



POTENCIAL BIOFERTILIZANTE DE RIZOBACTERIAS ASOCIADAS A CULTIVOS AMAZÓNICOS DE IMPORTANCIA ECONÓMICA

BIOFERTILIZER POTENTIAL OF RHIZOBACTERIA ASSOCIATED WITH ECONOMICALLY IMPORTANT AMAZONIAN CROPS

Juan Carlos Alvarado-Ibáñez ^{1*}, José Mostacero-León ², Mayra Karina Gutiérrez-Araujo ²

¹Universidad Nacional Intercultural "Fabiola Salazar Leguía" de Bagua, Jr. Comercio N° 128, Bagua, Perú

²Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II S/N, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú

Juan Carlos Alvarado-Ibáñez:  <https://orcid.org/0000-0002-6413-3457>
José Mostacero-León:  <https://orcid.org/0000-0003-2556-3013>
Mayra Gutiérrez-Araujo:  <https://orcid.org/0000-0002-1599-2386>

Artículo original

Recibido: 30 marzo 2021

Aceptado: 5 de octubre 2021

Resumen

La rizósfera de los cultivos vegetales posee una gran diversidad microbiana, sobresaliendo la población de bacterias que viven en asociación con las plantas y participan de la nutrición vegetal. Se evaluó el potencial biofertilizante de bacterias nativas aisladas del suelo rizosférico de ocho especies vegetales de importancia económica de las provincias de Bagua y Utcubamba, región Amazonas, Perú. Los criterios de selección fueron, la capacidad solubilizadora de fosfatos, la producción de ácido indol acético y la capacidad de fijación biológica de nitrógeno (FBN), además de cuantificar las bacterias diazotróficas presentes en la rizósfera de cada especie vegetal estudiada. Se colectaron muestras de suelo rizosférico de 57 parcelas ubicadas entre los 385 a 1677 m.s.n.m., mediante siembra directa, se aislaron bacterias, se purificaron y se determinó su grupo funcional. Los suelos estudiados fueron de textura franco-arenosa y franco-limosa principalmente con valores de pH entre 3,30 y 8,09. Se obtuvo 235 aislamientos de bacterias nativas del rizoplano de plantas de cacao, café, piña, plátano, papaya, yuca, yacón y arroz y se seleccionaron 16 de estos cultivos pertenecientes a cuatro especies vegetales. La rizósfera de los cultivos de café posee la mayor cantidad de bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno, el cacao y el yacón destacan por las bacterias productoras de ácido indol acético, y el café y papaya, por los solubilizadores de fosfatos. Es importante investigar las poblaciones rizosféricas nativas de estos cuatro cultivos vegetales para aislar y seleccionar bacterias con potencial biofertilizante.

Palabras clave: Cultivos amazónicos, fijadores de nitrógeno, productores de ácido indol acético, solubilizadores de fosfatos.

Abstract

The biofertilizer potential of native bacteria isolated from the rhizospheric soil of eight plant species of economic importance from the Bagua and Utcubamba provinces, Amazonas region, Peru, was evaluated. The selection criteria were the solubilizing capacity of phosphates, the production of indole acetic acid and the asymbiotic fixation of atmospheric nitrogen, in addition to quantifying the diazotrophic bacteria present in each plant species studied. 57 plots located between 385 to 1677 m.a.s.l. were sampled, obtaining 235 isolates of native rhizoplane bacteria from cocoa, coffee, pineapple, banana, papaya, yucca, yacon and rice plants. The sampled soils were mainly loamy-sandy and loamy-loamy, with a variable pH between 3.30 and 8.09. Sixteen bacterial cultures of four plant species with biofertilizer potential were selected, finding that the rhizosphere of coffee crops has the highest amount of asbiotic nitrogen fixing bacteria, cocoa and yacon stand out for hosting excellent producers of indole acetic acid coffee and papaya crops, excellent phosphate solubilizers were isolated. In order to replace the use of chemical fertilizers, it is important to investigate the native rhizospheric populations of these four economically important Amazonian crops in search of native bacteria with biofertilizer potential to mitigate the consequences to the environment.

Keywords: Amazonian crops, Biofertilizer potential, plant growth-promoting rhizobacteria.

*Autor para correspondencia: E. mail: jalvarado@unibagua.edu.pe

DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/rebiol.2021.41.02.01>

Citar como:

Alvarado-Ibáñez, J., Mostacero-León, J. & Gutiérrez-Araujo, M. 2021. Potencial biofertilizante de rizobacterias asociadas a cultivos amazónicos de importancia económica. REBIOL, 41(2):156-166.



1. Introducción

El crecimiento exponencial de la población mundial y la demanda de alimentos orgánicos sin contaminar el ambiente, orientan las investigaciones hacia los microorganismos con potencial biofertilizante, debido a que se ha demostrado que el uso excesivo de fertilizantes químicos provoca una disminución de la fertilidad del suelo (Lin et al., 2019), afecta la composición de las comunidades microbianas y una serie de problemas ambientales, mientras que los biofertilizantes incrementan la fertilidad del suelo (Chen et al., 2016). Para mejorar la producción sin el uso de fertilizantes de origen sintético, se incrementó el interés en los microorganismos benéficos del suelo porque pueden promover el crecimiento de las plantas y, en algunos casos, evitar infecciones del tejido vegetal por patógenos (Moreno et al., 2018).

Los microorganismos al interactuar con las plantas, desempeñan un rol importante en la fertilización de los suelos, en especial, de los suelos amazónicos que están meteorizados y son relativamente pobres en nutrientes (Magalhães et al., 2014; Quesada et al., 2011). Debido a su gran diversidad biológica y geográfica, la rizósfera de las especies vegetales cultivadas en la región Amazonas, cuenta con una abundante microbiota que debería estudiarse a detalle, donde ocurren numerosas interacciones entre las plantas y sus microorganismos. Los microbios del suelo pueden ser atraídos o repelidos por las moléculas liberadas por las diversas especies vegetales (Medina et al., 2014), sin embargo, la mejora del crecimiento y la productividad es influenciada por la exudación de las raíces de las plantas, la colonización bacteriana en las raíces y la salud del suelo (Fanin et al., 2015).

La diversidad de los microorganismos nativos adaptados a vivir en la rizósfera de las plantas de la amazonía, han desarrollado mecanismos de interacción, que permiten colonizar eficazmente la superficie de las raíces de las plantas formando un microecosistema rizosférico mantenido por la agricultura tradicional que se practica en esta zona del país. La interacción rizosférica entre el microbio y la planta, cumple un rol importante para la salud, la productividad de las plantas y la fertilidad del suelo. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden mejorar el crecimiento (Salazar-Henao et al.,

2016), protegerlas de enfermedades y estrés abiótico por diversos mecanismos tales como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fosfato, la actividad de la enzima ACC desaminasa, la producción de sideróforos y fitohormonas (Banerjee et al., 2017; Souza et al., 2015).

