

# Biofertilizantes: conceptos, beneficios y su aplicación en Colombia

## Biofertilizers: concepts, benefits and its application in Colombia

Laura Natalí Afanador Barajas<sup>1</sup>

### Resumen

En la actualidad, uno de los principales problemas en la agricultura es el uso indiscriminado de fertilizantes químicos, que puede conducir a la pérdida de fertilidad del suelo y la contaminación de los cuerpos de agua. Como alternativa, los biofertilizantes son una herramienta biotecnológica que consiste en aplicar microorganismos que ayudan a mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y así logran disminuir los efectos causados por el exceso de fertilizantes. El uso de biofertilizantes en diferentes cultivos ha evidenciado efectos positivos en la fertilidad del suelo. Esta revisión bibliográfica pretende ilustrar qué son y cómo están conformados los biofertilizantes; sus principales beneficios en la agricultura y el suelo; la problemática que existe en su producción, y cómo se encuentra esta área de investigación e innovación en Colombia. En conclusión, es clara la relevancia de esta área de estudio y el potencial de Colombia para el desarrollo de nuevos biofertilizantes mediante bioprospección de microorganismos endógenos, de modo que en el futuro se puedan llevar a cabo prácticas agrícolas más sostenibles.

**Palabras clave:** biofertilizantes, bioinoculantes, microorganismos, PGPR, sostenibilidad.

### Abstract

At present, one of the main problems presented by agriculture is the indiscriminate use of chemical fertilizers that can lead to the loss of soil fertility and the contamination of water bodies. In response, biofertilizers have emerged as a biotechnological tool, which consists of the application of microorganisms that help to improve the availability of nutrients in the soil and thus reduce the effects caused by excess fertilizers. The use of biofertilizers in different crops has shown positive effects on soil fertility. This literature review aims to illustrate how biofertilizers are defined, the principal types, the main benefits of use in agriculture and soil, the problems that exist in the quality of their

<sup>1</sup> Bióloga y microbióloga. Magíster en Ciencias Biológicas. Estudiante del Doctorado en Ciencias, Especialidad Biotecnología. Profesora del Departamento de Ciencias Naturales de la Universidad Central e integrante del grupo de investigación Biomat. Correo: lafanadorb@ucentral.edu.co.

production and how this area of research and innovation is found in Colombia. In conclusion, it was possible to understand the relevance of this area of study and the potential of Colombia for the development of new biofertilizers through

bioprospecting of native microorganisms and in the future to carry out more sustainable agricultural practices

**Key words:** Biofertilizer, Bioinoculant, Microorganism, PGPR, Sustainability.

## 1. Introducción

En la actualidad, el suelo es uno de los recursos más vulnerables debido a su sobreexplotación, lo cual deriva en problemas como la erosión y una baja fertilidad natural. En consecuencia, esto afecta directamente la productividad de los cultivos, la capacidad de trabajo y la posibilidad de establecer sistemas productivos sustentables (Rueda-Puente et ál., 2015). Adicionalmente, la sobreexplotación ha conllevado el uso indiscriminado de los fertilizantes químicos, otro problema que trae consecuencias ambientales importantes. Esto ha hecho que la agricultura se enfoque en buscar soluciones a estas problemáticas, y para ello se están usando diversos microorganismos para suplir la necesidad de nutrientes que fertilicen el suelo (Pereg y McMillan, 2015; Pereira y Castro, 2014). Estos microorganismos son llamados *biofertilizantes* o *bioinoculantes*.

Los biofertilizantes han emergido como una panacea para la agricultura orgánica y sostenible. Con ellos, se busca incrementar el número de microorganismos beneficiosos en el suelo con respaldo científico para lograr la sostenibilidad en la agricultura (Sahu y Brahma-prakash, 2016). Estos biofertilizantes pueden ser aplicados a las semillas, la superficie de las plantas o el suelo para colonizar la rizósfera o el interior de la planta, y promover el

crecimiento al aumentar la oferta o disponibilidad de nutrientes primarios a la planta huésped. Una categoría de estos inoculantes son las rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés), fitoestimulantes que contienen generalmente auxinas bacterianas capaces de inducir el alargamiento de la raíz (Malusá, Sas-Paszt y Ciesielska, 2012). Entre los principales biofertilizantes comerciales se encuentran *Azotobacter*, *Azolla*, *Acetobacter* y *Azospirillum*, que son aplicados en diversos cultivos de cereales y hortalizas (Pathak y Kumar, 2016).

