

Biotempo (Lima)



<https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo>



REVIEW ARTICLE / ARTÍCULO DE REVISIÓN

GROWTH-PROMOTING BACTERIA IN COWPEA BEAN (*VIGNA UNGUICULATA* L. WALP.)

BACTERIAS PROMOTORAS DE CRECIMIENTO EN EL FRÉJOL CAUPÍ (*VIGNA UNGUICULATA* L. WALP.)

Abrahán Alfredo Palma-Velásquez¹ & Freddy Zambrano-Gavilanes*¹

¹ Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador. E-mail: freddyzg_86@hotmail.com

* Corresponding Author: freddyzg_86@hotmail.com

Abrahán Alfredo Palma-Velásquez: <https://orcid.org/0009-0004-3641-5061>

Freddy Zambrano-Gavilanes: <https://orcid.org/0000-0003-0004-9122>

ABSTRACT

Cowpea bean (*Vigna unguiculata* L. Walp.) has traditionally been an important crop for smallholder farmers, and in many cases is the main source of low-cost dietary plant protein and minerals compared to animal products such as meat, fish, and egg. The inoculation of rhizobia in cowpeas is a promising technology to improve production. In this work, the importance of growth-promoting bacteria in cowpea beans was evaluated through a literature review, to improve the performance of the production system in the different stages of the crop. A search of bibliographic information has been carried out for the preparation of this literature review using scientific information published from 1982 to the present, totaling 67 documents (books, book chapters, scientific articles, among others) written in different languages such as Spanish, English and Portuguese, included in the Scopus, Web of Science, Scielo, Redalyc and Latindex 2.0 platforms. The keywords "Cowpea beans", "Origin of cowpea beans", "Distribution of cowpea beans", "Phenological cycle of cowpea beans", "Botanical description of cowpea beans", "Nutritional requirements of cowpea beans", "Plant growth promoting rhizobacteria", "Nitrogen fixing bacteria" and "Growth promoting bacteria in cowpea". The Mendeley program was used as a bibliographic manager. The importance of the promoter bacteria in the cowpea bean crop was demonstrated, in all the searches carried out, the bacteria belonging to the genus *Bradyrhizobium* predominating as the most used in this crop.

Keywords: *Bradyrhizobium* – symbiotic bacteria – Fabaceae – beans

RESUMEN

El fréjol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) ha sido tradicionalmente un cultivo importante para los pequeños agricultores, y en muchos casos es la principal fuente de proteínas y minerales vegetales dietéticos de bajo costo en



comparación con productos animales como la carne, pescado y huevo. La inoculación de rizobios en el fréjol caupí es una tecnología prometedora para mejorar la producción. En este trabajo se evaluó por medio de una revisión de literatura la importancia de las bacterias promotoras de crecimiento en el fréjol caupí, con el fin de mejorar el rendimiento sobre el sistema de producción en las diferentes etapas del cultivo. Se ha efectuado una búsqueda de información bibliográfica para la elaboración de la presente revisión de literatura mediante información científica publicada desde 1982 hasta la actualidad, totalizando 67 documentos (libros, capítulos de libro, artículos científicos, entre otros) escritos en diferentes idiomas como español, inglés y portugués, incluidas en las plataformas Scopus, Web of Science, Scielo, Redalyc y Latindex 2.0. Se han empleado las palabras claves "Fréjol caupí", "Origen del fréjol caupí", "Distribución del fréjol caupí", "ciclo fenológico del fréjol caupí", "descripción botánica del fréjol caupí", "requerimientos nutricionales del fréjol caupí", "rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal", "bacterias fijadoras de nitrógeno" y "bacterias promotoras de crecimiento en el fréjol caupí". Fue utilizado el programa Mendeley como gestor bibliográfico. Fue demostrada la importancia de las bacterias promotoras en el cultivo de fréjol caupí, en todas las búsquedas realizadas predominando las bacterias pertenecientes al género *Bradyrhizobium* como las más utilizadas en este cultivo.

Palabras claves: *Bradyrhizobium* – bacterias simbióticas – Fabaceae – fréjol

INTRODUCCIÓN

Las leguminosas son una fuente importante de alimento (Estrada-Prado *et al.*, 2017). En los últimos años diferentes países preocupados por problemas de la desnutrición proteica y la seguridad alimentaria han buscado como alternativa eficiente la utilización de leguminosas como el fréjol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) (Kebede *et al.*, 2020).

El fréjol caupí es un cultivo tradicional de importancia alimentaria y económica para pequeños productores, además de ser la principal fuente de proteínas y minerales vegetales de menor costo frente a productos de origen animal como lo son la carne, el pescado, el huevo, entre otros (Hernández-López *et al.*, 2013; da Silva-Júnior *et al.*, 2018).

Los países con mayor producción de fréjol en grano seco en el mundo en el año 2018, fue India con un área cosechada de 15.426 millones de has, representando el 42,3% de todo el fréjol cosechado en el mundo, seguida de Myanmar con 3.182 millones de ha y terminando la trilogía de países que más área dedica a este cultivo, Brasil con 2.795 millones de ha (FAO, 2020). En Ecuador, el fréjol caupí es la leguminosa con la mayor superficie cultivada y consumida en grano seco, verde o tierno. En la región sierra existen 71.826 ha, en la costa 28.061 ha y por último en la región oriental solo se sembró 135 ha (INEC, 2020).

El comportamiento del potencial productivo del caupí está determinado por factores como los edafoclimáticos, destacando el contenido nutricional del suelo necesario

para su desarrollo; es necesario mencionar que es una planta demandante de nutrientes, debido al sistema radicular pequeño y poco profundo y al ciclo corto que se relaciona con las condiciones fisiológicas (de Oliveira *et al.*, 2018; de Almeida-Santos *et al.*, 2021).

El caupí puede demandar hasta 100 kg N ha⁻¹ por ciclo, por lo tanto, es posible que se requiera la aplicación de fertilizantes nitrogenados para satisfacer la demanda del cultivo según las condiciones ambientales y las expectativas de rendimiento (Galindo *et al.*, 2022). Para suplir la necesidad de N, algunos agricultores han disminuido el uso de fertilizantes minerales, reemplazándolos con microorganismos benéficos al suelo como las bacterias fijadoras de N atmosférico (Michel *et al.*, 2020), lo que permite un manejo amigable del suelo y obtención de altos rendimientos (Sena *et al.*, 2020).

Algunas bacterias actúan como fitoestimuladores que tienen la habilidad de producir o cambiar la concentración de los reguladores de crecimiento: ácido indolacético, ácido giberélico, citocininas y etileno, promoviendo el crecimiento de las plantas, además de la capacidad de la producción de antibióticos y metabolitos antifúngicos (Borguete *et al.*, 2019).

El fréjol caupí puede establecer una simbiosis de fijación de nitrógeno con miembros de los géneros *Rhizobium* (Frank, 1889) y *Bradyrhizobium* (Jordan, 1982) siendo la mayoría de las especies de rizobios fijadores de N₂ los que pertenecen al género *Bradyrhizobium*. Las especies de este género difieren considerablemente en sus propiedades fisiológicas y genéticas, así como en su gama de huéspedes (Simbine *et al.*, 2021).

Existen diversos métodos de aplicación de las (Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal PGPR), basados en la inoculación de semilla, sustrato, plántula, follaje, frutos, suelo e inoculación en composta (Chibeba *et al.*, 2017). Se debe tener en cuenta algunas consideraciones, por ejemplo, no es un insumo químico y es recomendable aplicarse en las primeras etapas de la planta, así como mantener un manejo integral del cultivo y las características del suelo (Camelo-Rusinque *et al.*, 2017).