El nitrógeno forma parte de las moléculas biológicas y es el nutriente más requerido por las plantas. La atmósfera representa su mayor potencial biológico de reserva al cual acceden pocos microorganismos fijándolos de manera simbiótica o en vida libre. La elevada necesidad de este elemento incrementa los estudios de las bacterias fijadoras de nitrógeno en plantas de familias diferentes a las leguminosas, destacando la importancia de cuantificar las poblaciones de bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno (diazótrofas), utilizando la técnica de Número Más Probable (Argüello et al., 2016), con la finalidad de reducir los impactos negativos que genera la implementación de agroquímicos sobre el medio ambiente para implementar sistemas de agricultura limpia y sustentable, donde las bacterias diazotróficas son una alternativa para la fertilización de los cultivos de una forma más amigable con el ambiente (Jones & Oburger, 2011; Kaschuk & Hungria, 2017; Shin et al., 2016).

El Perú es un país agrícola y la agricultura está en constante crecimiento económico (Nehra et al., 2016). Las provincias de Bagua y Utcubamba de la región Amazonas, ubicadas en la zona nororiental del país, sustentan su economía en la agricultura y los principales cultivos de interés económico son el cacao, café, piña, plátano, papaya, yuca, yacón y arroz, este último, ampliamente cultivado en las riberas de los principales ríos de la región. A excepción del arroz, la mayoría de estos cultivos no están bajo una agricultura intensiva, que afecta las funciones del ecosistema y disminuye la diversidad biológica (Landeros-Sánchez et al., 2011); sin embargo, estos mismos cultivos permanecen por largos periodos de tiempo, generando la disminución de materia orgánica y propiciando la progresiva disminución de la fertilidad de los suelos (Duval et al., 2015; Fernández-Ojeda et al., 2016) y cambios en las comunidades microbianas del suelo (Myrold et al., 2014; Wang et al., 2017).

La región Amazonas es conocida por la enorme diversidad de su flora y fauna, sin embargo, a pesar de los estudios realizados sobre biodiversidad, es necesario profundizar

las investigaciones para conocer y conservar los recursos genéticos propios de esta región. Existen pocos estudios relacionados a las poblaciones microbianas y su variabilidad genética, sin mencionar que solo entre 1 y 3% de las bacterias del suelo pueden ser cultivadas en medios sintéticos de laboratorio (Rahman et al., 2017), además, los suelos amazónicos son geomorfológicamente diversos (Quesada et al., 2011), y las comunidades vegetales influyen en la diversidad de filos de las comunidades bacterianas en el suelo (Barbosa et al., 2015).

Las bacterias adaptadas a un ecosistema y una región determinada podrían ser más competitivas que las bacterias foráneas o introducidas (Karagoz et al., 2012), por lo tanto, es importante aislar y seleccionar estas bacterias nativas, orientadas al desarrollo de inoculantes destinados a cultivos regionales. Vanegas et al. (2012) afirma que el desarrollo de biofertilizantes debe iniciarse con el aislamiento de microorganismos de interés y la caracterización de los mecanismos asociados con la promoción del crecimiento vegetal. Se ha estudiado las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal, orientando las investigaciones al aislamiento e identificación de cultivos provenientes de arroz (Ríos-Ruiz et al., 2020; Sahoo et al., 2014; Souza et al., 2015), maíz (López-Ortega et al., 2013), plátano (Andrade et al., 2014) y hortalizas como el cilantro y lechuga (Cárdenas et al., 2013).

La búsqueda y el aislamiento de microorganismos nativos con capacidad biofertilizante es importante para reducir el uso de fertilizantes de síntesis química (Banerjee et al., 2017). La reducción o eliminación de estos fertilizantes es posible con inoculantes eficientes, para lo cual, las bacterias nativas deben establecerse y adaptarse exitosamente en estrecha relación con los cultivos de la zona y bajo condiciones particulares de clima y suelo, propios de las provincias de Bagua y Utcubamba. Es por ello que el presente trabajo estuvo orientado a estudiar el potencial biofertilizante de bacterias nativas aisladas de la rizósfera de ocho cultivos amazónicos, como una herramienta biotecnológica para mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y lograr disminuir los efectos ambientales causados por el exceso de fertilizantes químicos.

2. Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó entre los años 2019 y 2020 en las provincias de Bagua y Utcubamba de la región Amazonas, en el nororiente del Perú (Figura 1). Se analizaron muestras de suelo rizosférico de 57 parcelas ubicadas entre los 385 a 1677 m.s.n.m., de 23 sectores agrícolas cultivados con ocho especies vegetales de importancia económica (Tabla 1).

Se realizó el análisis de textura del suelo de las parcelas muestreadas utilizando el hidrómetro de Bouyoucos y las clases de textura se calcularon según el triángulo de textura (Bouyoucos, 1962; Quesada et al., 2011), obteniendo suelos de textura franco-arenosa y franco-limosa principalmente y el pH se determinó en una suspensión de suelo: agua destilada (1:1), encontrando valores entre 3,30 y 8,09 (Agriculture, 2019).

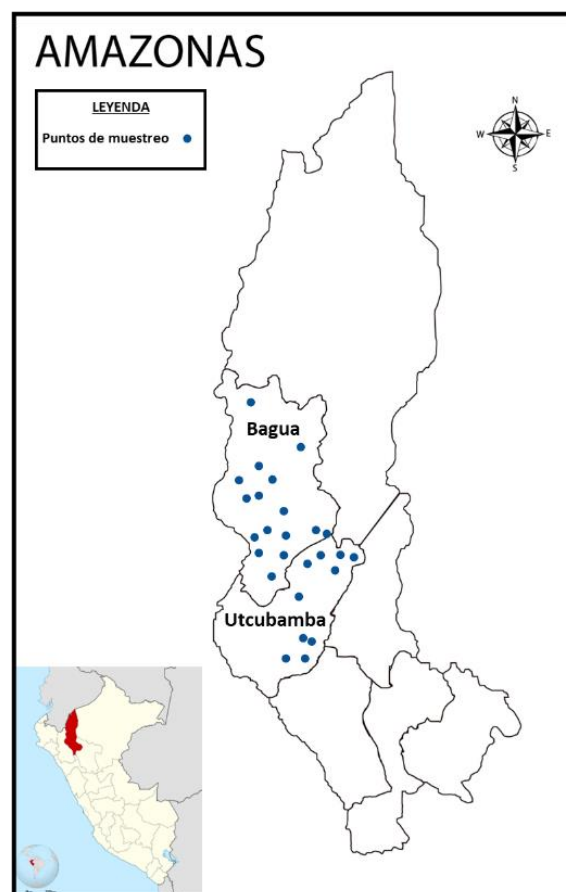


Figura 1. Puntos de muestreo de 23 sectores agrícolas cultivados con especies vegetales de importancia económica en Bagua y Utcubamba, región Amazonas, Perú.