Para aumentar la producción desde un enfoque sostenible, las PGPR afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas directa o indirectamente, ya sea facilitando su absorción de nutrientes (fijación de N<sub>2</sub>, solubilización de fósforo), induciendo aumentos en la superficie de las raíces (producción de hormonas) o reduciendo el efecto perjudicial de los patógenos (Arora, Khare y Maheshwari, 2011; Khalid, Arshad, Shaharoon y Mahmood, 2009; Vessey, 2003). Los biofertilizantes pueden ser de gran importancia económica, ya que podrían reemplazar parcialmente a otros productos agroquímicos que son costosos. Por último, el desarrollo de biofertilizantes responde a la demanda creciente de prácticas agrícolas más respetuosas con el medioambiente y sostenibles (Bhattacharjee y Dey, 2014).

## 2. ¿Qué son los biofertilizantes?

Vessey (2003) define los biofertilizantes como una sustancia que contiene microorganismos vivos que, al ser aplicada a semillas, superficies de plantas o suelo, coloniza la rizósfera o el interior de la planta y promueve su crecimiento aumentando el suministro o la disponibilidad de nutrientes primarios. Así, el término *biofertilizante* se refiere a un producto que contiene microorganismos del suelo aplicados a plantas para promover su crecimiento. Sin embargo, a menudo se ha utilizado erróneamente como sinónimo de una amplia gama de productos tales como fertilizantes orgánicos, compost, estiércol de animales, entre otros (Somers, Vanderleyden y Srinivasan, 2004; Bhattacharyya y Jha, 2012).

Las cepas individuales o los consorcios microbianos son conocidos como bioinoculantes, que puede ser el sinónimo más preciso para los biofertilizantes. A partir del conocimiento

sobre la función de los microorganismos, se pueden crear bioinoculantes para diversos tipos de suelo y sistemas de cultivo (Roesti et ál., 2006; Ahmad, Uddin, Ahmad e Islam, 2013). Aquellos microorganismos con atributos específicos para la movilización de fósforo en el suelo se denominan *microorganismos movilizadores de fósforo* (Jones y Oburger, 2011; Sharpley, Jarvie, Buda, May, Spears y Kleinman, 2013; Sheng, Lalande, Hamel y Ziadi, 2013).

En la tabla 1 se muestran los diferentes tipos de biofertilizantes que existen y algunos de los principales microorganismos (bacterias y hongos) que se utilizan para la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfato, la movilización de fosfato y la movilización de zinc y potasio (Bhattacharjee y Dey, 2014; Mahanty et ál., 2016). Se destacan los géneros de bacterias como *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Bacillus* y *Rhizobium*, que se encuentran en múltiples categorías de biofertilizantes, lo que los hace muy atractivos para el desarrollo de productos.

Tabla 1. Principales tipos de biofertilizantes

Fijadores de N <sub>2</sub>	Microorganismos solubilizadores de fosfato	PGPR	Movilizadores de fosfato (micorrizas)	Movilizadores de zinc y potasio
Vida libre: <i>Achromobacter</i> <i>Acetobacter</i> <i>Alcaligenes</i> <i>Arthrobacter</i> <i>Azotobacter</i> <i>Cyanobacteria</i> <i>Azospirillum</i>	<i>Aspergillus niger</i> (no virulento) <i>Trichoderma</i> sp. <i>Paecilomyces</i> sp. <i>Bacillus circulans</i> <i>Bacillus coagulans</i> <i>Torulospora globosa</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Thiobacillus</i> (SOM)	<i>Azotobacter</i> <i>Bacillus</i> <i>Agrobacterium</i> <i>Erwinia</i> <i>Alcaligenes</i> <i>Arthrobacter</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Rhizobium</i> <i>Streptomyces</i> <i>Xanthomonas</i>	<i>Glomus</i> sp. <i>Entrophospora</i> sp. <i>Acaulospora</i> sp. <i>Escutellaspera</i> sp.	Zinc: <i>Pseudomonas</i> spp. <i>Bacillus</i> spp. <i>Rhizobium</i> sp.  Potasio: <i>Bacillus</i> spp. <i>Pseudomonas</i> spp.
Simbióticos: <i>Rhizobium</i> sp. <i>Bradyrhizobium</i> sp. <i>Azolla</i>				

Fuente: elaboración propia con base en Bhattacharjee y Dey (2014), y Mahanty et ál. (2016).

