



Efecto del uso de biofertilizantes sobre la productividad agrícola: revisión sistemática

Effect of the use of biofertilizers on agricultural productivity: a systematic review

Daniela Jiménez Tobón, Julian Galo Molina, David Vahos Posada, Leonardo Ríos-Osorio^{*ID}

RESUMEN

Introducción: Los biofertilizantes son productos de origen natural, cuya composición principal son microorganismos que provienen de una matriz ambiental en particular, y que tienen la capacidad de solubilizar o metabolizar diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos, favoreciendo la disponibilidad y captación de nutrientes en el suelo por parte de las plantas. Este tipo de composiciones pueden vivir en simbiosis con una amplia variedad de especies de microorganismos y plantas, y resultan ser productos benéficos para el desarrollo de la agricultura sin representar riesgos significativos para los cultivos o la seguridad alimentaria. **Objetivo:** Describir el efecto de los biofertilizantes sobre la productividad de cultivos de interés agrícola, a partir de la literatura científica. **Materiales y Métodos:** Para efectuar el presente estudio, se realizó una búsqueda sistemática en dos bases de datos diferentes: una especializada, *ScienceDirect*, y una multidisciplinaria, *Scopus*; con el fin de asegurar la exhaustividad del estudio se complementó la búsqueda con literatura “gris” de la base de datos de *Google Scholar*. Es importante mencionar que como modelo de trabajo se utilizó la declaración PRISMA. **Resultados:** Para realizar este estudio se seleccionaron 62 artículos que cumplieron con los criterios de inclusión y de exclusión. Entre los años 2018, 2019 y 2020 se publicó el 56 % del total de artículos analizados; India y China, lideran el número de artículos publicados en la última década. El uso de cultivos puros y consorcios de una gran variedad de géneros de bacterias, hongos y microalgas han mostrado rendimientos favorables en diferentes cultivos; los microorganismos utilizan diferentes mecanismos de acción tales como la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato, producción de fitohormonas, sideróforos, quitinasas, glucanasas, antibióticos, cianuro de hidrógeno y amoníaco. Varios cultivos como cereales, leguminosas, hortalizas, frutas y plantas medicinales fueron inoculados con biofertilizantes y los efectos positivos de estos sobre la productividad se midieron con distintas variables debido a la biodiversidad de cultivos y microorganismos usados. **Conclusiones:** El aumento en la productividad de los cultivos hace de los biofertilizantes una alternativa prometedora para sustituir el uso de fertilizantes químicos en la agroindustria. **Palabras clave:** biofertilizantes; consorcio microbiano; productividad agrícola.

*Docente Escuela de Microbiología, Universidad de Antioquia, Grupo de Investigación en Salud y Sostenibilidad, Grupo de Investigación en Microbiología Veterinaria. Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia

Recepción: 14/03/2023. Aceptación: 6/05/2023

Cómo citar este artículo: Jiménez Tobón D., Galo Molina J., Vahos Posada D., Ríos-Osorio L. Efecto del uso de biofertilizantes sobre la productividad agrícola: revisión sistemática. *Hechos Microbiol.* 2022;13(2). DOI: 10.17533/udea.hm.v13n2a05

ABSTRACT

Introduction: Biofertilizers are products of natural origin, whose main composition are microorganisms that come from a particular environmental matrix, and that have the capacity to solubilize or metabolize different organic and inorganic compounds, favoring the availability and uptake of nutrients in the soil by the plants. These types of compositions can live in symbiosis with a wide variety of species of microorganisms and plants and turn out to be beneficial products for the development of agriculture without representing significant risks for crops or food security.

Aim: To describe the effect of biofertilizers on the productivity of crops of agricultural interest, based on the scientific literature. **Materials and Methods:** To carry out this study, a systematic search was done in two different databases: a specialized one, *Science-Direct*, and a multidisciplinary one, *Scopus*; To ensure the exhaustiveness of the study, the search was complemented with “gray” literature from the “Google Scholar” database. It is important to mention that the PRISMA declaration was used as a working model.

Results: To carry out this study, 62 articles that met the inclusion and exclusion criteria were selected. Between the years 2018, 2019 and 2020, 56% of the total articles analyzed were published; with India and China leading the number of articles published in the last decade. The use of pure cultures and consortia of a wide variety of genera of bacteria, fungi, and microalgae have shown to be favorable in different cultures. Microorganisms use different mechanisms of action such as nitrogen fixation, phosphate solubilization, production of phytohormones, siderophores, chitinases, glucanases, antibiotics, hydrogen cyanide, and ammonia. Several crops such as cereals, legumes, vegetables, fruits and medicinal plants were inoculated with biofertilizers and the positive effects of these on productivity were measured with several variables due to the biodiversity of crops and microorganisms used.

Conclusions: The increase in productivity makes biofertilizers a promising alternative to substitute the use of chemical fertilizers in agroindustry.

Keywords: biofertilizer; microbial consortium; agricultural productivity.

Introducción

La fertilización agrícola se define como el proceso que le se suministra a las plantas los requerimientos nutricionales necesarios para su crecimiento y desarrollo, buscando reducir las deficiencias de micronutrientes y aumentar su productividad. (1) Los fertilizantes pueden ser químicos, a base de compuestos como urea, superfosfato, potasa, metales pesados y otros compuestos de origen mineral, y orgánicos, que pueden ser de procedencia vegetal, animal o mixta como por ejemplo el estiércol, abono verde, biochar, vermicompost, enmiendas orgánicas, entre otros. Por último, los fertilizantes también pueden ser netamente inorgánicos, entre ellos se encuentra la roca fosfórica.(2–4)

Aunque los fertilizantes químicos han contribuido en gran medida a la productividad agrícola mundial, se han evidenciado efectos negativos en el medio ambiente, que llevan a que el uso de estos compuestos sea limitante. Su uso excesivo genera a largo plazo el deterioro en los sistemas agrícolas, y da lugar a diversos problemas de contaminación, tales como eutrofización, lluvia ácida, calentamiento global, contaminación de aguas subterráneas superficiales por lixiviación, y acumulación de nitratos en frutos y verduras comestibles que pueden llegar a concentraciones nocivas para el ser humano. (5) Por otro lado, el costo elevado para la obtención y aplicación de los fertilizantes es un factor a tener en cuenta ya que puede generar pérdidas económicas para los agricultores. (6) Por estas razones, durante la última década se ha incrementado el uso de biofertilizantes como una alternativa para reducir el uso de fertilizantes químicos.

Los biofertilizantes son preparados a base de microorganismos provenientes de una matriz ambiental. Estos tienen la capacidad de metabolizar compuestos orgánicos e inorgánicos como nitrógeno, fósforo y potasio favoreciendo la disponibilidad de nutrientes en el suelo para una fácil asimilación por parte de las plantas; adicionalmente, algunos poseen mecanismos de protección que disminuyen los efectos negativos de fitopatógenos. (7) A su vez, los microorganismos que componen los biofertilizantes pueden formar consorcios que favorecen diferentes rendimientos del cultivo y se evidencian en el aumento de la altura, brotes, frutos, longitud de las raíces y peso seco de la planta, y un mayor contenido de antioxidantes, azúcares,

proteínas, lípidos, almidones. (8,9) Además existe también un aumento de la productividad agrícola, parámetro que se evalúa cuantificando la cantidad de biomasa vegetal con valor en el mercado, como por ejemplo, número de frutos, tamaño de frutos, número de vainas/espigas en leguminosas y cereales, entre otras variables que dependen del tipo de cultivo. (10)

Géneros de microorganismos como *Staphylococcus* spp., *Paenibacillus* spp., *Stenotrophomonas* spp., *Sphingobacterium* spp., *Lysinibacillus* spp., *Advenella* spp., *Enterobacter* spp., *Variovorax* spp., *Plantibacter* spp. y *Trichoderma* spp. han demostrado su potencial biofertilizante en cultivos de trigo; en garbanzo se han descrito aislados de *Pantoea dispersa* y géneros de hongos micorrízicos arbusculares como *Funneliformis mosseae* y *Rhizophagus irregularis*. Géneros como *Saccharomyces* spp., *Cellulomonas* spp., *Glomus* spp., y *Gigaspora* spp. se han evaluado en cultivos de frijol; en el caso de la fresa, microorganismos como *Azotobacter* spp., *Derxia* spp., *Bacillus* spp., y *Klebsiella* spp. se han utilizado como promotores de crecimiento (11–18). *Arthrobacter scleromae* es un microorganismo que ha sido evaluado en cultivos de lechuga donde se ha reportado aumento de hasta 45 % en el número de hojas de lechuga y su tamaño. (19)

La aplicación de microorganismos con potencial de biofertilizantes sugiere una alternativa con alto potencial en términos de productividad agrícola, lo que hace una alternativa viable y muy atractiva para los agricultores que deseen promover el mejoramiento de sus cultivos; por esta razón, el objetivo principal de esta revisión sistemática fue describir el efecto de los biofertilizantes sobre la productividad de cultivos de interés agrícola, a partir de literatura científica de los últimos 11 años.