Tabla 1. Distribución de sectores, número de parcelas, coordenadas geográficas y cultivo vegetal muestreado en las provincias de Bagua y Utcubamba.

PROVINCIA	SECTORES	N° PARCELAS	CULTIVO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS
Bagua	Achaguay	3	<i>Carica papaya</i>	5°35'29" S, 78°32'23" W
Bagua	Aramango	4	<i>Ananas comosus</i>	5°22'25" S, 78°27'13" W
Bagua	Arrayan	3	<i>Smilax sonchifolius</i>	5°33'21" S, 78°27'03" W
Bagua	Aserrillo	3	<i>Oryza sativa</i>	5°32'23" S, 78°30'19" W
Bagua	Bagua	2	<i>Musa paradisiaca</i>	5°38'22" S, 78°32'38" W
Bagua	Copallín	3	<i>Manihot esculenta</i>	5°36'06" S, 78°22'24" W
Bagua	Campo Bonito	3	<i>Ananas comosus</i>	5°32'48" S, 78°33'03" W
Bagua	Casual	2	<i>Musa paradisiaca</i>	5°35'50" S, 78°32'40" W
Bagua	Tomaque	3	<i>Carica papaya</i>	5°41'21" S, 78°29'25" W
Bagua	Chonza	2	<i>Theobroma cacao</i>	5°37'08" S, 78°15'34" W
Bagua	Espital	3	<i>Smilax sonchifolius</i>	5°26'18" S, 78°22'43" W
Bagua	Los Olivos	3	<i>Theobroma cacao</i>	5°38'14" S, 78°28'08" W
Bagua	Naranjos	3	<i>Smilax sonchifolius</i>	5°37'34" S, 78°19'39" W
Utcubamba	Huarangopampa	4	<i>Oryza sativa</i>	5°37'02" S, 78°22'52" W
Utcubamba	Santa Teresa	2	<i>Theobroma cacao</i>	6°08'00" S, 78°23'09" W
Utcubamba	Huaylla	2	<i>Oryza sativa</i>	5°47'16" S, 78°23'31" W
Utcubamba	Vista Hermosa	3	<i>Manihot esculenta</i>	6°00'46" S, 78°28'44" W
Utcubamba	Campo Redondo	1	<i>Coffea arabica</i>	5°50'56" S, 78°22'24" W
Utcubamba	Playa Azul	2	<i>Carica papaya</i>	6°08'59" S, 78°15'12" W
Utcubamba	Lima	1	<i>Coffea arabica</i>	6°10'54" S, 78°13'52" W
Utcubamba	La Palma	1	<i>Coffea arabica</i>	6°05'33" S, 78°28'12" W
Utcubamba	La Catarata	2	<i>Coffea arabica</i>	5°59'20" S, 78°27'45" W
Utcubamba	Nuevos Aires	2	<i>Coffea arabica</i>	6°07'58" S, 78°18'12" W
TOTAL	23	57	8	

Aislamiento de rizobacterias de plantas amazónicas

Se aislaron bacterias promotoras del crecimiento vegetal provenientes de la rizósfera de plantas amazónicas cultivadas en las provincias de Bagua y Utcubamba de la región Amazonas, Perú. Estos aislamientos se realizaron a partir de muestras de suelo rizosférico; obtenido de 10 submuestras de la misma parcela, tomados con una palana recta hasta los 30 cm de profundidad; en una cantidad de 500 g, que fueron transportados en un contenedor con hielo seco hasta el laboratorio de Biología y Biotecnología de la Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía de Bagua, para su posterior procesamiento. El aislamiento se realizó mediante diluciones decimales seriadas en agua peptonada hasta

1×10^{-6} (Reyes et al., 2006), inoculando a los medios de cultivo en placas de Petri con 100 μ L de las diluciones 10^{-5} y 10^{-6} . En el aislamiento se emplearon Agar nutritivo (Merck®), Agar Tripticasa soya (HiMedia®) y Agar de aislamiento de Actinomicetos (HiMedia®) para favorecer la diversidad y el crecimiento bacteriano. Cada rizobacteria nativa fue sembrada por puntura superficial con el asa bacteriológica en anillo (0,4 cm de diámetro), sobre medios de cultivo específico y fueron incubados a 28 °C, por 72 horas en aerobiosis. Las bacterias purificadas se conservaron a -20 °C en glicerol estéril al 30% y se realizó pruebas de tinción Gram para determinar sus características microscópicas.

Evaluación de los mecanismos de promoción de crecimiento de las cepas aisladas

Determinación cualitativa de bacterias solubilizadoras de fosfato

Una colonia de cada cepa fue cultivada en caldo nutritivo e incubado bajo condiciones de agitación, a 30°C por 24 horas. Las placas de Agar Pikovskaya's (bioWORLD®) fueron sembradas colocando 10 µL en el centro de la placa para determinar su actividad solubilizadora. El tamaño de los halos se calculó con el Índice de solubilización (IS): $IS = A/B$ (A: diámetro de la colonia + diámetro del halo y B: diámetro de la colonia) (Khan et al., 2010), seleccionando los cultivos que mostraron IS mayores a 3; las mediciones se realizaron por triplicado 7 días después de la siembra. Los cultivos bacterianos se mantuvieron en incubadora a 28°C y luz artificial.

Determinación de bacterias productoras de ácido indol acético (AIA)

Para la determinación de ácido indol acético según la reacción colorimétrica de Salkowski (Cardenas & Eduardo, 2007; García et al., 2010), cada bacteria nativa fue cultivada en 5 mL de caldo nutritivo por 24 horas, de donde se tomaron 0,6 mL para inocularlos en 5 mL de caldo tripticasa soya suplementado con L-triptófano 5 mM. Después de la incubación a 28°C, por 72 horas, en agitación constante (150 rpm), los cultivos fueron centrifugados a 6000 rpm, durante 15 minutos. A continuación 0,4 mL de cada uno de los sobrenadantes se depositaron en tubos, se agregaron 1,6 mL del reactivo de Salkowski modificado en una relación 1:4, se mezclaron y se dejaron en reposo durante 30 minutos, en oscuridad. La positividad a la producción de ácido indol acético estuvo dada por una coloración grosella y se leyó la absorbancia en espectrofotómetro de luz visible a 530 nm, seleccionando a los aislamientos bacterianos con AIA > 12,0 µg/mL (Sosa et al., 2019).