### 3. Características y beneficios de los biofertilizantes

Las prácticas agrícolas y el aumento de la demanda mundial de alimentos han afectado el medioambiente, especialmente la calidad del suelo en términos de su calidad y equilibrio ecológico (Malusá, Pinzari y Canfora, 2016). Esto ha fomentado la creación de nuevas opciones para las prácticas agrícolas, de forma que estas tiendan a ser 1) menos invasivas para el ambiente, 2) más baratas que las convencionales, 3) capaces de aumentar la eficiencia a bajo costo, 4) capaces de obtener mejores características en las cosechas, y 5) fáciles de usar e implementar sin requerimientos técnicos excesivos (Carvajal-Muñoz y Carmona-García, 2012). En este sentido, las biotecnologías como la biofertilización han surgido como una alternativa para minimizar los impactos ambientales y aprovechar mejor los recursos disponibles en el campo.

Los biofertilizantes pueden ayudar a aliviar las tensiones ambientales y de seguridad alimentaria, siempre y cuando se identifiquen y se transfieran a los microorganismos útiles como las PGPR. Sin embargo, la falta de protocolos mejorados para la aplicación de biofertilizantes en el campo es una de las pocas razones por las cuales muchas PGPR útiles tan solo son conocimiento de ecólogos y agricultores. Sin embargo, los avances en tecnologías relacionadas con la ciencia microbiana, las interacciones planta-patógeno y la genómica ayudarán a optimizar los protocolos requeridos. Así pues, el éxito del desarrollo científico de los biofertilizantes depende del desarrollo de estrategias innovadoras relacionadas con las funciones de las PGPR y su correcta aplicación en el campo de la agricultura. El principal desafío en esta área de investigación es identificar diversas cepas de PGPR y conocer

sus propiedades funcionales para la explotación en la agricultura sostenible (Bhardwaj, Ansari, Sahoo y Tuteja, 2014). Aquí existe un gran potencial de investigación y desarrollo del que se pueden ocupar los científicos y los bioingenieros.

Los biofertilizantes se basan en una fórmula de microorganismos vivos que son beneficiosos tanto para la planta como para el suelo. Se pueden aplicar en la semilla, la raíz o el suelo. Su principal objetivo es movilizar la disponibilidad de nutrientes con base en su actividad biológica, ayudar a recuperar la microbiota perdida y, a su vez, mejorar la salud del suelo en general (Ismail, Walids, Salah y Fadia, 2014). En consecuencia, los biofertilizantes han mostrado un gran potencial como recurso renovable y respetuoso del medioambiente y son una fuente importante de nutrientes para las plantas. Por ello, forman parte del Manejo Integrado de Nutrientes (INM) y el Sistema Integrado de Nutrición Vegetal (IPNS) (Raghuwanshi, 2012). Los biofertilizantes se producen mediante un cultivo natural y además son inofensivos para los seres humanos. Por estas razones, pueden conducir a un desarrollo económico sostenible para los agricultores y el país donde se produce (Mishra y Dash, 2014).

Existe evidencia de que el uso de biofertilizantes podría ayudar al impulso económico de los países subdesarrollados. Por ejemplo, en México muchos agricultores a escala pequeña ya están aplicando en sus cultivos biofertilizantes producidos a partir de los microorganismos activos endógenos. En esos cultivos se han encontrado resultados positivos en cuanto al mejoramiento de la productividad de la tierra. Esto facilita la comprensión de las ventajas de los biofertilizantes entre los campesinos, además de los desafíos y oportunidades que enfrentan las zonas rurales y las conexiones entre la participación de las empresas, la

academia y el Gobierno en la planificación y gestión de estas innovaciones (Barragán-Ocaña y Valle-Rivera, 2016).

En India, los biofertilizantes más usados incluyen *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, bacterias solubilizadoras de fosfato, potasio y zinc, micorrizas arbusculares (MA) y *Acetobacter*. Entre 2015 y 2016 se introdujo un producto basado en un consorcio de fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fosfato y movilizadores de potasio. Gracias a este consorcio, se observó un incremento entre 10 y 35% en la producción en campo de plantas de cultivo como cereales, semillas de aceites, vegetales, cultivos de frutas, plantas ornamentales y árboles (Sruithilaxmi y Babu, 2017). También existen otros casos de consorcios usados en cultivos con buenos resultados (Braz y Nahas, 2012). Esto conduce a pensar en una nueva formulación de biofertilizantes funcionales generados a partir de consorcios y no de un solo microorganismo, como se formulaba antes.