Materiales y métodos

Estrategia de búsqueda. El estudio se llevó a cabo siguiendo la declaración Prisma, modelo de trabajo que propone una metodología para revisiones sistemáticas. (20) Se realizó una búsqueda en dos bases de datos: una especializada (*Sciencedirect*) y una multidisciplinaria (*Scopus*) basada en tres criterios: (a) sensibilidad, utilizando descriptores DeCS y AGROVOC, (b) especificidad, mediante el uso de operadores booleanos,

y (c) exhaustividad, por medio de la literatura gris encontrada en *Google Scholar*.

La búsqueda de la literatura científica se llevó a cabo utilizando la siguiente ruta: **biofertilizer AND (efficiency OR “agricultural productivity” OR productivity)**. La búsqueda se limitó entre los años “2009-2020” con el fin de abarcar la literatura publicada entre estas fechas. Las rutas específicas para cada base de datos fueron las siguientes:

Sciencedirect. (“biofertilizer”) AND (“efficiency” OR “agricultural productivity” OR “productivity”).

Scopus. (“biofertilizer”) AND (“efficiency” OR “agricultural productivity” OR “productivity”).

Las referencias encontradas se registraron en una base de datos de Microsoft Office Excel, junto con el respectivo país de publicación, año, revista científica y resumen. Los artículos duplicados y revisiones sistemáticas fueron eliminados de la búsqueda.

Criterios de inclusión y exclusión. Se incluyeron únicamente artículos originales en inglés de la literatura científica de los últimos 11 años, que mencionaran el tipo de cultivo objeto de la biofertilización, los grupos microbianos que componen el biofertilizante, y cuál fue el efecto del biofertilizante sobre la productividad agrícola. Se excluyeron los artículos que en sus estudios emplearon cepas ATCC, y aquellos en donde se mezclara el biofertilizante con otro tipo de fertilizante químico, orgánico o inorgánico. La información obtenida de cada publicación fue tabulada para un análisis posterior.

Reproducibilidad. En este estudio, los criterios de inclusión y exclusión fueron aplicados de forma independiente por los investigadores que hacen parte del estudio, y las discrepancias presentadas en el proceso se resolvieron con la intervención de un tercer experto en la temática del estudio.

Resultados y Discusión

Después de seguir y aplicar cada paso de la metodología PRISMA, se obtuvo un total de 1,014 artículos de investigación. De estos, 45 artículos duplicados fueron descartados de la búsqueda utilizando la base de datos de Microsoft Excel, posteriormente se revisaron las 969 publicaciones restantes teniendo en cuenta el título y resumen de cada estudio; 736 artículos fueron

eliminados debido a que no cumplían con los criterios de inclusión propuestos; de estos, 324 artículos fueron descartados debido a que estos no mencionan el tipo de cultivo objeto de la biofertilización.

Adicionalmente 188 artículos se eliminaron del estudio porque no describen los grupos microbianos que componían el biofertilizante y finalmente 224 estudios se descartaron por no explicar el efecto del biofertilizante evaluado sobre la productividad agrícola. Producto de este proceso de selección fueron

incluidos 233 artículos. A estos artículos se aplicaron los criterios de exclusión, siendo descartados por su cumplimiento un total de 174 artículos. Finalmente, se seleccionaron 59 artículos para llevar a cabo la revisión sistemática. (Figura 1)

A esta selección de artículos se le adicionó por exhaustividad tres estudios más extraídos de la literatura gris en Google Scholar para un total de 62 artículos, aplicando los mismos criterios de inclusión y exclusión.

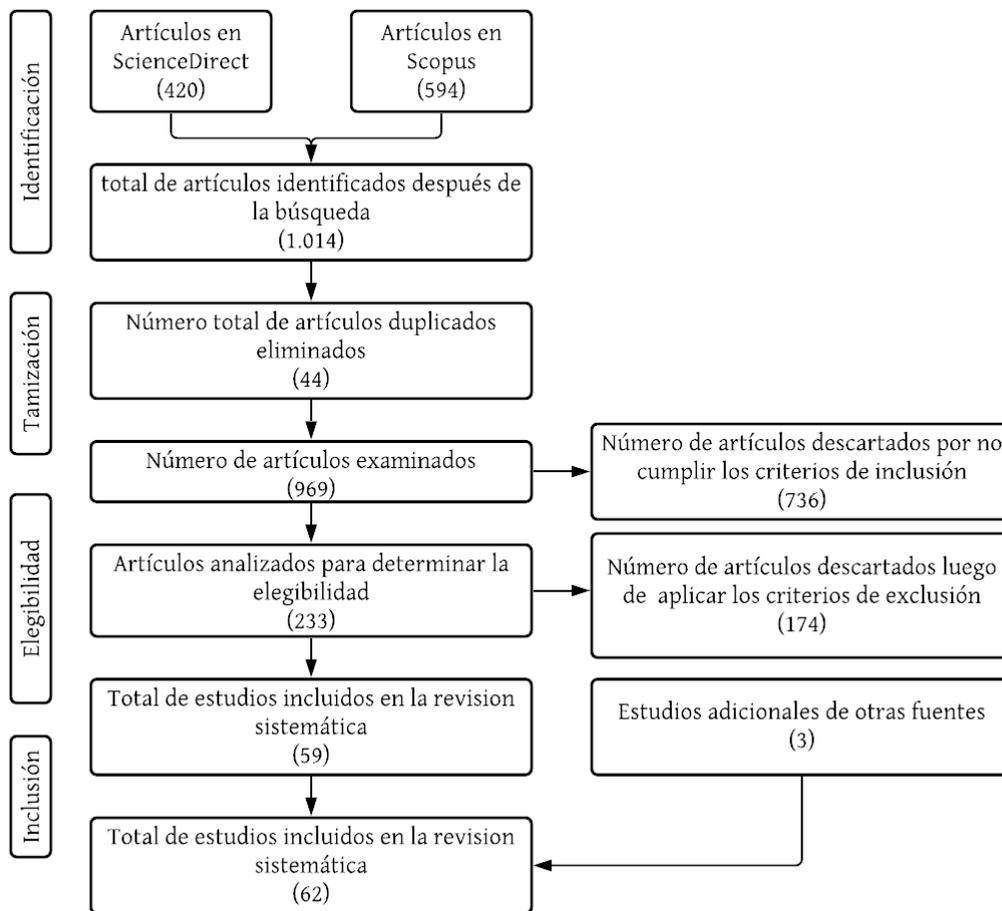


Figura 1. Flujograma de la estrategia de búsqueda

Fuente: elaboración propia

En los últimos años ha incrementado el interés por el estudio de microorganismos con potencial biofertilizante que ayuden disminuir el uso excesivo de fertilizantes químicos en los cultivos. Entre los años 2018, 2019 y 2020 se publicó el 56 % del total de artículos analizados, y solo en el 2020 se publicó el 35 % del total de artículos que explican el efecto de los biofertilizantes sobre la productividad de los cultivos, lo que indica que existe una intención creciente de optimizar el rendimiento con el uso de alternativas sostenibles que ayuden a conservar el medio ambiente (Figura 2).