Determinación de bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno atmosférico

La detección de nitrógeno fijado in vitro se realizó según (Cadena & Martínez, 2020). Cada bacteria se sembró en 6 mL de medio semisólido Norris Glucose Nitrogen Free

Medium (HiMEDIA®), con azul de bromotimol para indicar la producción de ácidos en el medio. La incubación se realizó en aerobiosis, a 28°C, hasta por una semana y se consideró como fijadoras de nitrógeno, aquellas donde se observó su película gruesa blanquecina entre 3 a 5 mm bajo la superficie del medio de cultivo y el viraje del indicador.

Cuantificación de bacterias diazotrofas a partir de suelo rizosférico

De cada parcela muestreada, se tomó una muestra de 10 g de suelo y se agregó en un matraz con 90 mL de solución salina 0,85% agitándose con fuerza, para posteriormente realizar diluciones decimales hasta 10^{-4} , inoculando 1 mL de las diluciones 10^{-2} hasta 10^{-4} en tubos que contienen Norris Glucose Nitrogen Free Medium con azul de bromotimol (Ahmad & Kibret, 2014). Se consideraron 3 tubos por dilución, incubándose a 28°C por 7 a 10 días y los datos de la cuantificación por Número Más Probable (NMP) de las bacterias diazotrofas, se interpretaron según la tabla de McCrady (Döbereiner et al., 1995), contando los tubos positivos de cada una de las diluciones observando viraje de color, turbidez y la formación de un velo en la superficie del caldo, reportando en NMP/g (gramo de rizósfera seca).

3. Resultados

A partir de la rizósfera de cultivos amazónicos de importancia económica de las provincias de Bagua y Utcubamba, se aislaron 235 cultivos bacterianos, de los cuales 28 fueron obtenidos de las plantas de *Theobroma cacao* (11,9%), 41 de *Coffea arabica* (17,4%), 24 de *Ananas comosus* (10,2%), 24 de *Musa paradisiaca* (10,2%), 47 de *Carica papaya* (20%), 21 de *Manihot esculenta* (8,9%), 27 de *Smilax sonchifolius* (11,5%) y 23 de *Oryza sativa* (9,8%) (Tabla 2). Siguiendo los criterios de selección de bacterias con potencial biofertilizante (Tang et al., 2020; Banerjee et al., 2017; Medina et al., 2014), se seleccionaron seis cultivos bacterianos por cada criterio. Los criterios de selección fueron tres; la capacidad de fijación asimbiótica de nitrógeno (presencia de acidez y película), la producción de ácido indolacético (AIA > 12,0 µg/mL), y la solubilización de fosfatos (IS > 3).

Tabla 2. Porcentaje de rizobacterias aisladas de cultivos vegetales de Bagua y Utcubamba, con potenciales características biofertilizantes.

Cultivos vegetales	Aislamientos bacterianos (%)	Fijadores asimbióticos de nitrógeno (%)	Productores de AIA (%)	Solubilizadores de fosfatos (%)
<i>Theobroma cacao</i>	11,9	0,4	0,9	0,4
<i>Coffea arabica</i>	17,4	1,4	0	0,9
<i>Ananas comosus</i>	10,2	0,4	0,4	0,4
<i>Musa paradisiaca</i>	10,2	0	0	0
<i>Carica papaya</i>	20,0	0,4	0,4	0,9
<i>Manihot esculenta</i>	8,9	0	0	0
<i>Smallanthus sonchifolius</i>	11,5	0	0,9	0
<i>Oryza sativa</i>	9,8	0	0	0
Total	100	2,6	2,6	2,6

La actividad promotora del crecimiento vegetal se determinó in vitro y se seleccionaron 16 cultivos bacterianos; de los cuales siete fueron aislados de la rizósfera de *C. arabica* (CF03, CF05, CF10, CF13, CF14, CF20 y CF30); cuatro de *C. papaya* (PA07, PA10, PA13 y PA18), tres de *T. cacao* (CC01, CC02 y CC10) y dos de *A. comosus* (PN03 y PN09). Así tenemos los cultivos seleccionados como solubilizadores de fosfatos (CC02, CF10, CF14, PA10, PA13 Y PN03), los productores de ácido indol acético (CC10, CF05, CF20, CF30, PA07 y PN09), y los fijadores asimbióticos de nitrógeno (CC01, CF03, CF10, CF13, PA18 y PN03); dos de los cultivos aislados poseen más de una actividad de promoción del crecimiento vegetal (CF10 y PN03), provenientes de la rizósfera de café y piña respectivamente demostraron fijar el nitrógeno de manera asimbiótica y solubilizar los fosfatos. El cultivo de café presenta la mayor cantidad de bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno atmosférico, el cacao y el yacón, los mejores productores de ácido indol acético, el café y la papaya destacan por las bacterias con los mayores índices de solubilización de fosfato tricálcico (Tabla 2).

A partir de las muestras de suelo tomadas (Tabla 1) de cada una de las parcelas de textura franco-arenosa y franco-limosa principalmente y pH variable entre 3,30 y 8,09 se cuantificó la población de bacterias diazotróficas de la rizósfera de los cultivos de importancia económica

de las provincias de Bagua y Utcubamba de la región Amazonas, Perú. La población de bacterias diazótrofes en los ocho cultivos vegetales investigados fue variado, obteniendo poblaciones mayores a los 1100 NMP/g de suelo y también hubo muestras con cantidades por debajo de los 3 NMP/g suelo. Utilizando la técnica de NMP, se determinó como positivos aquellos crecimientos bacterianos que presentaron acidez, turbidez y formación de película a 28°C entre 7 a 10 días de incubación (Figura 2).



Figura 2. Evaluación del crecimiento de bacterias diazótrofes por el método de NMP, en suelo rizosférico de cultivos de importancia económica de las provincias de Bagua y Utcubamba, región Amazonas, Perú.

Según la técnica de NMP, los cultivos de *C. arabica* (café), *T. cacao* (cacao) y *C. papaya* (papaya) presentaron la máxima cantidad promedio de bacterias diazótrofes, seguido de *M. esculenta* (yuca), *O. sativa* (arroz), *S. sonchifolius* (yacón), *A. comosus* (piña) y por último *M.*

paradisiaca (plátano). En la rizósfera de los cultivos de café se encontró la mayor cantidad promedio de bacterias diazótrofes (455 NMP/g suelo seco) y en la rizósfera del plátano las menores poblaciones promedio de estas bacterias (40,8 NMP/g suelo seco) (Tabla 3).

Tabla 3. Cuantificación de bacterias diazótrofes por la técnica de Número Más Probable, a partir de suelo rizosférico y su relación con el cultivo vegetal.