La inoculación de rizobios aislados de caupí es una tecnología prometedora para mejorar la producción de granos. Recientemente, la bioprospección de nuevos rizobios de caupí en las regiones secas de Brasil indicó la existencia de *Bradyrhizobium* y *Microvirga* Kanso & Patel, 2003 mostrando un mejor rendimiento que las cepas oficialmente recomendadas para la producción de inoculantes (Oliveira *et al.*, 2020; Sena *et al.*, 2020).

En este caso se evaluó por medio de una revisión de literatura la importancia de las rizobacterias promotoras de crecimiento en el fréjol caupí, con el fin de mejorar el rendimiento sobre el sistema de producción en las diferentes etapas del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la presente revisión de literatura fue efectuada una búsqueda de información bibliográfica mediante información científica publicada desde 1982 hasta la actualidad, totalizando 67 documentos (libros, capítulos de libro, artículos científicos, entre otros), escritos en diferentes idiomas como español, inglés y portugués, incluidas en las plataformas Scopus, Web of Science, Scielo, Redalyc y Latindex 2.0. Las palabras claves utilizadas para la búsqueda fueron: "Fréjol caupí", "Origen del fréjol caupí", "Distribución del fréjol caupí", "ciclo fenológico del fréjol caupí", "descripción botánica del fréjol caupí", "requerimientos nutricionales del fréjol caupí", "rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal", "bacterias fijadoras de nitrógeno" y "bacterias promotoras de crecimiento en el fréjol caupí". Se utilizó el programa Mendeley como gestor bibliográfico.

Aspectos éticos: Los autores señalan que se cumplieron todos los aspectos éticos a nivel nacional e internacional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Origen, distribución e importancia del fréjol caupí

Es de conocimiento que el caupí se originó en el sur de África, sin embargo, resulta difícil determinar en qué lugar de África se domesticó por primera vez el cultivo, existen sugerencias de varios centros de domesticación, como Etiopía, África central, Sudáfrica y África occidental (Simion, 2018).

Es probable que el caupí se haya trasladado desde África oriental a la India antes del 150 a. C., a Asia occidental y Europa alrededor del 300 a. C., y a América en el 1500 d. C, a causa de que Asia occidental y Europa no presentan condiciones climáticas adecuadas para el caupí, no se produjo tanta variabilidad y selección como en el sur de Asia y el sudeste asiático, donde se seleccionaron pequeños caupí de semillas y vegetales (Xiong *et al.*, 2016).

A nivel mundial (*V. unguiculata*) se encuentra ampliamente cultivada, principalmente en África, América del Sur, algunas partes de Asia y los Estados Unidos, debido a su importancia como fuente de proteína (Zhang *et al.*, 2021), la especie tiene varios nombres con las que se le conoce como fréjol caupí, cowpea o chícharo de vaca en lengua inglesa, frijol de costa, frijol carita y caupí (Báez-Hernández & Hernández-Medina, 2016).

La clasificación taxonómica de la especie se detalla a continuación, clase Dicotyledonae, orden Fabales, familia Fabaceae, subfamilia Papilionoideae, tribu Phaseoleae, subtribu Phaseolinae y género *Vigna* Linnaeus describió el caupí como *Dolicho unguiculatus* L. (más tarde rebautizado como *Vigna unguiculata* (L.) Walp.), el caupí anual tiene dos variedades botánicas, la cultivada *Vigna unguiculata* unguiculata var. unguiculata y la forma silvestre *V. unguiculata* unguiculata var. Spontanea (Maxted *et al.*, 2004; Ji *et al.*, 2019).

El caupí silvestre con semillas muy pequeñas probablemente fue distribuido por aves en África Oriental y Occidental previo a la era cristiana, y, por consiguiente, existe una gran diversidad y formas silvestres secundarias allí (Boukar *et al.*, 2020).

El cultivo es de importancia a nivel mundial, siendo muy bien establecido principalmente en regiones tropicales y subtropicales (Kebede & Bekeko, 2020), a causa de que expresa gran capacidad de adaptación a las altas temperaturas y la sequía en comparación con otras especies de cultivos (Boukar *et al.*, 2019). El caupí es la principal fuente de proteínas para las personas en

los países en desarrollo, siendo producido y consumido principalmente por pequeños agricultores subsaharianos (D’Andrea *et al.*, 2007).

Ciclo fenológico y descripción botánica del fréjol caupí

El ciclo fenológico del fréjol caupí consta de diez etapas de desarrollo (Figura 1) (Fernández, 1982) y la designación de cada etapa se basa en un código que consta de una letra y un número. La letra significa la fase dentro del ciclo, es decir, la letra V se refiere a la fase vegetativa y la letra R, la etapa reproductiva y los números indican la posición de la etapa de desarrollo de la planta dentro escala, como se muestra a continuación:

Código	Caracterización del estadio
V0	Comienzo de la germinación
V1	Cotiledones a nivel del suelo
V2	Hojas primarias expandidas
V3	Primera hoja trifoliada
V4	Tercera hoja trifoliada
R5	Capullos de flores
R6	Apertura de la primera flor
R7	Primeras vainas llenas
R8	Cambio en el color de las vainas
R9	Madurez fisiológica

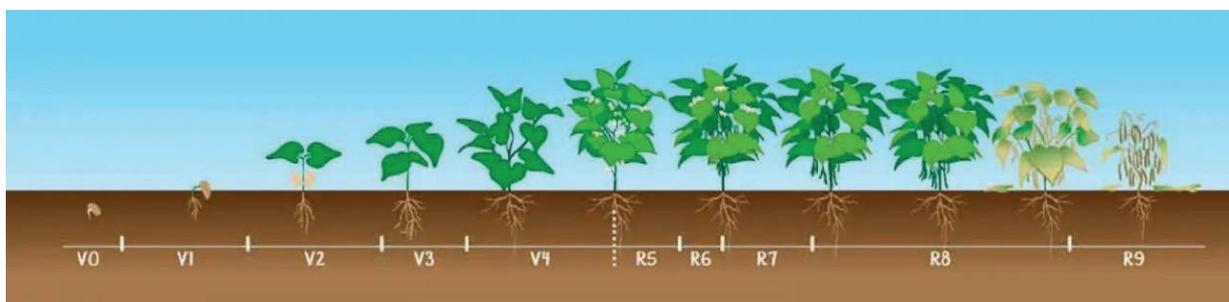


Figura 1. Ciclo fenológico del fréjol caupí (de Oliveira *et al.*, 2018).

Se conoce que, en condiciones climáticas cálidas, el ciclo de crecimiento del caupí es más corto frente a un clima templado (125 y 150 días, respectivamente). En ambientes de clima cálido, el período desde la siembra hasta la emergencia (E, 5 días), inicio de la floración (R6, 50 días) y madurez fisiológica (R9, 125 días) disminuyendo hasta 45 días con respecto al clima templado (7, 95 y 150 días en E, R6 y R9 respectivamente), las temperaturas estacionales más bajas inciden en mayor duración del ciclo del cultivo en clima templado en comparación con el clima cálido (Barrios *et al.*, 2014).

El caupí puede crecer hasta 80 cm y hasta 2 m para cultivares trepadores. Tiene un sistema radicular bien desarrollado. La germinación es epigea con el primer par de hojas verdaderas simples y opuestas y las siguientes hojas trifoliadas con folíolos ovalados (6-15 cm de largo y 4-11 cm de ancho) y alternos (OECD, 2016).