Una de las principales razones para querer ampliar el conocimiento sobre este tema es la gran demanda de alimentos que existe a nivel mundial, donde en algunos países esta excede la capacidad de producción, lo que lleva a buscar soluciones para mitigar los diferentes problemas que puedan presentarse por deficiencia de nutrientes, presencia de fitopatógenos o empleo excesivo de fertilizantes químicos que afectan severamente la calidad de los suelos. (21)

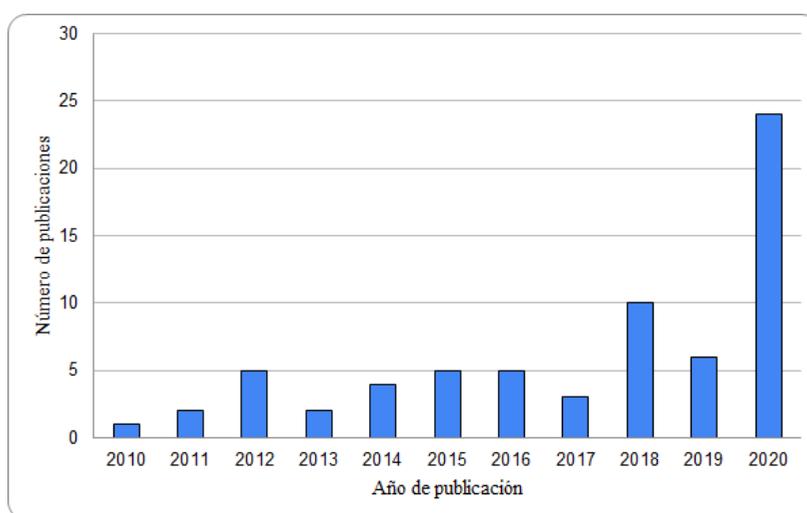


Figura 2. Número de publicaciones sobre el tema por año (2010-2020)

Fuente: Elaboración propia.

Las revistas que reportan mayores investigaciones con respecto al uso de biofertilizantes con efecto sobre la productividad agrícola son: *Applied Soil Ecology* con 5 estudios, *Rhizosphere* con 4 artículos, y *Scientia Horticulturae* y *World Applied Science Journal* con 3 estudios cada una, en las demás revistas se encontraron 2 o menos estudios al respecto. En total se encontraron 49 revistas diferentes que incluyen en sus bases de datos estudios sobre el beneficio que trae el uso de biofertilizantes sobre la productividad agrícola, lo que indica un aumento en el interés por la investigación y divulgación de esta temática.

Los países donde se encontraron mayor número de estudios de campo con aplicación de biofertilizantes con efecto en la productividad agrícola fueron India con 22 estudios, seguido de China e Irán con 5 estudios cada uno, y Egipto con 4 estudios (Fig. 3). Cabe resaltar que China con 1.402 millones de habitantes e India con 1.380 millones de habitantes son los países con los más altos índices de sobrepoblación en el planeta y en conjunto albergan al 36 % de la población mundial (21). Adicionalmente, estos dos países son significativamente los mayores productores de fertilizantes químicos en el continente asiático, el

cual produjo a nivel mundial el 60,1 % y el 59,1 % de compuestos nitrogenados y fosfatados, respectivamente, en la última década; (22) por lo que estos países deben aprovechar al máximo sus suelos y recursos naturales para suplir las necesidades nutricionales de sus habitantes.

Aunque no sólo es relevante el estudio de fertilizantes por razones productivas, también se justifica por los desastres ocurridos en su misma producción. La industria de fertilizantes de origen químico resulta ser peligrosa por la cantidad de compuestos tóxicos e inflamables que se manipulan en las plantas de producción. En 1984, en la ciudad de Bhopal, India, un incidente en la planta de producción de pesticidas de la *Union Carbide* causó el envenenamiento de más de 500.000 personas con isocianato de metilo, un gas producto de la reacción de metilamina anhidra y el gas fosgeno, y base para la producción de *SEVIN* (insecticida). (23)

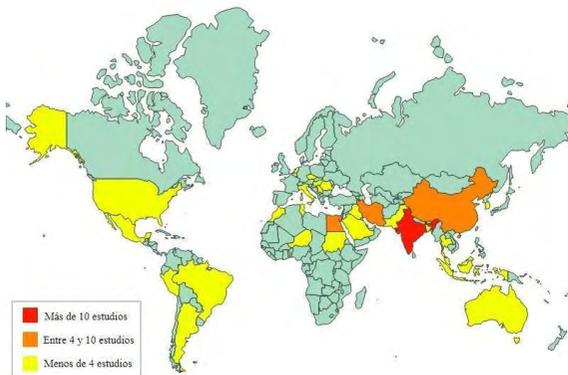


Figura 3. País de origen de las publicaciones encontradas en la revisión sistemática

Fuente: Elaboración propia

Géneros microbianos utilizados como biofertilizantes

Los biofertilizantes incluyen una gran variedad de géneros de bacterias, hongos y microalgas, ampliamente distribuidos en el suelo, lo que favorece la disponibilidad de estos para ser utilizados. Estudios previos han implementado el uso de cultivos puros y consor-

cios microbianos de géneros tales como: *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Azotobacter* spp., *Azospirillum* spp., que han demostrado rendimientos favorables en diferentes cultivos, y todos ellos utilizan mecanismos de acción diferentes para lograr un efecto sobre la productividad. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) pueden aumentar la tasa de crecimiento y productividad de las plantas por medio de diferentes mecanismos de acción que favorecen tanto directa como indirectamente al cultivo. (24)

En esta revisión se encontró que un 30 % de los estudios evaluados utilizan el género de bacterias gram positivas *Bacillus* spp., formadoras de esporas como biofertilizantes, para aumentar la productividad de sus cultivos gracias a su capacidad de secretar fitohormonas tales como auxinas, giberelinas, citoquinas y proteínas que actúan como promotores de crecimiento vegetal y a su vez como control de diferentes enfermedades causadas por fitopatógenos. Utilizan la solubilización de fósforo y la producción de ácido indolacético (AIA) como reguladores de crecimiento; además, este género en consorcio ayuda directamente a la planta por medio de la fijación de nitrógeno. (25)

Pseudomonas spp. es un género de bacterias gram negativo, se puede encontrar ampliamente en suelos húmedos, aguas residuales, vegetación, humanos y animales; (26) tiene la capacidad de producir reguladores de crecimiento vegetal, favoreciendo el proceso de germinación y el rendimiento general de la planta incluyendo su productividad. (27,28) Este género puede ayudar a los cultivos mediante la generación de sideróforos que aumentan la disponibilidad de hierro en el suelo, y del control de patógenos mediante la actividad desaminasa de 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC). *Pseudomonas* spp., en cultivos de maíz, ha favorecido variables de productividad como el número de mazorcas/planta en un 24,6 %, rendimiento del contenido de humedad de la semilla y peso de 1000 semillas. (27) Consorcios formados por este género y otros como *Bacillus*, *Staphylococcus*, *Paenibacillus*, *Stenotrophomonas*, *Sphingobacterium*, *Lysinibacillus*, *Advenella*, *Enterobacter*, *Variovorax* y *Plantibacter* mejoran las condiciones de cultivos de trigo por medio de la solubilización de fósforo y, en consecuencia aumentan el rendimiento del grano en un 58 % y 42 % en diferentes tipos de cultivo de trigo. (8,29) En un estudio realizado por Kumar et al. (2020), se analizó el efecto

del uso de consorcios de *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Azotobacter*, movilizadores de potasio y hongos micorrízicos arbusculares (HMA) con efectos benéficos sobre la producción de fresa y los rasgos de calidad de la fruta en condiciones de campo. (81)

Aislados de *Azospirillum* spp. y *Azotobacter* spp. también tienen la capacidad de fijar nitrógeno, solubilizar fósforo, producir fitohormonas, además de tolerar diferentes condiciones como el pH, la temperatura y la salinidad que favorecen su adaptación y resistencia a condiciones de estrés. Consorcios conformados por ambos géneros han sido favorables para la salud y rendimiento de los cultivos, y pueden establecer interacciones simbióticas beneficiosas con una gran cantidad de hongos y levaduras. (30)