Bacterias diazótrofes (NMP/g suelo seco)	Cultivos vegetales							
	Arroz	Cacao	Café	Papaya	Piña	Plátano	Yacón	Yuca
Máximo	1100	1100	1100	1100	460	93	460	1100
Mínimo	15	29	14	14	3	4	23	39
N° parcelas evaluadas	9	7	7	8	7	4	9	6
Promedio	276,8	356,4	455,0	324,3	170,2	40,8	184,8	297,8

4. DISCUSIÓN

La región amazónica destaca por su prometedora diversidad de organismos del suelo, principalmente los microorganismos (Ferreira et al., 2018; Giraldo et al., 2013; Lin et al., 2019), con múltiples ecosistemas que albergan rizobacterias nativas adaptadas a estas condiciones climáticas de bosques tropicales húmedos. La actividad de promoción del crecimiento de las bacterias rizosféricas de los cultivos vegetales es estudiada por diversos investigadores en el mundo, demostrando la gran potencialidad de encontrar bacterias biofertilizantes en cultivos como, maíz, ají, calabaza (Medina et al., 2014), totora y arroz silvestre (Teng et al., 2019), caña de azúcar, árboles frutales (Moreno & Galvis, 2013), cebolla (Afa et al., 2020), nueces (Sutariati et al., 2020), entre otros; en el Perú se reporta estas bacterias en cultivos como el café (Curi et al., 2019), cultivos andinos (Ogata-Gutiérrez et al., 2017), tara (Cordero et al., 2017) y arroz (Ríos-Ruiz et al., 2020) sin encontrar investigaciones de estas bacterias en las provincias de Bagua y Utcubamba de la región Amazonas, Perú, siendo este un reporte preliminar que demuestra la existencia de estas bacterias rizosféricas con potencial biotecnológico como biofertilizantes.

La población de bacterias rizosféricas nativas de los cultivos de *T. cacao*, *A. comosus* y *C. papaya* (Tabla 2) se destacan por poseer más de una actividad de promoción

del crecimiento vegetal como fijación biológica de nitrógeno, solubilización de fosfatos y producción de ácido indolacético, al igual que los resultados obtenidos en el cultivo de *C. arabica* obtenido por Curi et al. (2019) en la provincia de Chanchamayo con una geografía y clima parecido a las provincias de Bagua y Utcubamba. Sin embargo, los cultivos bacterianos aislados a partir de *M. esculenta*, *S. sonchifolius*, *O. sativa* y *M. paradisiaca*, presentaron nula actividad promotora del crecimiento, con excepción de algunas muestras del cultivo de *S. sonchifolius*, del cual se aislaron solo bacterias productoras de ácido indol acético. Esto podría explicarse debido a que la población nativa de bacterias rizosféricas promotoras del crecimiento vegetal se ve amenazada por la sobreexplotación de los suelos, el uso de pesticidas y la agricultura intensiva (Urgiles-Gómez et al., 2021), que se practica desde hace mucho tiempo en el cultivo de arroz en las provincias de Bagua y Utcubamba.

A partir de la rizósfera de *C. arabica*, se logró aislar la mayor cantidad de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Tabla 2) con posible potencial biofertilizante, comparado con los otros cultivos de importancia económica en estudio, lo cual concuerda con los resultados reportados por Muleta et al. (2013). Por otro lado, investigadores como Andrade et al. (2014) y Koua et al. (2020), reportan mayor número de aislamientos con

potencial biofertilizante en banano y cacao respectivamente. Habibi et al. (2019), reporta la predominancia de cultivos bacterianos productores de ácido indol acético, comparado con las bacterias fijadoras de nitrógeno y las solubilizadoras de fosfatos, lo que se asemeja con los resultados encontrados por (Alori et al., 2017), que concluye que los géneros microbianos capaces de solubilizar fosfatos, son escasos, sin embargo, en este estudio de los suelos rizosféricos de las provincias de Bagua y Utcubamba, las bacterias solubilizadoras de fosfatos son abundantes, a pesar que en los suelos tropicales ácidos, el fósforo es uno de los macronutrientes más limitados disponibles para las plantas (Panhwar et al., 2014; Rengel & Marschner, 2005).

El pH del suelo influye significativamente en la composición de la comunidad de bacterias rizosféricas (Edwards et al., 2015; Pii et al., 2016), y las bacterias aisladas con potencial biofertilizante provienen de suelos con amplio rango de pH, desde 3,30 hasta 8,09, siendo el cultivo de piña el que presentó el menor pH. La adaptabilidad de estos microorganismos para colonizar estos tipos de suelo, constituye una gran ventaja para ser utilizados como parte de consorcios microbianos biofertilizantes en suelos ácidos y alcalinos (Tang et al., 2020). Los suelos muestreados en este estudio tienen características variadas; dependientes de la altitud sobre el nivel del mar y la geografía de la región Amazonas; poseen poblaciones microbianas muy heterogéneas que determinan el tipo y cantidad de exudados radiculares de las plantas, modificando las propiedades químicas como el pH del suelo (Wang et al., 2017), así también se conoce que el pH es considerado un factor dominante que afecta la función de la microbiota (Zheng et al., 2019).

Tres de los cultivos vegetales estudiados son monocultivos (arroz, cacao y café), y la mayoría de ciclo perenne, que viven en microecosistemas establecidos por largo periodo de tiempo y sus raíces garantizan la producción de metabolitos secundarios en cantidades suficientes para el desarrollo vegetal (Patel et al., 2020), pero a diferencia de los otros cultivos, a partir de la rizósfera de *O. sativa* no se aislaron bacterias con características sobresalientes como biofertilizantes, en contraste con estudios realizados por otros investigadores (de Souza et al., 2013; Habibi et al., 2019; Ríos-Ruiz et al., 2020). Cultivos vegetales con

disminuida cantidad de bacterias PGPR son vulnerables al ataque de patógenos y a la falta de absorción de nutrientes (Fatawi et al., 2021), porque se ha demostrado que las bacterias promotoras del crecimiento vegetal determinan la configuración de la arquitectura de la raíz mediante interacciones directas (mediada por el genoma) o indirectas (mediada por metabolitos, compuestos orgánicos volátiles y producción de enzimas) con las plantas, proporcionando mayor estabilidad de la planta y absorción de nutrientes y agua del suelo (Kalyanasundaram et al., 2021), que ayuda a superar el estrés por salinidad y mitigar la pérdida en la productividad (Bhat et al., 2020).

Los ocho cultivos amazónicos estudiados tienen bacterias diazotróficas rizosféricas en cantidades variables dependiendo del cultivo vegetal (Tabla 3). Utilizando la técnica de NMP (Figura 2), estas bacterias se cuantificaron y por lo menos una de las muestras de suelo de café, cacao, papaya, arroz y yuca, alcanzaron la máxima cuantificación y en menor cantidad en el cultivo de piña, yacón y plátano. Las bacterias diazotróficas asociadas a los vegetales; además, de aportar con nitrógeno también podrían disminuir los efectos nocivos de las plagas (Hernández-Rodríguez et al., 2014). Estas bacterias fijadoras de nitrógeno suelen adaptarse a las condiciones edafoclimáticas de la región y son predominantes en los cultivos perennes (Bello et al., 2015), como el café, cacao, papaya, yuca, arroz, yacón, piña y plátano, lo cual explica la mayor cantidad promedio de estas bacterias en relación a los cultivos vegetales, respectivamente.