Según Singh (2020), Los botones florales del caupí nacen sobre pedúnculos que surgen en las axilas del tallo principal o ramas. A medida que se desarrollan los botones florales, la elongación del pedúnculo ocurre rápidamente, alcanzando típicamente de 5 a 10 cm de longitud en la antesis. Los botones florales completan

su desarrollo en una o dos semanas. Por lo general, cada racimo floral produce de 2 a 4 flores secuencialmente durante varios días. Después de que se forman de dos a cuatro vainas, se detiene el desarrollo de otros botones florales en el ápice del pedúnculo (racimo) hasta que se forman las primeras vainas. El caupí se autopoliniza en gran medida en la mayoría de los entornos, como resultado de una estructura de flores cleistógamas y la receptividad simultánea del estigma y el desprendimiento de polen (Singh, 2020).

Las flores son grandes, de unos 2 cm de largo y ancho (cuando están abiertas), y típicamente de color púrpura o blanco. El estilo y el estigma están rodeados por anteras estrechamente encerradas en una quilla recta. La dehiscencia de las anteras y la polinización de una flor en particular normalmente ocurre temprano en la mañana del día en que se abre la flor (Singh, 2020). Las flores se abren una sola vez y permanecen abiertas durante varias horas. Los estigmas se vuelven receptivos unas 12 h antes de la dehiscencia de la antera, lo que es útil para hacer híbridos artificiales. Ocasionalmente, se producen niveles significativos pero bajos de cruzamiento lejano en viveros de reproducción y campos de producción de semillas, lo que puede deberse a la visita de abejas grandes (Singh, 2020).

Las vainas se presentan en pares formando una V, en su mayoría colgantes y verticales, pero pueden estar erectas. Son cilíndricos, de 2 a 6 cm de largo y de 3 a 12 mm de ancho y contienen de 8 a 20 semillas. Las semillas pueden ser de color blanco, marrón rosado o negro (OCDE, 2016).

Requerimientos nutricionales del fréjol caupí

El cultivo del capí es rústico, puede prosperar en suelos de baja fertilidad, para su normal crecimiento y desarrollo requiere de una fórmula alta en fósforo y baja en nitrógeno porque debido a que contiene nódulos consigue fijar nitrógeno (Apáez *et al.*, 2009). Los nutrientes esenciales son: C, H y O (organógenos), N, P, K, Ca, Mg y S (macronutrientes) y Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Cl, B y Ni (micronutrientes) (Neto *et al.*, 2014).

Los contenidos de macronutrientes (g kg^{-1}) considerados adecuados para el buen desarrollo del caupí son: 18 a 22 (N), 1,2 a 1,5 (P), 30 a 35 (K), 50 a 55 (Ca), 5 a 8 (Mg) y 1,5 a 2,0 (S). Y los micronutrientes (mg kg^{-1}) son: 700 a 900 (Fe), 400 a 425 (Mn), 150 a 200 (B), 40 a 50 (Zn) y 5 a 7 (Cu) (Neto *et al.*, 2014).

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)

Se ha identificado rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) y eventual rasgos que contribuyen en el crecimiento, esto ha promovido al uso de cepas de bacterias como bioinoculantes, mismas que pueden ser usadas en agricultura sostenible con el objetivo de sustituir el uso de fertilizantes químicos (Shahab *et al.*, 2009). Por su parte, Singh (2013) refiere que los bioinoculantes o biofertilizantes son microorganismos desarrollados para su aplicación a la superficie de las plantas, semillas o mezclados con el suelo con eventual colonización de la rizosfera o endosfera de las plantas.

Entre los microorganismos que habitan en la rizósfera existen aquellos con la capacidad de favorecer el desarrollo y el rendimiento de los cultivos a través, de mecanismos directos e indirectos (Chávez-Díaz *et al.*, 2020) (Figura 2).

Las PGPR ayudan en el crecimiento de las plantas a través de diversos mecanismos que incluyen la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfatos, la producción de sideróforos para la adquisición de hierro (Kosty *et al.*, 2020).

El uso de bioinoculantes presenta beneficios ambientales, contrario a los fertilizantes químicos, los biofertilizantes no se filtran al suelo ni al agua cercana, un proceso conocido como eutrofización (Ouyang *et al.*, 2018). La exposición a largo plazo a los fertilizantes, puede afectar el microbioma rizosférico y a menudo reduce la diversidad de bacterias (Semenov *et al.*, 2020). Estos biofertilizantes son económica y ambientalmente sostenibles al mismo tiempo que mejora la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos (Mataranyika *et al.*, 2022).

Al producir aminoácidos esenciales y hormonas, PGPR consiguen aumentar las defensas de las plantas en casos de estrés por sequía, un ejemplo es el empleo de *Arthrobacter* (Conn & Dimmick, 1947) y *Bacillus* (Cohn, 1872), que favorecen a la producción de prolina ayudando en el crecimiento de las plantas (Kumari *et al.*, 2018). Algunas especies de *Bacillus*, como *B. megaterium* (de Bary, 1884) y *B. subtilis* (Cohn, 1872), producen citoquininas que son esenciales en la tolerancia al estrés por sequía. La tolerancia a la sequía también puede ser inducida por la actividad antioxidante, los endófitos asociados aumentan la concentración de antioxidantes como los flavonoides en las células vegetales (García-Fraile *et al.*, 2015).

Los bioinoculantes bacterianos se han utilizado ampliamente para mejorar el crecimiento y el rendimiento de las plantas y minimizar la amenaza de las plantas a enfermedades (Kalia *et al.*, 2020). Entre los bioinoculantes más comúnmente disponibles, las cepas de *Azotobacter* (Beijerinck, 1901), *Rhizobium* (Frank, 1889), *Azospirillum* (Skerman *et al.*, 1983) y *Burkholderia* (Yabuuchi, 1993) ahora se comercializan como biofertilizantes y bioinoculantes agrícolas (Maitra *et al.*, 2021).

Otro punto importante, es que el aumento de la agricultura de secano suscita la necesidad de desarrollar prácticas que mejoran el rendimiento de los cultivos y protegen la fertilidad del suelo, de acuerdo a Mataranyika *et al.* (2022), el uso de biofertilizantes adaptados a suelos deficientes en nutrientes y climas áridos ayudarían lograr esto, además en la ayuda a la mitigación del cambio climático para la agricultura.

Estudios demuestran que la longitud de la raíz puede verse influenciada por la inoculación de semillas con *Azospirillum brasilense* (Tarrand, Krieg & Döbereiner, 1978) y *Pseudomonas putida* (Trevisan, 1889), que se sabe que estimulan el crecimiento de las plantas debido a su capacidad para producir AIA (Shahab *et al.*, 2009).

Evidencia adicional indica una mejora en el crecimiento de las plantas mediante la producción de metabolitos bioactivos de PGPR aislados de las raíces de *Salvia miltiorrhiza* Bunge. Estos contribuyen a la inhibición de patógenos y a una mejor tolerancia y resistencia a

enfermedades (Duan *et al.*, 2013). El uso de bioinoculantes ha sido evaluado en Namibia en el crecimiento de variedades de caupí. El estudio observó aumentos en el rendimiento de aproximadamente un 30 % (Luchen *et al.*, 2018).