Géneros poco comunes en el área agrícola como *Oceanobacillus* spp., *Plantibacter* spp., *Flavobacterium* spp. han funcionado como biofertilizantes. (31,32) Una investigación realizada por Riahi et al. informó sobre el efecto biofertilizante de *Oceanobacillus* spp. favoreciendo el crecimiento, la biomasa de hojas y raíces, los pigmentos fotosintéticos y la síntesis de aceites esenciales en cultivos de *Pelargonium graveolens*. (33) Panwar et al. Sugieren, por primera vez en 2016, que la cepa *Pantoea dispersa* PSB3 nativa puede usarse para aliviar los efectos negativos del estrés salino en las plantas de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) y tiene el potencial de usarse como biofertilizante, ya que sus resultados mostraron un aumento en la productividad del grano. (12)

Mecanismos de acción de las bacterias como biofertilizantes

Los biofertilizantes representan una parte importante en la agricultura sostenible, ya que ayudan a mejorar notablemente la fertilidad y los rendimientos de los cultivos a los que se les ha aplicado algún tratamiento. Para conseguir tales niveles de productividad, los microorganismos utilizan una variedad de mecanismos de acción directos como la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato, producción de fitohormonas; e indirectos como la producción de sideróforos, producción de quitinasas y glucanasas, producción de antibióticos, producción de cianuro de hidrógeno y amoníaco (Tabla 1). Adicionalmente, ayudan a mejorar el estrés ocasionado por altos niveles de CO₂ presentes

en el suelo, previenen el crecimiento de microorganismos patógenos y el aumento de la disponibilidad de fosfato soluble en el suelo a través de la excreción de ácidos orgánicos, entre otros. (24,34)

Un estudio llevado a cabo por Kantachote et al. demostró que aislados de *Rhodospseudomonas palustris*, además de tener la capacidad de fijar nitrógeno y reducir las emisiones de metano (CH₄) entre 56 y 70 días después de la siembra, producen grandes cantidades de ácido 5-aminolevulínico (ALA), lo que confiere al arroz una alta resistencia a la salinidad (NaCl). (35)

En el estudio realizado por Hong & Lee, se utilizó un aislado de *Arthrobacter scleromae* en el que además de producir ácido indolacético (AIA) que interviene en procesos de elongación y división celular, también tiene actividad 1-aminociclopropano-1-carboxilato desaminasa, fundamental en la síntesis de etileno por parte de las plantas. (19)

Zhou et al. evaluaron el potencial antifúngico de aislados de cianobacterias promotoras de crecimiento vegetal y algunos mecanismos de acción que poseen estos microorganismos como, por ejemplo, la capacidad de producir sustancias bioactivas para inhibir el crecimiento de hongos como *Rhizoctonia solani*; generar fitohormonas como ácido salicílico, auxinas y citocinas, y ayudar a mejorar el contenido de potasio del suelo. Plantas inoculadas con *Nostoc piscinale* y *Anabaena variabilis* inhibieron el crecimiento micelial a los 10 días de inocular los microorganismos, llegando a reducir el crecimiento de *R. solani* en un 90 % por medio de extractos metanólicos. (36) Roberti et al. estudiaron un extracto acuoso de *Anabaena* spp. que indujo una respuesta de defensa sistémica y logró disminuir los síntomas ocasionados por el fitopatógeno *Podosphaera xanthii* en 25 % en hojas de calabacín. (37)

Otro mecanismo utilizado por algunos biofertilizantes es la producción de amoníaco, el cual ayuda a mejorar la disponibilidad de nitrógeno para la planta, que se puede considerar el elemento más esencial pues se combina biológicamente con C, H, O y S para formar varios aminoácidos. (38) Patel et al. encontraron que la especie *Streptomyces nanhaiensis* produjo 4,48 μmol/mL de amoníaco en agua de peptona en el día 11 de incubación, la cual posteriormente disminuye y se mantiene constante; además de encontrar también producción de compuestos indólicos y solubilización de minerales como fosfato, potasio y zinc. (39)

Tabla 1. Géneros de microorganismos biofertilizantes clasificados según el tipo de mecanismo de acción

Tipo	Mecanismo de acción	Microorganismo	Referencia
Directos	Fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato, producción de fitohormonas.	<i>Advenella</i> sp., <i>Anabaena variabilis</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Azospirillum</i> spp., <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> subsp. <i>plantarum</i> , <i>Bacillus coagulans</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus velezensis</i> , <i>Burkholderia</i> sp., <i>Burkholderia ubonensis</i> , <i>Chlorella</i> sp., <i>Enterobacter</i> sp., <i>Glomus</i> spp., <i>Herbaspirillum seropedicae</i> , <i>Lysinibacillus</i> spp., <i>Mesorhizobium</i> spp., <i>Metarhizium brunneum</i> , <i>Nostoc piscinale</i> , <i>Paenibacillus</i> spp., <i>Pantoea dispersa</i> , <i>Plantibacter flavus</i> , <i>Plantibacter</i> spp., <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Pseudomonas poae</i> , <i>Pseudomonas resinovorans</i> , <i>Rahnella aquatilis</i> , <i>Rhizobium leguminosarum</i> , <i>Rhodopseudomonas palustris</i> , <i>Scenedesmus</i> spp., <i>Serratia marcescens</i> , <i>Sinorhizobium fredii</i> , <i>Sinorhizobium meliloti</i> , <i>Sphingobacterium</i> sp., <i>Spirulina</i> spp., <i>Staphylococcus</i> spp., <i>Stenotrophomonas</i> sp., <i>Streptomyces nanhaiensis</i> , <i>Streptomyces</i> spp., <i>Synechocystis</i> spp., <i>Variovorax</i> spp.	(2,8,12–15,18,35,36,39–53)
Indirectos	Producción de sideróforos, quitinasas, glucanasas, antibióticos, cianuro de hidrógeno y amoniaco.	<i>Arthrobacter scleromae</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Bacillus velezensis</i> , <i>Burkholderia vietnamiensis</i> , <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Glomus mossae</i> , <i>Micrococcus yunnanensis</i> , <i>Pseudomonas resinovorans</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Streptomyces</i> spp., <i>Trichoderma asperellum</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> ; <i>Trichoderma</i> spp.	(19,42,43,53–58)

Cultivos objeto de la biofertilización y su efecto en la productividad

Desde la perspectiva económica, la productividad se posiciona como un pilar fundamental, ya que un incremento en la producción resulta en una mayor ganancia económica. A partir de este estudio se encontró que el uso de biofertilizantes ha tomado relevancia en la agricultura debido a que favorece el rendimiento en una gran variedad de cultivos de diferentes tipos como cereales, tubérculos, legumbres, vegetales, frutas, y plantaciones de cultivos de interés medicinal, demostrando su efectividad sobre la productividad agrícola. (Tabla 2) (11,44,46,55,59–61)

Según la definición de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la productividad agrícola se define como la relación entre el volumen de producción y el volumen de insumos utilizados. En resumen, la productividad representa la cantidad producida con relación a los recursos empleados. (62)

Los distintos artículos evaluados emplearon diversas formas para medir la productividad de los cultivos, esto se debió a la diversidad en los tipos de cultivos y biofertilizantes utilizados.