Los suelos tropicales de las provincias de Bagua y Utcubamba de la región Amazonas, se caracterizan por presentar deficiencia en materia orgánica y en consecuencia, son bajos en nitrógeno (Etesami & Adl, 2020), sin embargo, los suelos cafetaleros poseen cepas de microorganismos con alto potencial biotecnológico como biofertilizantes que promueven el crecimiento de las plantas (Santana-Aragone et al., 2017). Las rizobacterias nativas aisladas contribuyen principalmente a la fijación biológica de nitrógeno atmosférico en el suelo (Riaz et al., 2021), la solubilización de fosfatos y la producción de ácido indol acético, proporcionan un soporte biotecnológico para la agricultura sustentable, la producción de alimentos orgánicos y una alternativa para contrarrestar los impactos

ambientales adversos ocasionados por el uso indiscriminado de fertilizantes químicos (Basu et al., 2021), además, el empleo de estas bacterias ayuda a diseñar estrategias para tecnologías agrícolas sostenibles, respetuosas con el medio ambiente y climáticamente inteligentes (Bhat et al., 2020).

5. Conclusiones

La rizósfera de los cultivos de importancia económica de las provincias de Bagua y Utcubamba, región Amazonas, Perú, poseen bacterias con potencial biofertilizante asociadas a cultivos amazónicos, principalmente café, cacao, papaya y piña.

La rizósfera de estos cultivos alberga gran variedad de bacterias fijadoras asimbióticas de nitrógeno, productoras de ácido indol acético y solubilizadoras de fosfatos, sin embargo, la rizósfera de café no presentó bacterias productoras de auxinas, pero si la mayor cantidad de bacterias diazotróficas.

6. Contribución de los autores

J.A., J.M. y M.G.: Concepción, diseño, recolección de datos, revisión crítica del artículo y aprobación de la versión final.

J.A. y M.G.: Bioensayos en campo y laboratorio. Todos los autores han leído el manuscrito final y aprobado la versión.

7. Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

8. Referencias Bibliográficas

- Afa, M., Sadimantara, G., Rahni, N., & Sutariati, G. (2020). Isolation & Characterization Of Rhizobacteria From Local Shallots Rhizosphere As Promoting Growth Of Shallot (*Allium Ascalonicum* L.). 9(03), 6. Agriculture, U. S. (2019). Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual- Soil Survey Investigations Report No. 51 (Version 2) Issued 2014.
- Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. Journal of King Saud University - Science, 26(1), 1-20.
- Alori, E., Glick, B., & Babalola, O. (2017). Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. Frontiers in Microbiology, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Andrade, L., de Souza, G., Nietsche, S., Xavier, A., Costa, M., Cardoso, A., Pereira, M., & Pereira, D. (2014). Analysis of the abilities of endophytic bacteria associated with banana tree roots to promote plant growth. Journal of Microbiology (Seoul, Korea), 52(1), 27-34.
- Argüello Navarro, A., Madiedo Soler, N., & Moreno Rozo, L. (2016). Cuantificación de bacterias diazotróficas aisladas de suelos cacaoteros (*Theobroma cacao* L.), por la técnica de Número Más Probable (NMP). Revista Colombiana de Biotecnología, 18(2), 40-47.
- Banerjee, A., Barih, D., & Joshi, S. (2017). Native microorganisms as potent bioinoculants for plant growth promotion in shifting agriculture (Jhum) systems. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, ahead, 17(1), 127-140.
- Barbosa, A., Cannavan, F., Navarrete, A., Teixeira, W., Kuramae, E., & Tsai, S. (2015). Amazonian Dark Earth and Plant Species from the Amazon Region Contribute to Shape Rhizosphere Bacterial Communities. Microbial Ecology, 69(4), 855-866.
- Basu, A., Prasad, P., Das, S., Kalam, S., Sayyed, R., Reddy, M., & El Enshasy, H. (2021). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects. Sustainability, 13(3), 1140.
- Bello, O., García, J., & Cuervo, W. (2015). Cuantificación de diazotófos en la rizósfera del olivo (*Olea europaea* L.) cultivado en Boyacá, Colombia. Acta Agronómica, 65(2), 109-115.
- Bhat, M., Kumar, V., Bhat, M., Wani, I., Dar, F., Farooq, I., Bhatti, F., Koser, R., Rahman, S., & Jan, A. (2020). Mechanistic Insights of the Interaction of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) With Plant Roots Toward Enhancing Plant Productivity by Alleviating Salinity Stress. Frontiers in Microbiology, 11, 1-20.
- Bouyoucos, G. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. Agronomy Journal, 54(5), 464-465.
- Cadena, S., & Martínez, B. (2020). Caracterización de cepas nativas de *Pseudomonas* spp. Y su efecto en_x000D_ la germinación y emergencia de *Zea mays* L. «maíz» en Lambayeque. [Tesis de Bachiller, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].
- Cárdenas, D., Ramírez, L., & Moreno, L. (2013). Caracterización de actividades promotoras del crecimiento vegetal por rizobacterias y su efecto en cultivo de cilantro (*Coriandrum sativum* L.). Ecoe: Universidad Francisco de Paula Santander.
- Cardenas, M., & Eduardo, M. (2007). Evaluación de la acción de un bioinoculante sobre un cultivo de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* var. Yoko ono) en período de enraizamiento. [Tesis título, Universidad Nacional Javeriana].
- Chen, C., Zhang, J., Lu, M., Qin, C., Chen, Y., Yang, L., Huang, Q., Wang, J., Shen, Z., & Shen, Q. (2016). Microbial communities of an arable soil treated for 8 years with organic and inorganic fertilizers. Biology and Fertility of Soils, 52(4), 455-467.
- Cordero, I., Ruiz-Díez, B., Balaguer, L., Richter, A., Pueyo, J., & Rincón, A. (2017). Rhizospheric microbial community of *Caesalpinia spinosa* (Mol.) Kuntze in conserved and deforested zones of the Atiquipa fog forest in Peru. Applied Soil Ecology, 114, 132-141.
- Curi, M., Jiménez, V., & Ibarra, J. (2019). Cepas bacterianas nativas con actividades promotoras del crecimiento vegetal aisladas de la rizósfera de *Coffea* spp. En Pichanaqui, Perú. Biotecnología Vegetal, 19(4), 285-295.
- De Souza, R., Beneduzi, A., Ambrosini, A., da Costa, P., Meyer, J., Vargas, L., Schoenfeld, R., & Passaglia, L. M. (2013). The effect of plant growth-promoting rhizobacteria on the growth of rice (*Oryza sativa* L.) cropped in southern Brazilian fields. Plant and Soil, 366(1-2), 585-603.
- Döbereiner, J., Baldani, V., & Baldani, J. (1995). Como isolar e identificar bacterias diazotróficas de plantas não-leguminosas. Embrapa SPI.
- Duval, M., Capurro, J., Galantini, J., & Andriani, J. (2015). Utilización de cultivos de cobertura en monocultivo de soja: Efectos sobre el balance hídrico y orgánico. Cienc. Suelo 33(2), 247-261.
- Edwards, J., Johnson, C., Santos-Medellín, C., Lurie, E., Podishetty, N., Bhatnagar, S., Eisen, J., & Sundareshan, V. (2015). Structure, variation, and assembly of the root-associated microbiomes of rice. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(8), E911-E920.
- Etesami, H., & Adl, S. (2020). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Their Action Mechanisms in Availability of Nutrients to Plants. En M. Kumar, V. Kumar, & R. Prasad (Eds.), Phyto-Microbiome in Stress Regulation (pp. 147-203). Springer.
- Fanin, N., Hättenschwiler, S., Schimann, H., & Fromin, N. (2015). Interactive effects of C, N and P fertilization on soil microbial community structure and function in an Amazonian rain forest. Functional Ecology, 29(1), 140-150.

