgarelli, D., Schlaeppi, K., Spaepen, S., Van Themaat, E. V. L. & Schulze-Lefert, P. (2013). Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annual Review of Plant Biology*, *64*(1), 807–838. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120106

Cabra-Cendales, T., Rodríguez González, C. A., Villota Cuásquer, C. P., Tapasco Alzate, O. A. & Hernández Rodríguez, A. (2017). *Bacillus* effect on the germination and growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L). *Acta Biológica Colombiana*, *22*(1), 37. https://doi.org/10.15446/abc.v22n1.57375

De Souza, R., Meyer, J., Schoenfeld, R., Da Costa, P. B. & Passaglia, L. M. P. (2015). Characterization of plant growth-promoting bacteria associated with rice cropped in iron-stressed soils. *Annals of Microbiology*, *65*(2), 951–964. https://doi.org/10.1007/s13213-014-0939-3

Galvis, L. A. (2009). *Geografía económica del Caribe Continental*. Banco de la República.

Gamez, R. M., Rodríguez, F., Bernal, J. F., Agarwala, R., Landsman, D. & Mariño-Ramírez, L. (2015). Genome sequence of the banana plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus amyloliquefaciens* BS006. *Genome Announcements*, *3*(6). https://doi.org/10.1128/genomeA.01391-15

Gaviria-Giraldo, J., Restrepo-Franco, G. M., Galeano-Vanegas, N. F. y Hernández-Rodríguez, A. (2018). Bacterias diazotróficas con actividad promotora del crecimiento vegetal en *Daucus carota* L. *Ciencia y Agricultura*, *15*(1), 19–27. https://doi.org/10.19053/01228420.v15.n1.2018.7753

Gregorczyk, A. (1998). Richards plant growth model. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *181*(4), 243–247. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1998.tb00424.x

Instituto Colombiano Agropecuario. (2019). *Empresas registradas bioinsumos*. https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/fertilizantes-y-bio-insumos-agricolas/listado-de-bioinsumos/2009/empresas-registradas-bioinsumos-julio-8-de-2008.aspx

Jaurixje, M., Torres, D., Mendoza, B., Henríquez, M. y Contreras, J. (2013). Propiedades físicas y químicas el suelo y su relación con la actividad biológica bajo diferentes manejos en la zona de Quíbor, Estado Lara. *Bioagro*, *25*(1), 47–56. http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev25(1)/6. MS 1211.pdf

Jiménez, D. J., Montaña, J. S. & Martínez, M. M. (2011). Characterization of free nitrogen fixing bacteria of the genus *Azotobacter* in organic vegetable-grown Colombian soils. *Brazilian Journal of Microbiology*, *42*(3), 846–858. https://doi.org/10.1590/S1517-83822011000300003

Kloepper, J. W., Ryu, C.-M. & Zhang, S. (2004). Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. *Phytopathology*, *94*(11), 1259–1266. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1259

Lapidot, D., Dror, R., Vered, E., Mishli, O., Levy, D. & Helman, Y. (2015). Disease protection and growth promotion of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) by *Paenibacillus dendritiformis*. *Plant Pathology*, *64*(3), 545–551. https://doi.org/10.1111/ppa.12285

Liu, X., Li, Q., Li, Y., Guan, G. & Chen, S. (2019). *Paenibacillus* strains with nitrogen fixation and multiple beneficial properties for promoting plant growth. *PeerJ*, *7*. https://doi.org/10.7717/peerj.7445

Luna-Martínez, L., Peniche, M., Hernández Iturriaga, M., Arvizu Medrano, S. y Pacheco, J. (2013). Caracterización de rizobacterias aisladas de tomate y su efecto en el crecimiento de tomate y pimiento. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *36*(1), 63–69.

Malusà, E., Pinzari, F. & Canfora, L. (2016). Efficacy of biofertilizers: challenges to Improve crop production. En D. Pratab, H. Bahadur y R. Prabha. (Eds.), *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity* (pp. 17–40). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4_2

Márquez, R., Blanco, E. L. & Aranguren, Y. (2020). *Bacillus* strain selection with plant growth-promoting mechanisms as potential elicitors of systemic resistance to gray mold in pepper plants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *27*(8), 1913–1922. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.015

Martínez, A. C. (2015). *Requerimientos nutricionales del ají Capsicum annuum L. y su relación con rendimiento bajo condiciones ambientales de Palmira, Valle del Cauca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/53873

Massah, J. & Azadegan, B. (2016). Effect of chemical fertilizers on soil compaction and degradation. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*, *47*(1), 44–50.