Según la Sociedad Argentina de Nutrición (SAN) los cereales son las semillas o granos de las plantas gramíneas, es decir, trigo, arroz, maíz, avena, cebada, centeno. Cada grano está compuesto por varias capas: el salvado, que contiene la mayor concentración de fibra; el endosperma, que contiene el almidón y mayor concentración de proteína del cereal; y el germen, en una proporción menor, pero concentra proteínas como la vitamina B1 y la vitamina E. (63)

Algunas de las investigaciones seleccionadas describieron el efecto de los biofertilizantes sobre la productividad de cuatro tipos de cereales: el maíz, de mayor producción a nivel mundial, al arroz que ocupa el segundo lugar, el trigo en el tercer lugar y otros menos estudiados como el mijo y el sorgo dulce. (64–67) El cereal más importante para este estudio fue el arroz, que concentra más de la mitad de su producción en China, India, Indonesia y Pakistán, y en menor proporción en otros países del medio oriente, (68) y los microorganismos que mostraron un efecto positivo sobre el crecimiento del cultivos de cereales fueron *Rhodopseudomonas palustris*, *Trichoderma* spp., *Pantoea ananatis*, *Piriformospora indica*, *Nostoc piscinale*, *Anabaena variabilis*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus subtilis*, y *Rhizobium leguminosarum*, entre otros. (42)

Para los cultivos de maíz, se describe un aumento en el rendimiento del grano y altura de la planta de hasta un 38,6 % y 8,2 % respectivamente. (29) De manera similar, en otro cereal como el arroz se incrementó el rendimiento del grano 79,2 %, aumentó el peso seco de la biomasa del cultivo de 13-22 %, el crecimiento de las raíces de 19-76 % y la altura de las plantas, con el uso de biofertilizantes. (69-71)

El trigo, otro de los cereales con mayor demanda a nivel mundial, y su biofertilización con géneros como *Pseudomonas* spp., *Azospirillum* spp., *Azotobacter* spp., *Bacillus* spp., *Burkholderia* spp., *Enterobacter* spp., *Rhizobium* spp., *Erwinia* spp. y *Flavobacterium* spp., aumentaron significativamente la altura de la planta, el peso fresco de los brotes y el peso seco de los brotes en 25, 45 y 86 %, respectivamente, mientras que el aumento en la longitud de la raíz, el peso fresco y seco de la raíz fue de 27, 102 y 76 %, respectivamente, también aumentó el rendimiento de grano en 59 %. (61)

Las leguminosas son las semillas comestibles secas que vienen en vainas como lentejas, habas, frijol, maní, garbanzo y soya, entre otros, siendo el frijol el más estudiado y con mayor demanda a nivel mundial. Este grupo de alimentos tiene gran importancia desde el punto de vista nutricional pues su contenido de proteínas complementa a la cantidad que encontramos en los cereales y, además aportan carbohidratos, vitamina B, antioxidantes y antiinflamatorios como los taninos, ácidos fenólicos y flavonoides. (72,73)

Cultivos de frijol tratados con dos cepas de rizobacterias en lugar de fertilizantes químicos aumentaron el rendimiento del grano en un 27,58 %; (11) y otros biofertilizantes fijadores de Nitrógeno o solubilizadores de Fosfato como *Azotobacter* spp., *Azospirillum* spp., *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Saccharomyces* spp., *Cellulomonas* spp., y las micorrizas mejoraron rasgos como la altura y el peso de la planta, el peso y largo de la raíz, número y peso de la vainas y peso de la semilla seca; (18,74) y en plantas de garbanzo inoculadas con *Pantoea dispersa* se demostró un aumento significativo en el número de vainas (31 % - 34,5 %), número de semillas (32 % - 35,7 %), peso de las vainas (30 % - 32,6 %) y peso de semillas (27 % - 35 %) por planta. (12) Otra leguminosa de alta demanda a nivel mundial por su alto contenido de proteína es la soya, que inoculada con *Bradyrhizobium* spp. se logró mejorar el rendimiento de grano en un 4,25 %, y en consorcio con *Pseudomonas aeruginosa* también se registró una mejora del rendimiento en un 3,47 %. (54)

Se denominan hortalizas al conjunto de plantas cultivadas con fines de alimentación, estas se clasifican según la parte comestible: de raíz comestible como la zanahoria y el rábano, de hojas comestibles como las espinacas, la lechuga, el apio y el cilantro, de tallos y bulbos comestibles como la cebolla y la papa, de coles y flores comestibles como el brócoli y la coliflor, y de frutos comestibles como el tomate, la calabaza, el chile y la berenjena. (62)

Estos alimentos hacen parte de la dieta cotidiana de gran parte de la población mundial y el uso de biofertilizantes también incrementó significativamente la productividad de sus cultivos. (43,45,46,75,76) Entre las hortalizas y vegetales en los que se ha evaluado el efecto de biofertilizantes podemos encontrar al tomate, quimbombó, calabaza, berenjena, rábano, coles y lechuga. En hortalizas productoras de frutos, el efecto de los biofertilizantes sobre la productividad se tradujo en el aumento de la altura de la planta, el largo y ancho de las hojas, el tamaño y el número de frutos en comparación con los controles y plantas no tratadas. (40,41,77)

En verduras herbáceas como las coles y lechugas se incrementó el número de hojas hasta un 45,1 %, la altura de las plantas en un 24,4 %, el peso fresco un 41,7 %, y el rendimiento en general en un 37,4 %. (19,78) Otro cultivo de gran interés agrícola por su gran consumo a nivel mundial es el chile (*Capsicum annum* L.), y entre los beneficios de usar bacterias PGPR como fertilizante se encuentran el incremento del número total y el peso de los frutos, altura de la planta, y peso fresco y seco de los brotes del cultivo. (47,79)

La *Artemisia annua* es una planta medicinal de gran importancia, las hojas secas de esta planta se emplean como materia prima para la extracción de artemisinina, un compuesto principal en la creación de medicinas antipalúdicas y antimaláricas. (80) El uso de biofertilizantes como *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Burkholderia* spp. y *Acinetobacter pittii* aumentó el rendimiento del contenido de artemisinina, en la planta, de manera muy significativa. (44)

Además de la gran variedad de cultivos y productos agrícolas mencionados anteriormente, las frutas también juegan un papel importante dentro de la alimentación humana y animal; uno de los cultivos principales objeto de biofertilización fue la fresa, que tratada con microorganismos como *Pseudomonas fluorescense*, *B. subtilis*, *Azotobacter chroococcum* y *Klebsiella planticola* mejoró significativamente el número y la calidad de los frutos, y el rendimiento acumulado. (17,81,82)

Tabla 2. Géneros de microorganismos clasificados según el tipo de cultivo evaluado

TIPO DE CULTIVO	CULTIVO EVALUADO	MICROORGANISMO
Cereales	Trigo (<i>Triticum durum</i> , <i>Fagopyrum esculentum</i> , <i>Triticum aestivum</i> L,	<i>Paenibacillus</i> spp., <i>Stenotrophomonas</i> spp., <i>Sphingobacterium</i> spp., <i>Lysinibacillus</i> spp., <i>Advenella</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp., <i>Variovorax</i> spp., <i>Plantibacter</i> spp., <i>Pseudomonas</i> spp. y <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Azospirillum bra-</i> <i>silense</i> , <i>Vesicular Arbuscular Mycorrhiza</i> (VAM), <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Pseudomonas</i> <i>striata</i> ,
	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	<i>Rhodopseudomonas palustris</i> , <i>Trichoderma</i> spp., <i>Pantoea ananatis</i> , <i>Piriformospora</i> <i>indica</i> , <i>Nostoc piscinale</i> , <i>Anabaena variabilis</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Rhizobium leguminosarum</i> , <i>S. hominis</i> , <i>B. vietnamiensis</i> , <i>M. yunnanensis</i> , <i>C. bitternis</i> , <i>B.</i> <i>ubonensis</i>
	Mijo cola de zorra (<i>Setaria</i> <i>italica</i>) / mijo africano (<i>Eleusine coracana</i>) / mijo perla (<i>Pennisetum glaucum</i>)	<i>Bacillus</i> spp., <i>Rhizobium</i> spp. / <i>Streptomyces nanhaiensis</i> . / <i>pseudomonas fluorescent</i>
	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	<i>Azospirillum</i> spp., <i>agreia pratensis</i> , <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Bacillus</i> spp., <i>Trichoderma harzia-</i> <i>num</i> , <i>Rhizobium</i> spp., <i>Mesorhizobium</i> spp., <i>Aspergillus flavus</i>
Leguminosas	Frijol rojo (<i>Phaseolus</i> <i>vulgaris</i>) / Frijol (<i>Canavalia</i> <i>ensiformis</i> L.) / Frijol negro (<i>Vigna mungo</i>) / Frijol caupí (<i>Vigna unguiculata</i> L.) / Frijol de racimo	<i>Pantoea agglomerans</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Bacillus circulans</i> , <i>Bacillus megatherium</i> / <i>Azotobacter</i> sp., <i>Azospirillum</i> sp., <i>Bacillus</i> spp., <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Saccharomyces</i> spp. y <i>Cellulomonas</i> spp. y propágulos micorrizas arbusculares de <i>Glomus</i> spp. y <i>Gigaspora</i> spp. / <i>Bacillus coagulans</i> .
	Garbanzo (<i>Cicer arietinum</i> L.), lenteja (<i>Lens culinaris</i>), guisantes (<i>Pisum sativum</i>)	<i>Funneliformis mosseae</i> , <i>Rhizophagus irregularis</i> , <i>Pantoea dispersa</i> , <i>Streptomyces</i> spp.
	Habas (<i>Vicia faba</i> L)	<i>Rhizobium leguminosarum</i>
Hortalizas	Lechuga	<i>Arthrobacter scleromae</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Bacillus velezensis</i> , <i>Acinetobacter</i> spp.
	Col china / Col rizada	<i>Arthrobacter scleromae</i> , <i>Trichoderma</i> spp., <i>Serratia marcescens</i> , <i>Pseudomonas poae</i> , <i>Plantibacter flavus</i> y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> subsp. <i>plantarum</i>
	Berro de jardín (<i>Lepidium</i> <i>sativum</i>)	<i>Azotobacter</i> spp.
	Quimbombó (<i>Abelmoschus</i> <i>esculentus</i>)	<i>Azotobacter</i> spp., <i>Aspergillus niger</i>
	Tomate (<i>Solanum lycoper-</i> <i>sicum</i>)	<i>Chlorella</i> spp., <i>Scenedesmus</i> spp., <i>Synechocystis</i> spp., <i>Spirulina</i> spp., <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Azospirillum brasilense</i>
	Chile (<i>Capsicum annum</i> L.)	<i>Bacillus</i> spp., <i>Streptomyces</i> spp., <i>pseudomonas aeruginosa</i>
Frutales	Papa	<i>Metarhizium brunneum</i>
	Fresa (<i>Fragaria × ananassa</i>)	<i>Pseudomonas florescence</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Klebsiella plantico-</i> <i>la</i> , <i>Dexia</i> spp.
	Palmera datilera (Phoenix <i>dactylifera</i> , L.)	<i>Azospirillum lipoferum</i> , <i>Paenibacillus polymyxa</i> , <i>Bacillus circulans</i>
Plantas medici- nales	Ajenjo dulce (<i>Artemisia</i> <i>annua</i>)	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Burkholderia</i> spp. y <i>Acinetobacter pittii</i>
	Té (<i>Camellia sinensis</i>)	<i>Azospirillum</i> sp., <i>Trichoderma asperellum</i>
	Porongo (<i>Lagenaria</i> <i>siceraria</i>)	<i>Azotobacter</i> sp., <i>Aspergillus niger</i>