Los principales países con solicitudes de patentes relacionadas con biofertilizantes son China con 850 invenciones en 945 solicitudes, seguido por Japón con 645 invenciones en 1228 solicitudes, Estados Unidos con 607 invenciones en 2170 solicitudes, Corea del Sur con 255 invenciones en 413 solicitudes y Reino Unido con 144 invenciones en 537 solicitudes. En cuanto a solicitantes latinoamericanos, Colombia lidera con 32 invenciones en 32 solicitudes, luego Brasil con 15 invenciones en 36 solicitudes, México con 15 invenciones en 37 solicitudes, Argentina con 1 invención en 5 solicitudes y Cuba con 1 invención en 12 solicitudes (Silva et ál., 2014). Esto muestra un amplio panorama de oportunidades para el desarrollo de nuevos biofertilizantes que puedan tener efectos positivos para las plantas y que ayuden a incrementar la calidad del suelo.

#### 4. Importancia de la calidad de producción de los biofertilizantes

Los biofertilizantes microbianos funcionales se han utilizado en algunos países tropicales durante más de medio siglo, tanto en pequeñas como en grandes explotaciones. Dentro de los principales beneficios del uso de este tipo de bioinoculantes observados por los investigadores y desarrolladores de productos está la fijación biológica de nitrógeno, la promoción del crecimiento vegetal, la solubilización del fósforo y las micorrizas (Bhattacharjee y Dey, 2014). Sin embargo, existen limitaciones importantes para el desarrollo de la industria de biofertilizantes microbianos por los diferentes efectos que se han demostrado en campo, ya que se debe pensar en que los productos comercializados ayuden a una producción sostenible de cultivos a pequeña y gran escala (Moreno, Moreno y Uribe, 2007; Uribe, Sánchez y Vanegas, 2010).

El principal problema de la producción de los biofertilizantes es su calidad, debido a que la mayoría de las agencias productoras privadas que suministran estos productos no se preocupan por cumplir con los parámetros pertinentes. Así, la disponibilidad de biofertilizantes de buena calidad para los agricultores es el principal obstáculo para su implementación exitosa. Existe al respecto una falta de coordinación entre los agentes de extensión y los científicos. Por ello, se requiere prestar atención a los principales bioinoculantes comerciales —*Azotobacter*, *Azolla*, *Acetobacter* y *Azospirillum*— y su aplicación en diversos cultivos de cereales y hortalizas (Pathak y Kumar, 2016). La incoherencia en el rendimiento de campo de los inoculantes microbianos puede atribuirse a problemas como la adaptabilidad a un suelo no nativo, los efectos negativos de la interacción con los microorganismos

nativos de los cultivos y la incompatibilidad en la colonización de diferentes hospederos de cultivos, especies y variedades (Sruthilaxmi y Babu, 2017).

Las cualidades deseables para una apropiada formulación de biofertilizantes han sido ampliamente discutidas. Según Xavier, Holloway y Leggett (2004), la formulación comprende bacterias viables en un vehículo adecuado, junto con aditivos que establezcan y protejan la célula microbiana durante su almacenamiento y transporte. Adicionalmente, el objetivo de la formulación debe ser que sea fácil de manejar, fácil de aplicar, que proteja las bacterias de los factores ambientales dañinos y mantenga o mejore la actividad de los organismos en campo. Por tanto, se debe pensar en estas características para desarrollar un bioinoculante que tenga una buena calidad y que perdure en el tiempo.

Para lograr un control de calidad adecuado en la producción de un biofertilizante, deben establecerse normas. Estas normas pueden incorporar una serie de parámetros relacionados con lo que se conoce sobre la eficacia del producto, como el número de células viables que contiene. Por ejemplo, en Australia se requieren  $10^5$  rizobias por semilla (Bashan, 1998), mientras que en Tailandia se requieren de  $10^5$  a  $10^6$  rizobias por semilla (Herridge, 2008). En EE.UU. y Latinoamérica, entre otros países, no existe legislación al respecto (Hungria, Loureiro, Mendes, Campo y Graham, 2005).

Existen varios puntos durante la producción de biofertilizantes en los que se pueden realizar pruebas para determinar la calidad. Las pruebas sobre los cultivos originales o las cepas “madre” deben asegurar la pureza y la función de los microorganismos seleccionados antes de producir el cultivo inicial para su distribución. Es así como un problema puede ser fácilmente rectificado en este punto. Estos controles a lo largo de la producción sobre los cultivos

iniciales y el producto final son esenciales para identificar oportunamente cualquier problema en el proceso (Deaker et ál., 2011).

Un estudio reciente de Herrmann, Atieno, Brau y Lesueur (2013) mostró que, entre los 65 biofertilizantes comerciales analizados, solo el 37% de ellos podían ser considerados como “puros” y el 63% estaban contaminados con una o más cepas bacterianas. Además, el 40% de los productos ensayados no contenía ninguna de las cepas correspondientes al producto, sino solo contaminantes. Estos resultados ponen de relieve la gran necesidad de mejores sistemas de control de calidad para asegurar que los productos que llegan a los usuarios finales sean realmente eficaces.