Moreno-Quevedo, Á. P., Osorio Vega, N. W. y González Murillo, O. A. (2014). In vitro dissolution of acidulated rock phosphate by phosphate solubilizing microorganisms. *Acta Biológica Colombiana*, *20*(2). https://doi.org/10.15446/abc.v20n2.42713

Osorio N. 2012. pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal.* 1(4):1–4.

Pérez-Lavalle, L., Bolívar Anillo, H. y Díaz Pérez, A. (2016). Biofertilizantes en Colombia. En H. H. Estrada, H. G. Saumett y M. A. Iglesias. (Eds.), *Productos de confitería nutracéutica y biofertilizantes: Una opción empresarial para cultivadores de frutas y hortalizas* (pp. 179–222). Universidad Simón Bolívar.

Saxena, A. K., Kumar, M., Chakdar, H., Anuroopa, N. & Bagyaraj, D. J. (2019). *Bacillus* species in soil as a natural resource for plant health and nutrition. *Journal of Applied Microbiology*, 128(6), 1583-1594. https://doi.org/10.1111/jam.14506

Sevilla-Perea, A. & Mingorance, M. D. (2015). Field approach to mining-dump revegetation by application of sewage sludge co-compost and a commercial biofertilizer. *Journal of Environmental Management*, *158*, 95–102. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.017

Shrivastava, P. & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *22*(2), 123–131. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001

Sruthilaxmi, C. B. & Babu, S. (2017). Microbial bio-inoculants in Indian agriculture: Ecological perspectives for a more optimized use. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *242*, 23–25. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.019

Subbarao, N. S. (1977). *Soil Microorganisms and Plant Growth* (3rd ed.). aIBH Publishing Co.

Vassilev, N., Vassileva, M., Lopez, A., Martos, V., Reyes, A., Maksimovic, I., Eichler-Löbermann, B. & Malusà, E. (2015). Unexploited potential of some biotechnological techniques for biofertilizer production and formulation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *99*(12), 4983–4996. https://doi.org/10.1007/s00253-015-6656-4

Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, *255*(2), 571–586. https://doi.org/10.1023/A:1026037216893

Vida, C., Cazorla, F. M. & De Vicente, A. (2017). Characterization of biocontrol bacterial strains isolated from a suppressiveness-

induced soil after amendment with composted almond shells. *Research in Microbiology*, *168*(6), 583–593. https://doi.org/10.1016/j.resmic.2017.03.007

Wang, D., Yang, S., Tang, F. & Zhu, H. (2012). Symbiosis specificity in the legume - rhizobial mutualism. *Cellular Microbiology*, *14*(3), 334–342. https://doi.org/10.1111/j.1462-5822.2011.01736.x

Wilson, K. H., Blitchington, R. B. & Greene, R. C. (1990). Amplification of bacterial 16S ribosomal DNA with polymerase chain reaction. *Journal of Clinical Microbiology*, *28*(9), 1942–1946.

Wu, J., Jiao, Z., Zhou, J., Guo, F., Ding, Z. & Qiu, Z. (2017). Analysis of bacterial communities in rhizosphere soil of continuously cropped healthy and diseased konjac. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *33*(7), 134. https://doi.org/10.1007/s11274-017-2287-5

Xiao-Ying, G., Chun-e, H., Tao, L. & Zhu, O. (2015). Effect of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens* on growth of greenhouse tomato and rhizosphere microbial community. *Journal of Northeast Agricultural University*, *22*(3), 32–42. https://doi.org/10.1016/S1006-8104(16)30004-6

Zayed, M. S., Hassanein, M. K. K., Esa, N. H. & Abdallah, M. M. F. (2013). Productivity of pepper crop (*Capsicum annuum* L.) as affected by organic fertilizer, soil solarization, and endomycorrhizae. *Annals of Agricultural Sciences*, *58*(2), 131–137. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2013.07.011

Zhang, L.N., Wang, D.C., Hu, Q., Dai, X.Q., Xie, Y.S., Li, Q., Lu, H. M. & Guo, J.H. (2019). Consortium of plant growth-promoting rhizobacteria strains suppresses sweet pepper disease by altering the rhizosphere microbiota. *Frontiers in Microbiology*, *10*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01668

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.