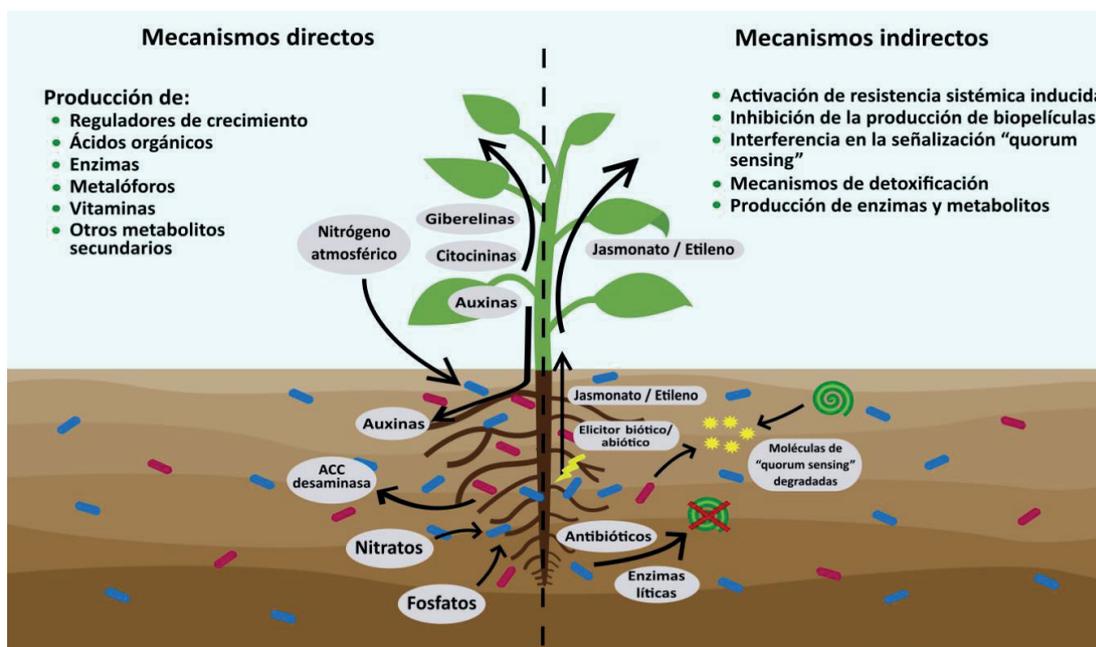


Figura 2. Mecanismos directos e indirectos presentes en microorganismos promotores del crecimiento vegetal (Chávez-Díaz *et al.*, 2020).

Bacterias fijadoras de nitrógeno

Los rizobios promueven directamente el crecimiento de las plantas a través de la fijación biológica de nitrógeno (FBN), la solubilización de fósforo, la formación de sideróforos y la producción de fitohormonas (Glick, 2012; Jaiswal *et al.*, 2021). Además, los rizobios poseen propiedades de biocontrol debido a la producción de metabolitos secundarios (Jaiswal *et al.*, 2021).

Los rizobios forman una relación simbiótica con diversas leguminosas. Algunos de estos simbiosis microbianos incluyen *Allorhizobium* (de Lajudie *et al.*, 1998), *Azorhizobium* (Dreyfus *et al.*, 1988), *Bradyrhizobium* (Jordan, 1982), *Ensifer* (*Sinorhizobium*) (Casida, 1982), *Mesorhizobium* (Jarvis *et al.*, 1997), *Neorhizobium* (Mousavi *et al.*, 2014), *Pararhizobium* (Mousavi *et al.*, 2016) y *Rhizobium* (Frank, 1889) (Ormeño-Orrillo *et al.*, 2012; Jaiswal *et al.*, 2021). La leguminosa-rizobio la simbiosis aporta aproximadamente 33–46 Tg de nitrógeno por año (teragramos de nitrógeno al año o millones de t métricas al año), lo que la convierte en el

mayor contribuyente a la fijación biológica de nitrógeno (Jaiswal *et al.*, 2021).

Dentro de las bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno se encuentran dos grupos de organismos. Al primer grupo pertenecen bacterias móviles del suelo, que son atraídas hacia la raíz por compuestos que esta libera. Pertenecen al grupo de quimioorganotrofos aerobios y se denominan Rizobios. A este grupo pertenecen *Rhizobium* (nodulan en raíces de leguminosas de climas templados y subtropicales), *Azorhizobium* (nódulos en tallos y raíces) y *Bradyrhizobium* (nodula raíces de soja). Existen otros formadores de nódulos de fijación dudosa de nitrógeno como son: *Phyllobacterium* (Knösel, 1984) (forma nódulos en tallos y hojas de mirsináceas y rubiáceas) y *Agrobacterium* (Smith & Townsend, 1907) (Martínez *et al.*, 2015).

El segundo grupo está formado por Actinomicetos (bacterias Gram positivas) que nodulan raíces de muchos árboles y arbustos. Son aquellas bacterias filamentosas que viven en simbiosis con plantas actinorricicas (angiospermas

capaces de formar nódulos) y son pertenecientes al género *Frankia* (Brunchorst, 1869). No forma micelio aéreo y sus esporas son inmóviles. Nodula los géneros *Alnus* (Mill, 1754), *Myrcia DC.*, *Casuarina* (Linneo, 1759), etc. Esta nodulación es de gran importancia para plantas leñosas perennes, porque aporta nitrógeno al suelo en zonas pobres o repobladas (Narayanan *et al.*, 2021).

En la Figura 3 se encuentra el esquema de la FBN en plantas no-leguminosas donde interaccionan bacterias de vida libre y plantas leguminosas donde interaccionan

bacterias mutualistas. En las plantas no leguminosas las bacterias solo se asocian a las raíces de las plantas y en las leguminosas las bacterias realizan una asociación íntima dentro de estructuras denominadas nódulos; donde las bacterias son protegidas del oxígeno y la nitrogenasa puede realizar su actividad con mayor eficiencia, en ambos casos las bacterias reciben fuente de carbono de las plantas (CHO) y a cambio ellas les proveen de nitrógeno combinado (NH_4^+) obtenido del proceso de la FBN (Molina-Romero *et al.*, 2015).

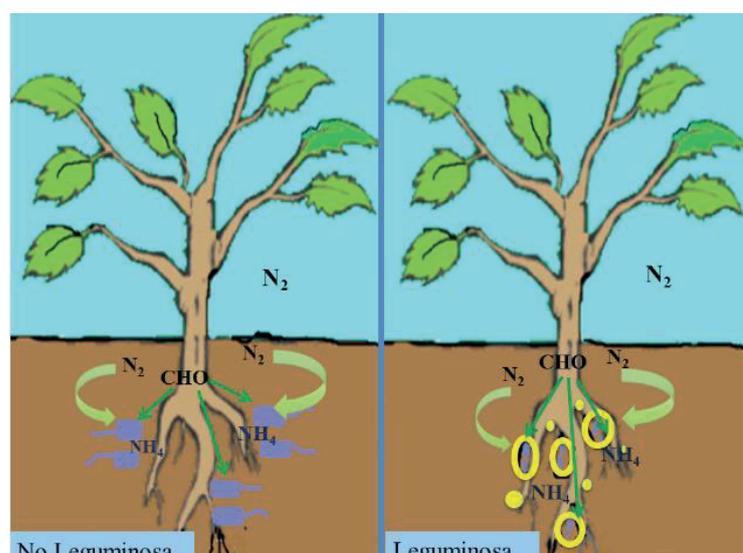


Figura 3. Esquema de la FBN en plantas no-leguminosas y leguminosas (Molina-Romero *et al.*, 2015).