La falta de conocimiento de los técnicos de producción es también un problema clave en la producción de inoculantes de buena calidad. Por otra parte, en los países en desarrollo, una de las principales limitaciones es la falta de instalaciones para producir y almacenar inoculantes de alta calidad, ya que con frecuencia se producen resultados de campo inconstantes por esta causa (Kannaiyan, 2003). Esto es preocupante, ya que biofertilizantes comerciales con una baja calidad hacen que los agricultores desconfíen de la eficacia de los biofertilizantes en general y por ende prefieran seguir usando fertilizantes químicos.

## 5. Investigación y desarrollo de biofertilizantes en Colombia

Existe una gran aceptación a nivel mundial del uso de biofertilizantes para una agricultura ecológicamente sostenible. En el caso de Colombia, se han usado bacterias como biofertilizantes en el cultivo de crisantemo (Santana y Vásquez, 2002), *Stevia rebaudiana* (Borda

y Pardo, 2008), vegetales (Jiménez, Montaña y Martínez, 2011), manglar (Galindo et ál., 2006) y pasto de Guinea (Cárdenas, Garrido, Bonilla y Baldani, 2010). Sin embargo, aún falta más investigación en la bioprospección de microorganismos y desarrollo de nuevos productos de biofertilizantes en el país.

Asimismo, existen pocos estudios sobre el tema de los biofertilizantes en Colombia. Un estudio bibliométrico del 2016 tan solo encontró 34 artículos de investigación, de los cuales 24 (71%) fueron sobre desarrollo de biofertilizantes y 10 (29%) sobre bioplaguicidas (Zambrano, Avellaneda, Zambrano y Bonilla, 2016). Los artículos se centraron principalmente en el estudio de los bacilos Gram negativos (70%), mientras que el resto se centraron en temas relacionados con hortalizas (30%). Los autores sugieren que la investigación en Colombia debería enfocarse en temas

como las bacterias endofíticas, la diversidad y la productividad.

Para contrastar esto, se hizo una búsqueda en bases de datos como Web of Science, Scopus, Scielo y Google Académico para encontrar estudios recientes en biofertilizantes o en microorganismos usados como biofertilizantes. Los resultados se encuentran en la tabla 2. A pesar de que la investigación en este tipo de inoculantes no es tan numerosa, es importante resaltar que sí existen diversos estudios en varios tipos de biofertilizantes, como fijadores de  $N_2$ , solubilizadores de fosfato, PGPR y micorrizas, aplicados en diversos tipos de cultivo. Uno de los aportes más interesantes en esta área es la determinación de los genomas de *Bacillus amyloliquefaciens* y *Pseudomonas fluorescens* usadas como PGPR en el cultivo de banano (Gámez et ál., 2015 y 2016).

**Tabla 2.** Publicaciones sobre biofertilizantes en Colombia en los últimos años

Tipo de biofertilizantes	Microorganismos reportados	Aplicado en	Referencia
Fijadores de $N_2$	<i>Azospirillum</i> sp.	Pasto de guinea ( <i>Panicum maximum</i> Jacq.)	(Cárdenas et ál., 2010)
Fijadores de $N_2$	<i>Azotobacter</i> sp.	Tomate, brócoli, coliflor, espinaca, etc.	(Jiménez, Montaña y Martínez, 2011)
Solubilizadores de fosfato	<i>Fusarium</i> spp. y <i>Cylindrocarpon</i> spp.	Café	(Posada, Sánchez, Sieverding, Aguilar y Heredia, 2012)
Micorriza arbuscular	<i>Rhizophagus irregularis</i>	Cassava ( <i>Manihot esculenta</i> )	(Ceballos et ál., 2013)
Solubilizadores de fosfato	<i>Scopulariopsis</i> sp. y <i>Penicillium</i> sp.	Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> )	(Beltrán, 2014)
Solubilizadores de fosfato	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., y un <i>Actinomicete</i> no identificado	Roca de fosfato	(Moreno, Osorio y González, 2015)
PGPR	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> y <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Banano ( <i>Musa acuminata</i> )	(Gámez et ál., 2015 y 2016)
PGPR	<i>Lysinibacillus sphaericus</i>	<i>Canavalia ensiformis</i>	(Martínez y Dussan, 2017)
Micorriza arbuscular y hongos solubilizadores	<i>Rhizogloumus fasciculatum</i> y <i>Mortierella</i> sp.	Aguacate ( <i>Persea americana</i> Mill. cv. 'Hass')	(Tamayo-Vélez y Osorio, 2016)

Fuente: elaboración propia.