- Fatawi, A., Pujiasmanto, B., Komariah, Zaki, M., & Noda, K. (2021). Application of organic amendments and PGPR on Salibu Rice yield for drought adaptation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 824(1), 012079.
- Fernández-Ojeda, P., Acevedo, D., Villanueva-Morales, A., Uribe-Gómez, M., Fernández-Ojeda, P., Acevedo, D., Villanueva-Morales, A., & Uribe-Gómez, M. (2016). State of the essential chemical elements in the soils of natural, agroforestry and monoculture systems. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7(35), 65-77.
- Ferreira, L. de V. M., Carvalho, F. de, Andrade, J., & Moreira, F. de S. (2018). Growth promotion of common bean and genetic diversity of bacteria from Amazon pastureland. Scientia Agricola, 75(6), 461-469.
- García, F., Muñoz, H., Carreño, C., & Mendoza, G. (2010). Characterization of native strains of Azospirillum spp. And its effect on growth of Oryza sativa L. "rice" in Lambayeque. Scientia agropecuaria, 107-116.
- Giraldo, M., Ramírez J., Galán, A., & Naciones Unidas (Eds.). (2013). Amazonia posible y sostenible. Naciones Unidas.
- Habibi, S., Djedidi, S., Ohkama-Ohtsu, N., Sarhadi, W., Kojima, K., Rallos, R., Ramírez, M., Yamaya, H., Sekimoto, H., & Yokoyama, T. (2019). Isolation and Screening of Indigenous Plant Growth-promoting Rhizobacteria from Different Rice Cultivars in Afghanistan Soils. Microbes and Environments, 34(4), 347-355.
- Hernández-Rodríguez, A., Rives-Rodríguez, N., Acebo-Guerrero, Y., Díaz-de la Osa, A., Heydrich-Pérez, M., & Divan Baldani, V. (2014). Potencialidades de las bacterias diazotóficas asociativas en la promoción del crecimiento vegetal y el control de Pyricularia oryzae (Sacc.) en el cultivo del arroz (Oryza sativa L.). Revista de Protección Vegetal, 29(1), 1-10.
- Jones, D., & Oburger, E. (2011). Solubilization of Phosphorus by Soil Microorganisms. En Phosphorus in Action (Vol. 26, pp. 169-198).
- Kalyanasundaram, G., Syed, N., & Subburamu, K. (2021). Chapter 17- Recent developments in plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture. En B. Viswanath (Ed.), Recent Developments in Applied Microbiology and Biochemistry (pp. 181-192). Academic Press.
- Karagoz, K., ateş, F., Karagöz, H., & Çakmakçı, R. (2012). Characterization of plant growth-promoting traits of bacteria isolated from the rhizosphere of grapevine grown in alkaline and acidic soils. European Journal of Soil Biology, 50, 144-150.
- Kaschuk, G., & Hungria, M. (2017). Diversity and Importance of Diazotrophic Bacteria to Agricultural Sustainability in the Tropics. En Diversity and Benefits of Microorganisms from the Tropics (pp. 269-292).
- Khan, M., Zaidi, A., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P. (2010). Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi – current perspective. Archives of Agronomy and Soil Science, 56(1), 73-98.
- Koua, S., N'golo, D., Alloue-Boraud, W., Konan, F., & Dje, K. (2020). Bacillus subtilis Strains Isolated from Cocoa Trees (Theobroma cacao L.) Rhizosphere for their use as Potential Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Côte d'Ivoire. Current Microbiology, 77(9), 2258-2264.
- Landeros-Sánchez, C., Moreno-Seceña, J., Nikolskii, I., & Bakhlaeva-Egorova, O. (2011). Impacto de la agricultura sobre la biodiversidad (pp. 477-491).
- Lin, W., Lin, M., Zhou, H., Wu, H., Li, Z., & Lin, W. (2019). The effects of chemical and organic fertilizer usage on rhizosphere soil in tea orchards. PLOS ONE, 14(5), e0217018.
- López-Ortega, M., Criollo-Campos, P., Gómez-Vargas, R., Camelo-Runsingue, M., Estrada-Bonilla, G., Garrido-Rubiano, M., & Bonilla-Buitrago, R. (2013). Characterization of diazotrophic phosphate solubilizing bacteria as growth promoters of maize plants. Revista Colombiana de Biotecnología, 15(2), 115-123.
- Magalhães, N. dos S., Marengo, R., & Camargo, M. (2014). Do soil fertilization and forest canopy foliage affect the growth and photosynthesis of Amazonian saplings? Scientia Agricola, 71(1), 58-65.
- Medina, J., Chimal, C., Gómez, L., & Aguilar, J. (2014). Aislados bacterianos con potencial biofertilizante para plántulas de tomate. Terra latinoamericana, 32: 273-281.
- Moreno, L., & Galvis, F. (2013). Potencial biofertilizante de bacterias diazotóforas aisladas de muestras de suelo rizosférico. Pastos y Forrajes, 36(1), 33-37.
- Moreno, A., García, V., Reyes, J., Vásquez, J., & Cano, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: Una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. Revista Colombiana de Biotecnología, 20(1), 68-83.
- Muleta, D., Assefa, F., Börjesson, E., & Granhall, U. (2013). Phosphate-solubilising rhizobacteria associated with Coffea arabica L. in natural coffee forests of southwestern Ethiopia. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 12(1), 73-84.
- Myrold, D., Zeglin, L., & Jansson, J. (2014). The Potential of Metagenomic Approaches for Understanding Soil Microbial Processes. Soil Science Society of America Journal, 78(1), 3-10.
- Nehra, V., Saharan, B., & Choudhary, M. (2016). Evaluation of Brevibacillus brevis as a potential plant growth promoting rhizobacteria for cotton (Gossypium hirsutum) crop. SpringerPlus, 5(1), 948.
- Ogata-Gutiérrez, K., Chumpitaz-Segovia, C., Lirio-Paredes, J., Finetti-Sialer, M., & Zúñiga-Dávila, D. (2017). Characterization and potential of plant growth promoting rhizobacteria isolated from native Andean crops. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 33(11), 203.
- Panhwar, Q., Naher, U., Jusop, S., Othman, R., Latif, M., & Ismail, M. (2014). Biochemical and Molecular Characterization of Potential Phosphate-Solubilizing Bacteria in Acid Sulfate Soils and Their Beneficial Effects on Rice Growth. PLOS ONE, 9(10), e97241.
- Patel, J., Yadav, S., Bajpai, R., Teli, B., & Rashid, M. (2020). PGPR secondary metabolites: An active syrup for improvement of plant health. En Molecular Aspects of Plant Beneficial Microbes in Agriculture (pp. 195-208). Elsevier.
- Pii, Y., Borruso, L., Brusetti, L., Crecchio, C., Cesco, S., & Mimmo, T. (2016). The interaction between iron nutrition, plant species and soil type shapes the rhizosphere microbiome. Plant Physiology and Biochemistry, 99, 39-48.
- Quesada, C., Lloyd, J., Anderson, L., Fyllas, N., Schwarz, M., & Czimczik, C. (2011). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. Biogeosciences, 8(6), 1415-1440.
- Rahman, S., Siddique, R., & Tabassum, N. (2017). Isolation and identification of halotolerant soil bacteria from coastal Patenga area. BMC Research Notes, 10(1), 531.
- Rengel, Z., & Marschner, P. (2005). Nutrient availability and management in the rhizosphere: Exploiting genotypic differences. The New Phytologist, 168(2), 305-312.
- Reyes, I., Valery, A., & Valduz, Z. (2006). Phosphate-solubilizing microorganisms isolated from rhizospheric and bulk soils of colonizer plants at an abandoned rock phosphate mine. Plant and Soil, 287(1), 1-10.
- Riaz, U., Murtaza, G., Anum, W., Samreen, T., Sarfraz, M., & Nazir, M. Z. (2021). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Biofertilizers and Biopesticides. En K. R. Hakeem, G. H. Dar, M. A. Mehmood, & R. A. Bhat (Eds.), Microbiota and Biofertilizers: A Sustainable Continuum for Plant and Soil Health (pp. 181-196). Springer International Publishing.
- Ríos-Ruiz, W., Torres-Chávez, E., Torres-Delgado, J., Rojas-García, J., Bedmar, E., & Valdez-Nuñez, R. (2020). Inoculation of bacterial consortium increases rice yield (Oryza sativa L.) reducing applications of nitrogen fertilizer in San Martin region, Peru. Rhizosphere, 14, 100200.
- Sahoo, R., Ansari, M., Dangar, T., Mohanty, S., & Tuteja, N. (2014). Phenotypic and molecular characterisation of efficient nitrogen-fixing Azotobacter strains from rice fields for crop improvement. Protoplasma, 251(3), 511-523.
- Salazar-Henao, J., Vélez-Bermúdez, I., & Schmidt, W. (2016). The regulation and plasticity of root hair patterning and morphogenesis. Development, 143(11), 1848-1858.
- Santana-Aragone, D., Colina-Navarrete, E., Castro-Arteaga, C., Cadena-Piedrahita, D., Sotomayor-Morán, A., Galarza-Centeno, E., & López-Villacré, M. (2017). Microorganismos Fijadores De Nitrógeno Y Su Acción Complementaria A La Fertilización Química En El Cultivos De Coffea arabica L. European Scientific Journal, 13(3), 211-222.
- Shin, W., Islam, Md. R., Benson, A., Joe, M., Kim, K., Gopal, S., Samadder, S., Banerjee, S., & Sa, T. (2016). Role of Diazotrophic Bacteria in Biological