Conclusiones

El uso de microorganismos como objeto de estudio ha tenido un aumento en la última década debido a la creciente demanda de alimentos a nivel mundial, en especial en países con un alto índice de sobrepoblación como India y China, siendo el rendimiento un factor determinante para la implementación de cultivos con una productividad que logre suplir esta demanda y se eviten problemas de producción como deficiencia de nutrientes, presencia de fitopatógenos o suelos afectados por el uso excesivo de fertilizantes químicos que afecten la calidad de los suelos y cultivos.

Una gran cantidad de géneros microbianos han sido estudiados como biofertilizantes, entre los cuales hay bacterias, hongos y microalgas, los cuales emplean múltiples mecanismos de acción directos o indirectos para aumentar el crecimiento y la productividad de las plantas. Se encontró que la gran mayoría de géneros aumentaron de manera eficiente el rendimiento en diferentes tipos de cultivos, lo que hace que el uso de biofertilizantes sea una alternativa bastante útil en la industria agrícola debido a su versatilidad.

Esta revisión sistemática sugiere que el uso de biofertilizantes es una estrategia prometedora para los agricultores que busquen una alternativa al uso de fertilizantes químicos patentados y un aumento en el rendimiento de sus cultivos ya que, debido a su capacidad biológica de producir metabolitos y compuestos que promueven el crecimiento vegetal, sirven de control de patógenos, pueden solubilizar y fijar nutrientes, producir reguladores del crecimiento vegetal, reducir diversos factores de estrés abiótico y hasta servir como controlador biológico mientras generan un aumento en el rendimiento de diferentes tipos de cultivos, incluso de interés medicinal, demostrando así su aplicabilidad diversa sobre la productividad agrícola.

Entre las limitaciones de este estudio se encuentran principalmente la heterogeneidad en las formas de medir las variables de exposición y de respuesta, esto debido a la diversidad tanto de los cultivos como de los microorganismos usados como biofertilizantes, condiciones ambientales y características de los suelos.

Referencias

- Bu WS, Wang FC, Zhang CC, Bruelheide H, Fang XM, Wang HM, et al.** The contrasting effects of nitrogen and phosphorus fertilizations on the growth of *Cunninghamia lanceolata* depend on the season in subtropical China. *For Ecol Manage.* 2021;482(118874):118874.
- Yadav GS, Lal R, Meena RS, Babu S, Das A, Bhowmik SN, et al.** Conservation tillage and nutrient management effects on productivity and soil carbon sequestration under double cropping of rice in north eastern region of India. *Ecol Indic.* 2019;105:303–15.
- Tripti, Kumar A, Usmani Z, Kumar V, Anshumali.** Biochar and flyash inoculated with plant growth promoting rhizobacteria act as potential biofertilizer for luxuriant growth and yield of tomato plant. *J Environ Manage.* 2017;190:20–7.
- Rini J, Deepthi MP, Saminathan K, Narendhirakanan RT, Karmegam N, Kathireswari P.** Nutrient recovery and vermicompost production from livestock solid wastes with epigeic earthworms. *Bioresour Technol.* 2020;313:123690.
- Kochakinezhad H, Peyvast GA, Kashi AK, Olfati JA, Asadi A.** A Comparison of Organic and Chemical Fertilizers for Tomato Production. *Journal of Organic Systems.* 2012;2:14–25.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE).** Sistema de información de precios. Insumos agrícolas. [Internet]. 2021 [citado el 10 de octubre de 2022]. Disponible en: <http://www.dane.gov.co>
- Armenta-Bojórquez AD, García-Gutiérrez C, Camacho-Báez JR, Apodaca-Sánchez MA, Gerardo-Montoya L, Nava-Pérez E.** Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai.* 2010;6:51–6.
- Emami S, Alikhani HA, Pourbabae AA, Etesami H, Motasharezadeh B, Sarmadian F.** Consortium of endophyte and rhizosphere phosphate solubilizing bacteria improves phosphorous use efficiency in wheat cultivars in phosphorus deficient soils. *Rhizosphere.* 2020;14:100196.
- Bona E, Cantamessa S, Massa N, Manassero P, Marsano F, Copetta A, et al.** Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting pseudomonads improve yield, quality and nutritional value of tomato: a field study. *Mycorrhiza.* 2017;27:1–11.
- Soroa-Bell M, Hernández-Fernández A, Soto-Carreño F, Terry-Alfonso E.** Identificación de algunas especies de microorganismos benéficos en la rizosfera de gerbera y su efecto en la productividad. *Rev Chapingo Ser Hortic.* 2009;15:41–8.
- Stefan M, Munteanu N, Stoleru V, Mihasan M, Hritcu L.** Seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria enhances photosynthesis and yield of runner bean (*Phaseolus coccineus* L.). *Sci Hortic.* 2013;151:22–9.