Efectos de bacterias promotoras de crecimiento en el fréjol caupí

Los microbios PGPR que penetran y colonizan las plantas han desarrollado un elaborado sistema para alterar el sistema de defensa de las plantas, son un grupo de bacterias asociativas que se encuentran en las raíces y que son beneficiosas por estimular el crecimiento de una planta (Sindhu *et al.*, 2010). Las PGPR presentan la peculiaridad de fijar el N atmosférico (Villegas-Espinoza *et al.*, 2014).

Las pseudomonas y bacilos fluorescentes comprenden el grupo principal entre las PGPR junto con otras bacterias, como *Acetobacter* (Beijerinck, 1898), *Agrobacterium* (Smith & Townsend, 1907), *Alcaligenes* (Castellani & Chalmers, 1919), *Arthrobacter* (Conn & Dimmick, 1947), *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Cellulomonas* (Bergey *et al.*, 1923), *Clostridium* (Prazmowski, 1880), *Enterobacter*

(Hormaeche & Edwards, 1960), *Erwinia* (Winslow *et al.*, 1920), *Flavobacterium* (Bergey *et al.*, 1923), *Pasteuria* (Metchnikoff, 1888), *Serratia* (Bizio, 1823) y *Xanthomonas* (Dowson, 1939), los microorganismos benéficos de la rizosfera también incluyen rizobios y bradirizobios, que establecen una relación simbiótica con las plantas leguminosas (Sindhu *et al.*, 2010).

Los microorganismos y las plantas se sustentan en condiciones de privación de hierro mediante la liberación de sideróforos. Entre otros, se sabe que las *Pseudomonas* fluorescentes ejercen una amplia acción de biocontrol contra los fitopatógenos del suelo y las raíces a través de la liberación de antimicrobianos y sideróforos, Sharma & Johri (2003) estudiaron el comportamiento de una cepa de *Pseudomonas fluorescente* (Migula, 1895) promotora del crecimiento vegetal GRP3A en fréjol mungo (*V. radiata*), demostrando que existe promoción del crecimiento de las plantas en condiciones limitadas de hierro.

Estudios han demostrado que *Bacillus* spp. consigue sintetizar una gran variedad de antibióticos, toxinas, sideróforos y enzimas líticas, e inducir la resistencia sistémica y el crecimiento de las plantas (Khan *et al.*, 2021). En una investigación realizada por Rangel-Montoya *et al.* (2022) estudiaron el biocontrol de *Macrophomina phaseolina* (Goid, 1947) utilizando cepas de *Bacillus amyloliquefaciens* (Priest *et al.*, 1987) en caupí, demostrando que es posible reducir lesiones causadas por *M. phaseolina* e inducir un aumento significativo en la biomasa del follaje y la raíz. En la tabla 1, se muestran los beneficios de las bacterias promotoras de crecimiento en el cultivo de fréjol caupí, en diferentes países y tipos de suelo.

Analizando el *Acetobacter* (Beijerinck, 1898) promueve crecimiento especialmente de no leguminosas como la caña de azúcar y el maíz, demostrando efectos considerables en el desarrollo vegetativo de las plantas (Swarnalakshmi *et al.*, 2020).

En una investigación efectuada por Mathu *et al.* (2012), evaluaron en suelos de Kenia diversos rizobios autóctonos y comerciales, y determinaron que en los suelos estudiados no es necesario aplicar rizobios inoculantes comerciales para mejorar los rendimientos de biomasa, lo que indica que no es necesario aplicar inoculantes si en el suelo que se siembra existen suficientes microorganismos promotores de crecimiento.

La inoculación microbiana con la coinoculación de *Bradyrhizobium* y *Azospirillum*, con la adición de 9 t de bentonita como enmienda del suelo, aumentó significativamente el crecimiento vegetativo, la actividad enzimática y el rendimiento de las plantas de caupí cultivadas en suelo arenoso en ambas temporadas de crecimiento en comparación con el control (Abd-Elgwad, 2019).

Se ha evaluado *Azotobacter* y *Rhizobium* como inoculantes naturales en semillas y plantas de fréjol caupí. En esta investigación la cepa *Azotobacter* obtuvo un 80 % de germinación a los dos días de siembra, siendo mayor germinación que en las semillas tratadas con agua, donde la germinación fue de 66 %, muchas de las bacterias presentan, diversos mecanismos que favorecen el desarrollo de plantas, lo que hace que sean consideradas como bacterias promotoras del crecimiento vegetal entre las más destacadas se encuentran las pertenecientes a los géneros *Azotobacter* y *Azospirillum*, las cuales son bacterias de vida libre que constitutivamente poseen la cualidad de fijar N₂ atmosférico (Curi *et al.*, 2020).

Fue evaluada la viabilidad técnica y económica del caupí en la región del Cerrado, en función de las dosis de N y la co-inoculación de semillas con *A. brasilense* y *Bradyrhizobium*. Realizaron las siguientes evaluaciones: rendimiento de grano, costo operativo total, costo operativo efectivo, ingreso bruto, utilidad operativa, índice de rentabilidad, precio de equilibrio y rendimiento de equilibrio. La coinoculación con *A. brasilense* aumenta el rendimiento de grano de caupí, lo que hace que la producción de caupí en la región del Cerrado de Brasil sea técnica y económicamente viable, sin necesidad de aplicar fertilizantes nitrogenados en la cobertura (Galindo *et al.*, 2020).

Oliveira *et al.* (2017) estudiaron el rendimiento de grano mejorado de caupí bajo déficit hídrico después de la inoculación con *Bradyrhizobium elkanii* y *Rhizopagus irregularis*. Con un déficit hídrico moderado, el rendimiento de grano aumentó en un 63%, 55% y 84% en plantas inoculadas con *B. elkanii*, *R. irregularis* y *B. elkanii* + *R. irregularis*, respectivamente. Bajo agua severa déficit, la inoculación con *B. elkanii* y *B. elkanii* + *R. irregularis* resultó en una mejora del rendimiento de grano de 45% y 42%, respectivamente, mismos que aportan con un gran potencial para la agricultura sostenible.

En Etiopía fueron realizados experimentos de campo en las temporadas de cultivo de 2018 y 2019 en tres sitios vulnerables al cambio climático y la inseguridad alimentaria para determinar las respuestas de rendimiento de variedades de caupí a inoculación de *Bradyrhizobium*. Los resultados revelaron diferencias varietales significativas en el rendimiento de los cultivos y los componentes del rendimiento a lo largo de los años y entre los sitios. En promedio a lo largo de las temporadas, el rendimiento de semillas de TVU fue un 52 % más alto en comparación con la variedad de fréjol ojo negro de bajo rendimiento. En promedio de los tres sitios, la inoculación de caupí con la cepa CP-24 aumentó significativamente el rendimiento de semillas (21 %), el número de vainas (16 %) y el peso de 100 semillas (13 %) en relación con el control. Además, la interacción entre la variedad y el inoculante resultó en un aumento significativo en el rendimiento de semillas y el número de vainas por planta de TVU × CP-24 en un 60 y 68 %, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin inocular. En general, se recomienda la inoculación de las variedades de caupí TVU y White Wonderer con cepas de *Bradyrhizobium* CP-24 en los tres sitios evaluados y entornos agroecológicos similares para mejorar la productividad del caupí (Ayalew *et al.*, 2021).

En condiciones de invernadero fue efectuada la inoculación con la nueva especie de *Rhizobium* cepa

11515TR en diferentes leguminosas entre ellas el fréjol caupí, los resultados mostraron que *Rhizobium* sp. cepa 11515TR tiene potenciales promotores del crecimiento y de biocontrol que pueden contribuir a su desarrollo como posible inoculante microbiano (Villegas *et al.*, 2022).