- Nitrogen Fixation and Plant Growth Improvement. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 49, 17-29.
- Sosa, M., Ruiz, E., Tun, J., Pinzón, L., & Reyes, A. (2019). Germinación, crecimiento y producción de glucanasas en *Capsicum chinense* Jacq. Inoculadas con *Bacillus* spp. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(16), 137-146.
- Souza, R. de, Ambrosini, A., & Passaglia, L. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38(4), 401-419.
- Sutariati, G., Rahni, N., Madiki, A., Mudi, L., & Fua, J. (2020). Isolation And Viability Test Of Seed Incorporated By Indigenous Rhizobacteria From Areca Nut As Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). 9(01), 5: 3435-3439.
- Tang, A., Haruna, A., Majid, N. Ab., & Jalloh, M. (2020). Potential PGPR Properties of Cellulolytic, Nitrogen-Fixing, Phosphate-Solubilizing Bacteria in Rehabilitated Tropical Forest Soil. *Microorganisms*, 8(3), 442.
- Teng, Z., Chen, Z., Zhang, Q., Yao, Y., Song, M., & Li, M. (2019). Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from rhizosphere soils of the Yeyahu Wetland in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(33), 33976-33987.
- Urgiles-Gómez, N., Avila-Salem, M., Loján, P., Encalada, M., Hurtado, L., Araujo, S., Collahuazo, Y., Guachanamá, J., Poma, N., Granda, K., Robles, A., Senés, C., & Cornejo, P. (2021). Plant Growth-Promoting Microorganisms in Coffee Production: From Isolation to Field Application. *Agronomy*, 11(8), 1531.
- Vanegas, J., Flórez-Zapata, N., & Uribe-Vélez, D. (2012). Bioprospección de microorganismos promotores de crecimiento vegetal para su aplicación en el cultivo de arroz (pp. 151-178).
- Wang, R., Zhang, H., Sun, L., Qi, G., Chen, S., & Zhao, X. (2017). Microbial community composition is related to soil biological and chemical properties and bacterial wilt outbreak. *Scientific Reports*, 7(1), 343.
- Zheng, B., Zhang, D., Wang, Y., Hao, X., Wadaan, M., Hozzein, W., Peñuelas, J., Zhu, Y., & Yang, X. (2019). Responses to soil pH gradients of inorganic phosphate solubilizing bacteria community. *Scientific Reports*, 9:25.