12. **Panwar M, Tewari R, Gulati A, Nayyar H.** Indigenous salt-tolerant rhizobacterium *Pantoea dispersa* (PSB3) reduces sodium uptake and mitigates the effects of salt stress on growth and yield of chickpea. *Acta Physiol Plant.* 2016;38:278.
13. **Neiverth A, Delai S, Garcia DM, Saatkamp K, de Souza EM, Pedrosa F de O, et al.** Performance of different wheat genotypes inoculated with the plant growth promoting bacterium *Herbaspirillum seropedicae*. *Eur J Soil Biol.* 2014;64:1–5.
14. **Saber Z, Pirdashti H, Esmaeili M, Abbasian A, Heidarzadeh A.** Response of wheat growth parameters to co-inoculation of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and different levels of inorganic nitrogen and phosphorus. *World Appl Sci J.* 2012;16:213–9.
15. **Yanni YG, Dazzo FB.** Enhancement of rice production using endophytic strains of *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* in extensive field inoculation trials within the Egypt Nile delta. *Plant Soil.* 2010;336(1–2):129–42.
16. **Pellegrino E, Bedini S.** Enhancing ecosystem services in sustainable agriculture: Biofertilization and biofortification of chickpea (*Cicer arietinum* L.) by arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol Biochem.* 2014;68:429–39.
17. **Tomic JM, Milivojevic JM, Pesakovic MI.** The response to bacterial inoculation is cultivar-related in strawberries. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry.* 2015;39:332–41.
18. **Surtiningsih T.** Addition of Non-Symbiosis Microbial Consortium and Arbuscular Mycorrhizal to Increase Growth and Crop Production of Jack Beans Plants (*Canavalia ensiformis* L.). *World Appl Sci J.* 2013;26:704–4711.
19. **Hong SH, Lee EY.** Phytostabilization of salt accumulated soil using plant and biofertilizers: Field application. *Int Biodeterior Biodegradation.* 2017;124:188–95.
20. **Urrútia G, Bonfill X.** Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Med Clin (Barc).* 2010;135:507–11.
21. **Banco Mundial.** Población total. [Internet]. *Bancomundial.org.* 2021 [citado el 8 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?view=map>
22. **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** FAOSTAT: Statistical Databases. [Internet]. Rome, Italy: Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO); 2000 [citado el 6 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/RFN>
23. **Arrufat J i.** Bhopal, una noche que dura ya 30 años. El País. [Internet]. 2014 [citado el 22 de octubre de 2021]. Disponible en: https://elpais.com/elpais/2014/12/03/planeta_futuro/1417610543_153774.html
24. **Benjumeda Muñoz D.** Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: mecanismos y aplicaciones. Sevilla: Universidad de Sevilla; 2017.
25. **Corrales Ramírez L, Caicedo Lozano L, Ramos Rojas S, Rodríguez Torres J.** *Bacillus* spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. *Nova.* 2016;45:15–27.
26. **Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo de España INSST.** Ganando en salud (infografías y vídeos). [Internet]. 2016 [citado el 13 de septiembre de 2021]. Disponible en: <https://www.insst.es/documentacion/catalogo-de-publicaciones/ganando-en-salud>
27. **Terry Alfonso E, Ruiz Padrón J, Tejada Peraza T.** Efecto de un bioproducto a base de *Pseudomona aeruginosa* en el cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill). *Rev Colomb Biotecnol.* 2010;12:32–8.
28. **Santillana Villanueva N.** Producción de biofertilizantes utilizando *Pseudomonas* sp.. *Ecol Apl.* 2006;5(87):1–2.
29. **Kari A, Nagymáté Z, Romsics C, Vajna B, Kutasi J, Puspán I, et al.** Monitoring of soil microbial inoculants and their impact on maize (*Zea mays* L.) rhizosphere using T-RFLP molecular fingerprint method. *Applied Soil Ecology.* 2019;138:233–44.
30. **Sangoquiza Caiza CA, Viera Tamayo Y, Yáñez Guzmán C.** Respuesta biológica de aislados de *Azospirillum* spp. frente a diferentes tipos de estrés. *Cent Agríc.* 2018;45:40–6.
31. **Chou YM, Shen FT, Chiang SC, Chang CM.** Functional diversity and dominant populations of bacteria in banana plantation soils as influenced by long-term organic and conventional farming. *Applied Soil Ecology.* 2017;110:21–33.
32. **Rajkumar M, Ae N, Freitas H.** Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction. *Chemosphere.* 2009;77:153–60.
33. **Riahi L, Cherif H, Miladi S, Neifar M, Bejaoui B, Chouchane H, et al.** Use of plant growth promoting bacteria as an efficient biotechnological tool to enhance the biomass and secondary metabolites production of the industrial crop *Pelargonium graveolens* L'Hér. under semi-controlled conditions. *Ind Crops Prod.* 2020;154:112721.
34. **Mishra A, Singh SP, Mahfooz S, Shukla R, Mishra N, Pandey S, et al.** External Supplement of Impulsive Micromanager *Trichoderma* Helps in Combating CO2 Stress in Rice Grown Under FACE. *Plant Mol Biol Report.* 2019;37(1–2):1–13.
35. **Kantachote D, Nunkaew T, Kantha T, Chaiprapat S.** Biofertilizers from *Rhodospseudomonas palustris* strains to enhance rice yields and reduce methane emissions. *Applied Soil Ecology.* 2016;100:154–61.
36. **Zhou Y, Bao J, Zhang D, Li Y, Li H, He H.** Effect of heterocystous nitrogen-fixing cyanobacteria against rice sheath blight and the underlying mechanism. *Applied Soil Ecology.* 2020;153:103580.
37. **Roberti R, Galletti S, Burzi PL, Righini H, Cetrullo S, Perez C.** Induction of defence responses in zucchini

- (Cucurbita pepo) by *Anabaena* sp. water extract. *Biological Control*. 2015;82(3):61–8.
38. **Uchida R.** Essential nutrients for plant growth: Nutrient functions and deficiency symptoms. . In: *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture*. Hawaii: University of Hawaii at Manoa, College of Tropical Agriculture and Human Resources; 2000.
 39. **B. Patel K, N. Thakker J.** Deliberating Plant Growth Promoting and Mineral-Weathering Proficiency of *Streptomyces Nanhaiensis* Strain Ym4 for Nutritional Benefit of Millet Crop (*Pennisetum Glaucum*). *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2020;9:721–6.
 40. **Din M, Nelofer R, Salman M, Abdullah, Khan FH, Khan A, et al.** Production of nitrogen fixing Azotobacter (SR-4) and phosphorus solubilizing *Aspergillus niger* and their evaluation on *Lagenaria siceraria* and *Abelmoschus esculentus*. *Biotechnology Reports*. 2019;22:e00323.
 41. **Kumar A, Guleria S, Mehta P, Walia A, Chauhan A, Shirkot CK.** Plant growth-promoting traits of phosphate solubilizing bacteria isolated from *Hippophae rhamnoides* L. (Sea-buckthorn) growing in cold desert Trans-Himalayan Lahul and Spiti regions of India. *Acta Physiol Plant*. 2015;37:48.
 42. **Ríos-Ruiz WF, Torres-Chávez EE, Torres-Delgado J, Rojas-García JC, Bedmar EJ, Valdez-Nuñez RA.** Inoculation of bacterial consortium increases rice yield (*Oryza sativa* L.) reducing applications of nitrogen fertilizer in San Martin region, Peru. *Rhizosphere*. 2020;14:100200.
 43. **Syed-Ab-Rahman SF, Carvalhais LC, Chua E, Xiao Y, Wass TJ, Schenk PM.** Identification of Soil Bacterial Isolates Suppressing Different *Phytophthora* spp. and Promoting Plant Growth. *Front Plant Sci*. 2018;9.
 44. **Tripathi A, Awasthi A, Singh S, Sah K, Maji D, Patel VK, et al.** Enhancing artemisinin yields through an ecologically functional community of endophytes in *Artemisia annua*. *Ind Crops Prod*. 2020;150:112375.
 45. **Supraja KV, Behera B, Balasubramanian P.** Performance evaluation of hydroponic system for co-cultivation of microalgae and tomato plant. *J Clean Prod*. 2020;272:122823.
 46. **Krell V, Unger S, Jakobs-Schoenwandt D, Patel A V.** Endophytic *Metarhizium brunneum* mitigates nutrient deficits in potato and improves plant productivity and vitality. *Fungal Ecol*. 2018;34:43–9.
 47. **Linu MS, Asok AK, Thampi M, Sreekumar J, Jisha MS.** Plant Growth Promoting Traits of Indigenous Phosphate Solubilizing *Pseudomonas aeruginosa* Isolates from Chillii (*Capsicum annum* L.) *Rhizosphere*. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 2019;50:444–57.
 48. **Mahdi W.** Efficiency Test of *Sinorhizobium fredii* Local Isolate Biofertilizer on Growth and Yield of Cowpea *Vigna unguiculata* L. *Basic and Applied Sciences - Scientific Journal of King Faisal University*. 2020;21:29–39.
 49. **Helaly AA, Hassan SM, Craker LE, Mady E.** Effects of growth-promoting bacteria on growth, yield and nutritional value of collard plants. *Annals of Agricultural Sciences*. 2020;65(1):77–82.
 50. **Fernanda de Souza Gênero J, Messa VR, Beladeli MN, Torres da Costa AC, Duarte Júnior JB.** Rhizosphere nitrogen-fixing bacteria (free-living) contribute to nitrogen absorption in wheat. *Rhizosphere*. 2020;16:100245.
 51. **Nepolean P, Jayanthi R, Pallavi RV, Balamurugan A, Kuberan T, Beulah T, et al.** Role of biofertilizers in increasing tea productivity. *Asian Pac J Trop Biomed*. 2012;2(3):S1443–5.
 52. **Hussain A, Ali S, Rizwan M, Zia ur Rehman M, Javed MR, Imran M, et al.** Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants. *Environmental Pollution*. 2018;242:1518–26.
 53. **Mahadik S, Kumudini BS.** Enhancement of salinity stress tolerance and plant growth in finger millet using fluorescent pseudomonads. *Rhizosphere*. 2020;15:100226.
 54. **Kumawat KC, Sharma P, Sirari A, Singh I, Gill BS, Singh U, et al.** Synergism of *Pseudomonas aeruginosa* (LSE-2) nodule endophyte with *Bradyrhizobium* sp. (LSBR-3) for improving plant growth, nutrient acquisition and soil health in soybean. *World J Microbiol Biotechnol*. 2019;35:47.
 55. **Shang J, Liu B, Xu Z.** Efficacy of *Trichoderma asperellum* TC01 against anthracnose and growth promotion of *Camellia sinensis* seedlings. *Biological Control*. 2020;143:104205.
 56. **Xia Q, Wang L, Li Y.** Exploring high hydrostatic pressure-mediated germination to enhance functionality and quality attributes of wholegrain brown rice. *Food Chem*. 2018;249:104–10.
 57. **Swain M, Blomqvist L, McNamara J, Ripple WJ.** Reducing the environmental impact of global diets. *Science of The Total Environment*. 2018;610–611:1207–9.
 58. **Agaras BC, Noguera F, González Anta G, Wall L, Valverde C.** Biocontrol potential index of pseudomonads, instead of their direct-growth promotion traits, is a predictor of seed inoculation effect on crop productivity under field conditions. *Biological Control*. 2020;143:104209.
 59. **Olunike Omomowo I, Emmanuel Shittu O, Israel Omomowo O, Nathaniel Majolagbe O.** Influence of phosphate solubilizing non-toxicogenic *Aspergillus flavus* strains on maize (*Zea mays* L.) growth parameters and mineral nutrients content. *AIMS Agriculture and Food*. 2020;5:408–21.
 60. **Selvakumar G, Reetha S, Thamizhiniyan P.** Response of biofertilizers on growth, yield attributes and