En un estudio comparativo, Puca *et al.* (2022) determinaron el crecimiento de plantas de fréjol caupí inoculadas con *Azotobacter* sp. y urea, demostraron que un mayor crecimiento en las plantas de caupí al

emplearse una dosificación de $1,8 \times 10^9$ células contenidas en 1 mL del biofertilizante *Azotobacter* sp. alcanzando una longitud de la parte aérea de $16,33 \pm 0,757$ cm comparadas con las plantas de fréjol del grupo control en las que alcanzaron una longitud promedio de $12,467 \pm 1,102$, los autores concluyeron que es posible considerar al biofertilizante *Azotobacter* sp. como una alternativa ecológica para contrarrestar los daños ambientales que produce la urea.

Tabla 1. Beneficios de las bacterias promotoras de crecimiento en el cultivo de fréjol caupí, en diferentes países y tipos de suelo.

Lugar de la Investigación	Tipo de suelo	Bacteria Promotora de Crecimiento	Beneficios	Referencia
Etiopía	franco arcilloso	<i>Bradyrhizobium</i>	Aumento significativo en el rendimiento de 2,5 t ha ⁻¹ del tratamiento control a 2,69 t ha ⁻¹ .	Ayalew <i>et al.</i> (2021)
Brasil	arcilloso, arenoso y limoso	<i>Bradyrhizobium</i> de la cepa élite <i>B. pachyrhizi</i> BR 3262 y coinoculación con otro <i>Bradyrhizobium</i> eficiente de la región semiárida de Brasil. Otro experimento con 11 bacterias de diferentes suelos individualmente o coinoculados con BR 3262.	Aumento de número de nódulos de 5 al 67,5% por la coinoculación con BR 3262. Se demostró el mejor desempeño con la coinoculación con <i>Bradyrhizobium</i> en caupí, que en la inoculación individual.	do Nascimento <i>et al.</i> (2021)
Brasil	arcilloso	Las plantas no fueron inoculadas, con o sin fertilizante de 70 kg N ha ⁻¹ , o fueron inoculadas con cinco cepas de <i>Rhizobium</i> , por separado o como una mezcla.	El rendimiento de grano aumentó significativamente de aproximadamente 1200 a 1500 kg ha ⁻¹ con las cepas BR 3262 e INPA 03-11B en Primavera do Leste, y de aproximadamente 850 a 1400 kg ha ⁻¹ con la cepa BR 3262 en Sinop.	da Silva-Júnior <i>et al.</i> (2018)
Egipto	arenoso	<i>Bradyrhizobium</i> y <i>Azospirillum brasilense</i>	Inocular con <i>Bradyrhizobium</i> sp. y <i>Azospirillum brasilense</i> y adición de 9 Mg fed ⁻¹ la bentonita podría mejorar el crecimiento de los cultivos de caupí y mejorar la fertilidad del suelo arenoso	Abd-Elgwad (2019)

Con la presente revisión de literatura se concluye que el fréjol caupí representa un alimento muy importante para poblaciones de bajos ingresos por ser un alimento rico en proteínas y minerales dispensables para la alimentación humana con múltiples beneficios para la salud. Por ser una leguminosa, diferentes rizobios forman una relación simbiótica, siendo el género *Bradyrhizobium* en la mayoría de las investigaciones el más estudiado, estas rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, han presentado múltiples beneficios al cultivo del caupí desde el aumento de biomasa foliar, rendimiento, tolerancia al déficit hídrico y biocontrol. La inoculación o coinoculación con *Bradyrhizobium* para caupí es una tecnología prometedora para mejorar la producción de granos.

Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

AAPV = Abrahán Alfredo Palma-Velásquez

FZG = Freddy Zambrano-Gavilanes

Conceptualization: AAPV, FZG

Data curation: AAPV, FZG

Formal Analysis: AAPV, FZG

Funding acquisition: AAPV, FZG

Investigation: AAPV, FZG

Methodology: AAPV, FZG

Project administration: AAPV, FZG

Resources: AAPV, FZG

Software: AAPV, FZG

Supervision: AAPV, FZG

Validation: AAPV, FZG

Visualization: AAPV, FZG

Writing – original draft: AAPV, FZG

Writing – review & editing: AAPV, FZG

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Elgwad, S. (2019). Effect of microbial inoculation and bentonite amendments on growth, enzyme activity and yield of cowpea cultivated in sandy soil. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 3, 63-72.
- Apáez, B.P., Escalante, E.J.A., Rodríguez, G.M.T., Olalde, G.V.M., & Ramírez, V.P. (2009). Frijol chino (*Vigna unguiculata* L.(Walp)) su cultivo, importancia económica y medicinal. *Alternativa*, 19, 21-26.
- Ayalew, T., Yoseph, T., Petra, H., & Cadisch, G. (2021). Yield response of field-grown cowpea varieties to *Bradyrhizobium* inoculation. *Agronomy Journal*, 113, 3258-3268.
- Baez-Hernandez, A., & Hernandez-Medina, C.A. (2016). Estudio del rendimiento de cultivares de frijol caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) en diferentes épocas de siembra en Camajuani, Cuba. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 26, 11-18.
- Barrios, P.A.A., Estrada, J.A.S.E., Gonzalez, M.T.R.I., Barrios, M.A.A., & Gutierrez, V. I. M. O. (2014). Phenology, biomass and yield of cowpea in terms of climate and trellis type. *African Journal of Agricultural Research*, 9, 2520-2527.
- Borguete, R., Alves, R., Fernandez, M., Cocco, S., Letizia, M., Fornasier, F., & Giuseppe, C. (2019). Benefits of biochars and NPK fertilizers for soil quality and growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) in an acid Arenosol. *Pedosphere*, 29, 311-333.
- Boukar, O., Abberton, M., Oyatomi, O., Togola, A., Tripathi, L., & Fatokun, C. (2020). Introgression breeding in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]. *Frontiers in Plant Science*, 11, 567425.
- Boukar, O., Belko, N., Chamarthi, S., Togola, A., Batiemo, J., Owusu, E., Haruna, M., Diallo, S., Umar, M.L., Olufajo, O., & Fatokun, C. (2019). Cowpea (*Vigna unguiculata*): Genetics, genomics and breeding. *Plant Breeding*, 138, 415-424.
- Camelo-Rusique, M., Moreno-Galván, A., Romero-Perdomo, F., & Bonilla-Buitrago, R. (2017). Desarrollo de un sistema de fermentación líquida y de enquistamiento para una bacteria fijadora de nitrógeno con potencial como biofertilizante. *Revista argentina de microbiología*, 49, 289-296.
- Chávez-Díaz, I.F., Zelaya-Molina, L.X., Cruz-Cárdenas, C.I., Rojas-Anaya, E., Ruíz-Ramírez, S., & Santos-Villalobos, S.D.L. (2020). Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11, 1423-1436.
- Chibeba, A.M., Kyei-Boahen, S., de Fátima Guimarães, M., Nogueira, M.A., & Hungria, M. (2017). Isolation, characterization and selection of indigenous *Bradyrhizobium* strains with outstanding symbiotic performance to increase soybean yields in Mozambique. *Agriculture, ecosystems & environment*, 246, 291-305.