En la base de datos del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) para marzo del 2017, se encontraron un total de 173 empresas de bioinsumos en Colombia (figura 1). En su mayoría, se trata de empresas importadoras de este tipo de productos (54%). Los bioinsumos que más se comercializan son aquellos utilizados para control biológico. Aproximadamente el 13% del total se dedican específicamente a la producción de bioinsumos producidos

localmente con microorganismos usados como biofertilizantes. Cabe destacar el 46% correspondiente a las empresas que le han apostado a generar productos biotecnológicos en el país. En esta apuesta sobresale el ICA por un gran portafolio de bioinsumos fabricados a partir de microorganismos, así como otras compañías y fundaciones que generan estos importantes insumos para el agro colombiano.

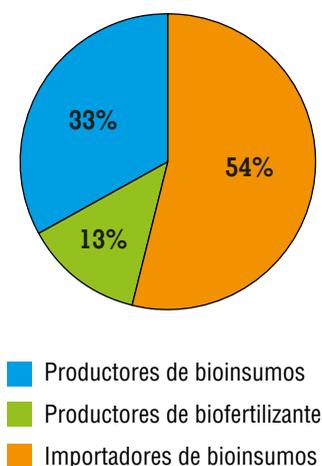


Figura 1. Empresas registradas en el ICA para la distribución de bioinsumos y fertilizantes en Colombia. Fuente: elaboración propia con base en información del ICA (2017).

## 6. Conclusión

Existe una gran cantidad de microorganismos que tienen el potencial de ser usados como biofertilizantes; sin embargo, el reto está en que puedan ser bioinoculantes producidos adecuadamente para usarlos en la agricultura. Esto podría lograrse con un mayor control de los procesos de producción. Colombia tiene un gran potencial de desarrollo de nuevos biofertilizantes mediante bioprospección de microorganismos endógenos. Es importante sumar un mayor esfuerzo para incentivar la investigación en este campo de la biotecnología, con el fin de desarrollar prácticas de agricultura más sustentables.

## Referencias

- Ahmad, F., Uddin, S., Ahmad, N. e Islam, R. (2013). Phosphorus-microbes interaction on growth: yield and phosphorus-use efficiency of irrigated cotton. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59 (3), 341-351.
- Arora, N. K., Khare, E. y Maheshwari, D. K. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: constraints in bioformulation, commercialization, and future strategies. En D. K. Maheshwari (ed.), *Plant growth and health promoting bacteria* (pp. 97-116). Microbiology Monographs, 18. Berlín: Springer.

- Barragán-Ocaña, A. y Valle-Rivera, M. (2016). Rural development and environmental protection through the use of biofertilizers in agriculture: An alternative for underdeveloped countries? *Technology in Society*, 46, 90-99.
- Bashan, Y. (1998). Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. *Biotechnology Advances*, 16 (4), 729-770.
- Beltrán Pineda, M. E. (2014). Hongos solubilizadores de fosfato en suelo de páramo cultivado con papa (*Solanum tuberosum*). *Ciencia en Desarrollo*, 5 (2), 145-154.
- Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., y Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial Cell Factories*, 13 (1), 66.
- Bhattacharjee, R. y Dey, U. (2014). Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review. *African Journal of Microbiology Research*, 8 (24), 2332-2343.
- Bhattacharyya, P. N. y Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350.
- Borda, D. y Pardo, J. M. (2008). Determinación de la influencia de materia orgánica y *Azotobacter* spp en un cultivo de Stevia rebaudiana. Disertación en Microbiología, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Braz, R. R. y Nahas, E. (2012). Synergistic action of both *Aspergillus niger* and *Burkholderia cepacea* in co-culture increases phosphate solubilization in growth medium. *FEMS Microbiology Letters*, 332 (1), 84-90.
- Cárdenas, D. M., Garrido, M. F., Bonilla, R. R. y Baldani, V. L. (2010). Aislamiento e identificación de cepas de *Azospirillum* sp. en pasto guinea (*Panicum maximum* Jacq.) del Valle del Cesar. *Pastos y Forrajes*, 33 (3), 1.
- Carvajal-Muñoz, J. S. y Carmona-García, C. E. (2012). Benefits and limitations of biofertilization in agricultural practices. *Livestock Research for Rural Development*, 24 (3).
- Ceballos, I., Ruiz, M., Fernández, C., Peña, R., Rodríguez, A. y Sanders, I. R. (2013). The in vitro mass-produced model mycorrhizal fungus, *Rhizophagus irregularis*, significantly increases yields of the globally important food security crop cassava. *PLoS ONE*, 8 (8).
- Deaker, R., Kecskés, M. L., Rose, M. T., Amprayn, K., Krishnen, G., Kim Cuc, T. T., Nga, V. T., ... y Kennedy, I. R. (2011). *Practical methods for the quality control of inoculant biofertilisers*. ACIAR Monograph 147. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research.
- Galindo, T., Polania, J., Sánchez, J., Moreno, N., Vanegas, J. y Holguín, G. (2006). Efecto de inoculantes biológicos en el crecimiento de manglar y *Citrullus vulgaris*. *Acta Biológica Colombiana*, 11, 83-97.
- Gámez, R. M., Rodríguez, F., Bernal, J. F., Agarwala, R., Landsman, D. y Mariño-Ramírez, L. (2015). Genome sequence of the banana plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus amyloliquefaciens* BS006. *Genome Announcements*, 3 (6).
- Gámez, R. M., Rodríguez, F., Ramírez, S., Gómez, Y., Agarwala, R., Landsman, D. y Mariño-Ramírez, L. (2016). Genome sequence of the banana plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas fluorescens* PS006. *Genome Announcements*, 4 (3).