- associated protein profiling changes of blackgram (*vigna mungo* L. hepper). *World Applied Sciences Journal*. 2012;16(10):1368–74.
- 61. Abbasi MK, Sharif S, Kazmi M, Sultan T, Aslam M.** Isolation of plant growth promoting rhizobacteria from wheat rhizosphere and their effect on improving growth, yield and nutrient uptake of plants. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. 2011;145(1):159–68.
- 62. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** Producción de hortalizas. Ayuda humanitaria de asistencia y recuperación para comunidades afectadas por la sequía en El Chaco. [Internet]; 2011;2: 1–20. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-as972s.pdf>
- 63. Sociedad Argentina de Nutrición (SAN).** Cereales y legumbres: la base de una alimentación sana. Charlas para la comunidad. Charlas para la comunidad. 2011;2:1–4.
- 64. Baloch UK.** WHEAT: Post-harvest operations edited by AGSI/FAO: Danilo Mejia (technical), Beverly Lewis (language&style) organisation: Pakistan agricultural research council (PARC) [Internet]. 2017. Disponible en: <https://www.fao.org/3/ax448e/ax448e.pdf>
- 65. Mikić A.** Phaseolus L. In: CRC Press T& FG, editor. *Lexicon of Pulse Crops*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2018. p. 187–211.
- 66. FAO.** Millet - Post-harvest Operations. INPhO-Post-Harvest Compendium [Internet]. 2001; 56 p. Disponible en: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/inpho/docs/Post_Harvest_Compendium_-_MILLET.pdf
- 67. Molkenbuhr E.** Arroz: temporada 2020/21 y perspectivas. ODEPA M de AC. Santiago de Chile; 2021.
- 68. Prakamhang J, Minamisawa K, Teamtaisong K, Boonkerd N, Teaumroong N.** The communities of endophytic diazotrophic bacteria in cultivated rice (*Oryza sativa* L.). *Applied Soil Ecology*. 2009;42(2):141–9.
- 69. Tan K, Radziah O, Halimi M, Khairuddin A, Shamsuddin Z.** Assessment of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and rhizobia as multi-strain biofertilizer on growth and N₂ fixation of rice plant. *Australian Journal of Crop Science*. Aust J Crop Sci. 2015;9(12):1257–64.
- 70. Machiavelli, Bhatia P, Sharma P, Khosla B.** Characterization for plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) towards rice (*Oryza sativa*) seedling germination and growth. *Ann Biol*. 2014;30:567–73.
- 71. Yanni YG, Dazzo FB.** Enhancement of rice production using endophytic strains of *Rhizobium leguminosarum* bv. trifolii in extensive field inoculation trials within the Egypt Nile delta. *Plant Soil*. 2010;336(1–2):129–42.
- 72. Islas-Rubio A, Higuera-Ciajara I.** SOYBEAN: Post-harvest operations. Ciudad de México: Centro de Investigación y Desarrollo, A.C.; 2002.
- 73. Aparicio-Fernandez X, Espinosa-Alonso L.** El consumo de leguminosas y sus efectos sobre la salud XII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, 2019;1–5. In México: Centro de Investigaciones en óptica; 2019.
- 74. Mahdi W.** Efficiency Test of *Sinorhizobium fredii* Local Isolate Biofertilizer on Growth and Yield of Cowpea *Vigna unguiculata* L. *Basic and Applied Sciences - Scientific Journal of King Faisal University*. 2020;21(1):29–39.
- 75. Ramya SS, Vijayanand N, Rathinavel S.** Foliar application of liquid biofertilizer of brown alga *Stoechospermum marginatum* on growth, biochemical and yield of *Solanum melongena*. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2015;4(3):167–73.
- 76. Khalil M.** Use of biological control and bio-fertilization against *Fusarium* wilt disease and its effect on growth characteristics and tomato productivity. *Current Research in Environmental & Applied Mycology*. 2020;10(1):71–84.
- 77. Bakr J.** yield and quality of mycorrhized processing tomato under water scarcity. *Appl Ecol Environ Res*. 2017;15(1):401–13.
- 78. Ji S, Liu Z, Liu B, Wang Y, Wang J.** The effect of *Trichoderma* biofertilizer on the quality of flowering Chinese cabbage and the soil environment. *Sci Hortic*. 2020;262:109069.
- 79. Datta M, Palit R, Sengupta C, Pandit M, Banerjee S.** Plant growth promoting rhizobacteria enhance growth and yield of chilli (*capsicum annum* L.) under field conditions. *Aust J Crop Sci*. 2011;5(5):531–6.
- 80. de La Luz L, Castro Armas R.** Botánica, biología, composición química y propiedades farmacológicas de *Artemisia annua* L. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*. 2009;14(4).
- 81. Kumar P, Sharma N, Sharma S, Gupta R.** Rhizosphere stoichiometry, fruit yield, quality attributes and growth response to PGPR transplant amendments in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) growing on solarized soils. *Sci Hortic*. 2020;265:109215.
- 82. Tomić J, Pešaković M, Milivojević J, Karaklajić-Stajić Ž.** How to improve strawberry productivity, nutrients composition, and beneficial rhizosphere microflora by biofertilization and mineral fertilization? *J Plant Nutr*. 2018;4 1(16):2009–21.