- Curi, M. A., Medina, E. G., & Heredia, V. (2020). *Azotobacter* y *Rhizobium* como biofertilizantes naturales en semillas y plantas de frijol caupi. *Avances*, 22, 239-251.
- D'Andrea, A.C., Kahlheber, S., Logan, A.L., & Watson, D.J. (2007). Early domesticated cowpea (*Vigna unguiculata*) from Central Ghana. *Antiquity*, 81, 686-698.
- da Silva-Júnior, E.B., Favero, V.O., Xavier, G.R., Boddey, R.M., & Zilli, J.E. (2018). *Rhizobium* inoculation of cowpea in Brazilian cerrado increases yields and nitrogen fixation. *Agronomy Journal*, 110, 722-727.
- de Almeida-Santos, M.P., dos Santos, A.C., Chan, G.A.H., Dalcin, M.S., Rocha, W.S., & da Costa Leite, O. (2021). Variabilidade espacial de características morfofisiológicas do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.). *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 9, 369-376.
- de Oliveira, L. F. C., Oliveira, M. D. C., Wendland, A., Guimarães, C. M., Quintela, E. D. Barbosa, F. R., Carvalho, M. C. S., Lobo-Junior, M. & Silveira, P. M. (2018). *Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos*. Embrapa.
- Duan, J. L., Li, X. J., Gao, J. M., Wang, D. S., Yan, Y., & Xue, Q. H. (2013). Isolation and identification of endophytic bacteria from root tissues of *Salvia miltiorrhiza* Bge. and determination of their bioactivities. *Annals of microbiology*, 63, 1501-1512.
- Estrada-Prado, W., Chávez-Suárez, L., Jerez-Mompie, E., Nápoles-García, M.C., Sosa-Rodríguez, A., Cordoví-Dominguez, C., & Celeiro-Rodríguez, F. (2017). Efecto del Azofert® en el rendimiento de variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de déficit hídrico. *Centro Agrícola*, 44, 36-42.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *FAOSTAT. Datos sobre alimentación y agricultura: año 2020*. Dirección de Estadísticas. http://www.fao.org/faostat/es/#rankings/commodities_by_country
- Fernández, F. (1982). *Etapas de desarrollo de la planta de frijol común*. Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Galindo, F. S., Pagliari, P. H., da Silva, E. C., Silva, V. M., Fernandes, G. C., Rodrigues, W. L., Céu, E.G., Horschut de Lima, B., Jalal, A., Muraoka, T., Buzetti, S., Lavres, J., & Teixeira Filho, M. C. M. (2022). Co-Inoculation with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* sp. enhances nitrogen uptake and yield in field-grown cowpea and did not change n-fertilizer recovery. *Plants*, 11, 1847.
- Galindo, F.S., Teixeira Filho, M., Silva, E.C.D., Buzetti, S., Fernandes, G.C., & Rodrigues, W.L. (2020). Technical and economic viability of cowpea co-inoculated with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. and nitrogen doses. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24, 304-311.
- García-Fraile, P., Menéndez, E., & Rivas, R. (2015). Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *Aims Bioengineering*, 2, 183-205.
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica (Cairo)*, 2012, 963401.
- Hernández-López, V.M., Vargas-Vázquez, M.L.P., Muruaga-Martínez, J.S., Hernández-Delgado, S., & Mayek-Pérez, N. (2013). Origen, domesticación y diversificación del frijol común: Avances y perspectivas. *Revista fitotecnia mexicana*, 36, 95-104.
- INEC - Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC). Cultivo del frijol*. http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/webinec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac_2020/Presentacion_Principales_Resultados_ESPAC_2020
- Jaiswal, S. K., Mohammed, M., Ibny, F. Y., & Dakora, F. D. (2021). Rhizobia as a source of plant growth-promoting molecules: Potential applications and possible operational mechanisms. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 619676.
- Ji, J., Zhang, C., Sun, Z., Wang, L., Duanmu, D., & Fan, Q. (2019). Genome editing in cowpea *Vigna unguiculata* using CRISPR-Cas9. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 2471.
- Kalia, A., Sharma, S.P., Kaur, S., & Kaur, H. (2020). Bacterial inoculants: How can these microbes sustain soil health and crop productivity?. In: Giri, B. & Varma, A. (Eds.), *Soil health, soil biology*. (pp. 337-372). Springer.
- Kebede, E., & Bekeko, Z. (2020). Expounding the production and importance of cowpea (*Vigna*

- unguiculata* (L.) Walp.) in Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*, 6, 1769805.
- Kebede, E., Amsalu, B., Argaw, A., & Tamiru, S. (2020). Symbiotic effectiveness of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) nodulating rhizobia isolated from soils of major cowpea producing areas in Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*, 6, 1763648.
- Khan, M., Salman, M., Jan, S.A., & Shinwari, Z.K. (2021). Biological control of fungal phytopathogens: A comprehensive review based on *Bacillus* species. *Journal of Biology and Medicine*, 6, 90-92.
- Kosty, M., Pule-Meulenberg, F., Humm, E. A., Martínez-Hidalgo, P., Maymon, M., Mohammadi, S., Cary, J., Yang, P., Reddi, K., Huntemann, M., Clum, A., Foster, B., Foster, B., Roux, S., Palaniappan, K., Varghese, N., Mukherjee, S., Reddy, T.B.K., Daum, C., Copeland, A., Ivanova, N., Kyrpides, N., del Rio, T.G., Eloë-Fadros, E., & Hirsch, A.M. (2020). Isolation of potential plant growth-promoting bacteria from nodules of legumes grown in arid Botswana soil. *bioRxiv*, 2020, 1-34.
- Kumari, P., Meena, M., & Upadhyay, R.S. (2018). Characterization of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) isolated from the rhizosphere of *Vigna radiata* (mung bean). *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 16, 155-162.
- Luchen, C. C., Uzabakiriho, J. D., Chimwamurombe, P. M., & Reinhold-Hurek, B. (2018). Evaluating the yield response to bio-inoculants of *Vigna unguiculata* in the Kavango Region in Namibia. *Journal of Plant Pathology and Microbiology*, 9, 1000456.
- Maitra, S., Brestic, M., Bhadra, P., Shankar, T., Praharaj, S., Palai, J.B., Shah, M.R., Barek, V., Ondrisik, P., Skalický, Milan., & Hossain, A. (2022). Bioinoculants—Natural biological resources for sustainable plant production. *Microorganisms*, 10, 51.
- Martínez, F.C., Álvarez, A.E.B., Malagón, G.C., Carriel, J.M., Jaramillo, M.P., & Rosero, N.C. (2015). Aplicación de Rizobacterias que promueven el crecimiento en plantas (PGPR) del género *Pseudomonas* spp como controladores biológicos de insectos y nemátodos-plagas. *Ciencia y Tecnología*, 8, 25-30.
- Mataranyika, P., Chimwamurombe, P. M., Venturi, V., & Uzabakiriho, J. D. (2022). Bacterial bioinoculants adapted for sustainable plant health and soil fertility enhancement in Namibia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 389.
- Mathu, S., Herrmann, L., Pypers, P., Matiru, V., Mwirichia, R., & Lesueur, D. (2012). Potential of indigenous bradyrhizobia versus commercial inoculants to improve cowpea (*Vigna unguiculata* L. walp.) and green gram (*Vigna radiata* L. wilczek.) yields in Kenya. *Soil science and plant nutrition*, 58, 750-763.
- Maxted, N., Mabuza, P., Moss, H., Padulosi, S., Jarvis, A., & Guarino, L. (2004). *An ecogeographic study African vigna*. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos.
- Michel, D.C., Vasques, I.C.F., Araújo, G.D., Castro, J.L., Assis, L.L., dos Reis, R.H., Castro, J.L., Souza-Silva, M.L., & Faquim, V. (2020). Influence of molybdenum doses in inoculation and mineral fertilization in cowpea beans. *Bioscience Journal*, 36, 102-112.
- Molina-Romero, D., Bustillos-Cristales, M.D.R., Rodríguez-Andrade, O., Morales-García, Y.E., Santiago-Saenz, Y., Castañeda-Lucio, M., & Muñoz-Rojas, J. (2015). Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas*, 17, 24-34.
- Narayanan, M., Ranganathan, M., Kandasamy, G., & Kumarasamy, S. (2021). Evaluation of interaction among indigenous rhizobacteria and *Vigna unguiculata* on remediation of metal-containing abandoned magnesite mine tailing. *Archives of Microbiology*, 203, 1399-1410.
- do Nascimento, T.R., Sena, P.T.S., Oliveira, G.S., da Silva, T.R., Dias, M.A.M., de Freitas, A.D.S., Vieira-Martins, L.M., & Fernandes-Júnior, P.I. (2021). Co-inoculation of two symbiotically efficient *Bradyrhizobium* strains improves cowpea development better than a single bacterium application. *3 Biotech*, 11, 1-12.
- Neto, E. B., Barreto, L. P., & Coelho, J. B. M. (2014). Considerações sobre nutrição mineral e o caso do feijão vigna. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica*, 11, 85-120.
- OECD. (2016). *Cowpea (Vigna unguiculata) in Safety Assessment of Transgenic Organisms in the Environment*, Volume 6: OECD Consensus Documents, OECD Publishing.
- Oliveira, R., Carvalho, P., Marques, G., Ferreira, L., Pereira, S., Nunes, M., Rocha, I., Ying, M., Carvalho, M.,