- Herridge, D. F. (2008). Inoculation technology for legumes. En M. J. Dilworth et ál. (eds.), *Nitrogen-fixing leguminous symbioses* (pp. 77-115). Dordrecht: Springer.
- Herrmann, L., Atieno, M., Brau, L. y Lesueur, D. (2013). Microbial quality of commercial inoculants to increase BNF and nutrient use efficiency. En F. J. de Bruijn (ed.), *Molecular microbial ecology of the rhizosphere*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Posada, R. H., Sánchez de Prager, M., Sieverding, E., Aguilar Dorantes, K. y Heredia Abarca, G. (2012). Relaciones entre los hongos filamentosos y solubilizadores de fosfatos con algunas variables edáficas y el manejo de cafetales. *Revista de Biología Tropical*, 60 (3), 1075-1096.
- Hungria, M., Loureiro, M. F., Mendes, I. C., Campo, R. J. y Graham, P. (2005). Inoculant preparation, production and application. En D. Werner y W. E. Newton (eds.), *Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology, and the environment* (pp.223-253). Dordrecht: Kluwer.
- ICA. (2017). Empresas bioinsumos junio 2017 (documento publicado en línea). Consultado en [goo.gl/6nmn5t](http://goo.gl/6nmn5t).
- Ismail, E. G., Walid, W. M., Salah, K. y Fadia E. S. (2014). Effect of manure and biofertilizers on growth, yield, silymarin content, and protein expression profile of *Silybum marianum*. *Advance in Agriculture and Biology*, 2 (1), 36-44.
- Jiménez, D. J., Montaña, J. S. y Martínez, M. M. (2011). Characterization of free nitrogen fixing bacteria of the genus *Azotobacter* in organic vegetable-grown Colombian soils. *Brazilian Journal of Microbiology*, 42 (3), 846-858.
- Jones, D. y Oburger, E. (2011). Solubilization of phosphorus by soil microorganisms. En E. Bunemann, A. Oberson y E. Frossard (eds.), *Phosphorus in action* (pp.169-198). Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling, 26. Berlin: Springer.
- Kannaiyan, S. (2003). Inoculant production in developing countries-problems, potentials and success. En G. Hardarson y W. J. Broughton (eds.), *Maximising the use of biological nitrogen fixation in agriculture* (pp.187-198). Dordrecht: Kluwer.
- Khalid, A., Arshad, M., Shaharoon, B. y Mahmood, T. (2009). Plant growth promoting rhizobacteria and sustainable agriculture. En M. S. Khan, A. Zaidi y J. Musarrat (eds.), *Microbial strategies for crop improvement* (pp.133-160). Heidelberg: Springer.
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A. y Tribedi, P. (2016). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (4), 3315-3335 .
- Malusá, E., Sas-Paszt, L. y Ciesielska, J. (2012). Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *The Scientific World Journal*, 2012.
- Malusá, E., Pinzari, F. y Canfora, L. (2016). Efficacy of biofertilizers: challenges to improve crop production. En D. Singh, H. Singh y R. Prabha (eds.), *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity: functional applications*, vol. 2 (pp.17-40). Nueva Delhi: Springer India.
- Martínez, S. A. y Dussán, J. (2017). Lysinibacillus sphaericus plant growth promoter and lead phytoremediation enhancer with *Canavalia ensiformis*. Documento de grado, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Mishra, P. y Dash, D. (2014). Rejuvenation of biofertilizer for sustainable agriculture and economic development. *Consilience*:

- The Journal of Sustainable Development*, 11 (1), 41-61.
- Moreno Sarmiento, N., Moreno Rodríguez, L. y Uribe Vélez, D. (2007). Inoculantes para la agricultura en Colombia. En *Biofertilizantes en Iberoamerica: visión técnica, científica y empresarial* (pp. 38-45). Montevideo: Denad Internacional.
- Moreno Quevedo, Á. P., Osorio Vega, N. W. y González Murillo, O. A. (2015). In vitro dissolution of acidulated rock phosphate by phosphate solubilizing microorganisms. *Acta Biológica Colombiana*, 20 (2), 65-71.
- Pathak, D. V. y Kumar, M. (2016). Microbial inoculants as biofertilizers and biopesticides. En D. P. Singh et ál. (eds.), *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity* (pp. 197-209). Nueva Delhi: Springer India.
- Pereg, L. y McMillan, M. (2015). Scoping the potential uses of beneficial microorganisms for increasing productivity in cotton cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, 349-358.
- Pereira, S. I. y Castro, P. M. (2014). Phosphate-solubilizing rhizobacteria enhance Zea mays growth in agricultural P-deficient soils. *Ecological Engineering*, 73, 526-535
- Raghuwanshi, R. (2012). Opportunities and challenges to sustainable agriculture in India. *Nebio*, 3 (2), 78-86.
- Roesti, D., Gaur, R., Johri, B. N., Imfeld, G., Sharma, S., Kawaljeet, K. y Aragno, M. (2006). Plant growth stage: fertilizer management and bio-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria affect the rhizobacterial community structure in rain-fed wheat fields. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (5), 1111-1120.
- Rueda-Puente, E. O., Ortega-García, J., Barrón-Hoyos, J. M., López-Elías, J., Murillo-Amador, B., Hernández-Montiel, L. G. et ál. (2015). Los fertilizantes biológicos en la agricultura. *Invernus*, 10 (1), 10-17.
- Sahu, P. K. y Brahma Prakash, G. P. (2016). Formulations of biofertilizers—Approaches and advances. En D. Singh, H. Singh y R. Prabna (eds.), *Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity* (pp. 179-198). Nueva Delhi: Springer India.
- Santana, M. y Vásquez, C. (2002). Evaluación de cepas de *Azotobacter* spp. y de bacterias solubilizadoras de fosfato (BFS), como biofertilizante mixto en cultivo de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* var. Regal Suerte). Disertación en Microbiología, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Sharpley, A., Jarvie, H. P., Buda, A., May, L., Spears, B. y Kleinman, P. (2013). Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *Journal of Environmental Quality*, 42 (5), 1308-1326.
- Sheng, M., Lalande, R., Hamel, C. y Zia-di, N. (2013). Effect of long-term tillage and mineral phosphorus fertilization on arbuscular mycorrhizal fungi in a humid continental zone of Eastern Canada. *Plant and Soil*, 369 (1-2), 599-561.
- Silva, L., Bermúdez, A., Castiblanco, D., Almarío, F., Mojica, P., Cuéllar, S., ... y Tamayo, A. (2014). *Tecnologías relacionadas con biofertilizantes*. Bogotá: Banco de Patentes de Superintendencia de Industria y Comercio.
- Somers, E., Vanderleyden, J. y Srinivasan, M. (2004). Rhizosphere bacterial signalling: a love parade beneath our feet. *Critical Reviews Microbiology*, 30, 205-240.

- Sruthilaxmi, C. B. y Babu, S. (2017). Microbial bio-inoculants in Indian agriculture: Ecological perspectives for a more optimized use. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 242, 23-25.
- Tamayo-Velez, A. y Osorio, N. W. (2016). Co-inoculation with an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing fungus promotes the plant growth and phosphate uptake of avocado plantlets in a nursery. *Botany*, 95 (5), 539-545.
- Uribe, D., Sánchez Nieves, J. y Vanegas, J. (2010). Role of microbial biofertilizers in the development of a sustainable agriculture in the tropics. En *Soil biology and agriculture in the tropics* (pp.235-250). Berlín: Springer.
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255, 571-586.
- Xavier, I. J., Holloway, G. y Leggett, M. (2004). Development of rhizobial inoculant formulations. En *Proceedings of the great plains inoculant forum*. Saskatoon, Canadá: Plant Management Network.
- Zambrano Moreno, D. C., Avellaneda Franco, L., Zambrano, G. y Bonilla Buitrago, R. R. (2016). Scientometric analysis of Colombian research on bio-inoculants for agricultural production. *Universitas Scientiarum*, 21 (1), 63-81.