- Vosátka, M., & Freitas, H. (2017). Improved grain yield of cowpea (*Vigna unguiculata*) under water deficit after inoculation with *Bradyrhizobium elkanii* and *Rhizophagus irregularis*. *Crop and Pasture Science*, *68*, 1052-1059.
- Oliveira, G. S., Sena, P. T. S., do Nascimento, T. R., Neto, R. A. F., Pereira, J. R. C., Martins, L. M. V., de Freitas, A.D., Signor, D., & Fernandes-Júnior, P. I. (2020). Are cowpea-nodulating bradyrhizobial communities influenced by biochar amendments in soils? Genetic diversity and symbiotic effectiveness assessment of two agricultural soils of Brazilian drylands. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *20*, 439-449.
- Ormeño-Orrillo, E., Menna, P., Almeida, L. G. P., Ollero, F. J., Nicolás, M. F., Pains-Rodrigues, E., Shigeyoshi-Nakatani, A., Silva-Batista, J., Oliveira-Chueire, L., Souza, R., Ribeiro Vasconcelos, A., Megías, M., Hungria, M., & Martínez-Romero, E. (2012). Genomic basis of broad host range and environmental adaptability of *Rhizobium tropici* CIAT 899 and *Rhizobium* sp. PRF 81 which are used in inoculants for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *BMC genomics*, *13*, 1-26.
- Ouyang, W., Wang, Y., Lin, C., He, M., Hao, F., Liu, H., & Zhu, W. (2018). Heavy metal loss from agricultural watershed to aquatic system: A scientometrics review. *Science of the Total Environment*, *637*, 208-220.
- Puca, M., Gonzales, E.Y., Jayos, E.E., & Llanos, K.N. (2022). Estudio comparativo de los parámetros de crecimiento de plantas de frijol caupí inoculados con *Azotobacter* sp y urea. *Afinidad*, *79*, 500-508.
- Rangel-Montoya, E.A., Delgado-Ramírez, C.S., Sepulveda, E., & Hernández-Martínez, R. (2022). Biocontrol of *Macrophomina phaseolina* Using *Bacillus amyloliquefaciens* strains in cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Agronomy*, *12*, 676.
- Semenov, M.V., Krasnov, G.S., Semenov, V.M., & van Bruggen, A.H. (2020). Long-term fertilization rather than plant species shapes rhizosphere and bulk soil prokaryotic communities in agroecosystems. *Applied Soil Ecology*, *154*, 103641.
- Sena, P.T.S., do Nascimento, T.R., Lino, J.D.O.S., Oliveira, G.S., Ferreira Neto, R.A., de Freitas, A.D.S., Fernandes-Junior, P.I., & Martins, L.M.V. (2020). Molecular, physiological, and symbiotic characterization of cowpea rhizobia from soils under different agricultural systems in the semiarid region of Brazil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *20*, 1178-1192.
- Shahab, S., Ahmed, N., & Khan, N.S. (2009). Indole acetic acid production and enhanced plant growth promotion by indigenous PSBs. *African Journal of Agricultural Research*, *4*, 1312-1316.
- Sharma, A., & Johri, B.N. (2003). Combat of iron-deprivation through a plant growth promoting fluorescent *Pseudomonas* strain GRP3A in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilzeck). *Microbiological Research*, *158*, 77-81.
- Simbine, M. G., Jaiswal, S. K., & Dakora, F. D. (2021). Diverse symbiovars nodulating cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) in highly adaptable agro-ecological zones in Mozambique. *Systematic and Applied Microbiology*, *44*, 126220.
- Simion, T. (2018). Breeding cowpea *Vigna unguiculata* [L.] Walp for quality traits. *Annals of Reviews and Research*, *3*, 555-609.
- Sindhu, S. S., Dua, S., Verma, M. K., & Khandelwal, A. (2010). Growth Promotion of Legumes by Inoculation of Rhizosphere Bacteria BT. Musarrat, K.J., & Zaidi, A. (eds.). (pp. 195–235). *Microbes for Legume Improvement*. Springer.
- Singh, B. (2020). *Cowpea: the food legume of the 21st century*. John Wiley & Sons.
- Singh, J.S. (2013). Plant growth promoting rhizobacteria: potential microbes for sustainable agriculture. *Resonance*, *18*, 275-281.
- Swarnalakshmi, K., Yadav, V., Tyagi, D., Dhar, D.W., Kannepalli, A., & Kumar, S. (2020). Significance of plant growth promoting rhizobacteria in grain legumes: Growth promotion and crop production. *Plants*, *9*, 1596.
- Villegas, L. C., Montecillo, A. D., & Leones, J. A. M. (2022). Plant growth promoting properties of a novel species of *Rhizobium* sp. strain 11515TR isolated from tomato rhizosphere in Los Baños, Laguna, Philippines. *Philippine Journal of Science*, *151*, 1099-1114.
- Villegas-Espinoza, J.A., Rueda-Puente, E.O., Murillo-Amador, B., Puente, M.E., Ruiz-Espinoza, F.H., Zamora-Salgado, S., & Beltran Morales, F. A. (2014). Bacterias promotoras de crecimiento de plantas autóctonas y su efecto en *Prosopis chilensis* (Molina) Stunz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *5*, 1041-1053.

Xiong, H., Shi, A., Mou, B., Qin, J., Motes, D., Lu, W., Ma, J., Weng, Y., Yang, W., & Wu, D. (2016). Genetic diversity and population structure of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). *PloS one*, *11*, e0160941.

Zhang, K., Xu, H., Zhuang, X., Zang, Y., & Chen, J. (2021). First report of *Vicia cryptic virus M* infecting cowpea (*Vigna unguiculata*) in China. *Plant Disease*, *105*, 234.

Received February 27, 2023.

Accepted May 30, 2023.