

Bioinoculantes: alternativas para la fertilización de sistemas agroforestales.

Bioinoculants: alternatives for the fertilization of agroforestry systems.

Laura Geraldine Pava Dominguez¹ Jeison Isidoro Candil Acevedo¹ Maryeimy Varon-Lopez²

¹Estudiante de Biología, Facultad de Ciencias de la Universidad del Tolima; ²Docente del Departamento de Biología e investigadora vinculada al grupo de Genética y Biotecnología vegetal y microbiana de la Universidad del Tolima, Ibagué.
mvaronl@ut.edu.co

Resumen:

El crecimiento poblacional está aumentando la demanda de alimento a nivel mundial, sumado al interés por mejorar la productividad agrícola y agroforestal, con el menor impacto posible sobre la salud del suelo. Por lo cual, se ha impulsado la búsqueda, el desarrollo y la aplicación de bioinoculantes. En esta revisión se tocarán aspectos sobre las actividades de los microorganismos promotores de crecimiento vegetal (MPCV) y su efecto sobre las plantas, especialmente las asociadas a sistemas agroforestales. Además, se presentarán algunos procedimientos para el aislamiento de los microorganismos (MO) así como el estado de la producción de bioinoculantes a nivel nacional y global, llevando a tener una idea sobre las investigaciones y aplicaciones que se realizan en la actualidad. Los productos, basados en microorganismos beneficiosos, ofrecen una alternativa, ya que permiten disminuir las dosis de aplicación de los agroquímicos tradicionales, y con ello contribuir a mejorar la salud del suelo, sin perder el rendimiento de los cultivos. En la producción de los bioinoculantes, se pueden utilizar una gran variedad de microorganismos, tales como bacterias y hongos. Para su aislamiento se pueden usar diferentes medios de cultivo, que pueden complementarse con la identificación bioquímica y molecular. Ya en la producción masiva se utilizan técnicas que van desde la fermentación líquida hasta la encapsulación. En cuanto a la producción, a nivel mundial, se puede observar que esta industria se encuentra en crecimiento, aunque se enfrenta al desconocimiento por parte de los compradores. En Colombia se destacan los departamentos de Cundinamarca, Tolima y Antioquia, aunque aún se considera una industria creciente que requiere investigaciones adicionales para optimizar la producción, incluso que pueda con el uso de la biología sintética, además de promover estrategias que mejoren la comercialización. Por esta razón, se puede decir que los bioinoculantes son una herramienta prometedora para una agricultura más sostenible y resiliente.

Palabras clave: microorganismos, bacterias hongos, suelo, nitrógeno, fósforo, cultivo, planta

Abstract

Population growth is increasing the demand for food worldwide, coupled with interest in improving agricultural and agroforestry productivity, with the least possible impact on soil health. Therefore, the search, development and application of bioinoculants has been promoted. In this review, aspects of the activities of plant growth promoting microorganisms (MPCV) and their effect on plants, especially those associated with agroforestry systems, will be addressed. In addition, some procedures for the isolation of microorganisms (OM) will be presented, as well as the status of bioinoculant production at a national and global level, leading to an idea of the research and applications that are currently being carried out. The products, based on beneficial microorganisms, offer an alternative, since they allow to reduce the application doses of traditional agrochemicals, and thus contribute to improving soil health, without losing crop yields. A wide variety of microorganisms, such as bacteria and fungi, can be used in the production of bioinoculants. Different culture media can be used for its isolation, which can be complemented with biochemical and molecular identification. Techniques ranging from liquid fermentation to encapsulation are already used in mass production. In terms of production, worldwide, it can be seen that this industry is growing, although it faces ignorance on the part of buyers. In Colombia, the departments of Cundinamarca, Tolima and Antioquia stand out, although it is still considered a growing industry that requires additional research to optimize production, even with the use of synthetic biology, in addition to promoting strategies that improve commercialization. For this reason, bioinoculants can be said to be a promising tool for a more sustainable and resilient agriculture.

Keywords: microorganisms, bacteria, fungi, soil, nitrogen, phosphorus, crop, plant

Introducción

La sociedad actual demanda productos amigables con el medio ambiente para la agricultura y los sistemas agroforestales, ante el pronóstico de un incremento mundial de la demanda de alimentos entre un 35% y un 56% en los próximos años (Van Dijk et al., 2021). También se prevé un aumento de más del 20% en la necesidad de alimentos de origen animal, como carne y leche. Por ello, se proyecta una mayor implementación de sistemas agroforestales, incluyendo los silvopastoriles, que combinan árboles, cultivos forrajeros y ganado. Estos sistemas optimizan recursos, contribuyen al secuestro de carbono y ayudan a mitigar la pérdida de biodiversidad, al tiempo que satisfacen los requerimientos de producción sostenible (Henchion et al., 2021; Pantera et al., 2021).

Es por esta razón que el uso de bioinoculantes representa una alternativa en la búsqueda de prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, promoviendo asociaciones

benéficas entre microorganismos y plantas. Se basa en la posibilidad de promover las asociaciones benéficas entre los microorganismos y las plantas. Los microorganismos aislados en laboratorio son una alternativa a los agroquímicos, ya que pueden fijar, absorber, solubilizar o mineralizar diferentes elementos, o sintetizar hormonas que proporcionan nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas (Arora & Mishra, 2024; Kumar et al., 2022).

Durante décadas, los productos agroquímicos permitieron satisfacer la demanda de alimentos, pero sus efectos secundarios han generado impactos negativos en los ecosistemas, causando degradación del suelo, contaminación del agua y pérdida de biodiversidad. Aunque los fertilizantes pueden aumentar rápidamente la producción, también provocan acidificación, lixiviación, eutrofización de cuerpos de agua, emisión de gases de efecto invernadero y erosión del suelo (Aravind et al., 2024). Además, los residuos de pesticidas en los órganos de las plantas pueden generar

problemas de salud al ser consumidos (Singh et al., 2020).

Aprovechando la capacidad de los microorganismos, es posible intentar restablecer el equilibrio entre la producción agrícola y la preservación del medio ambiente. Gran parte de estos organismos presentan un enorme potencial en la remediación del suelo. Pueden fomentar la disponibilidad de nutrientes, descomponer los residuos orgánicos y contribuir a la fijación de carbono. Además, algunos tienen la capacidad de degradar los residuos de ciertos pesticidas, lo que los convierte en una solución potencial para su uso como inoculantes en zonas afectadas (Arora & Mishra, 2024; Wang et al., 2022). Un ejemplo de esta actividad puede ser la simbiosis entre *Canavalia ensiformis* y *Bradyrhizobium sp*, que reduce la concentración residual de sulfentrazone (Mielke et al., 2020).

El propósito de esta revisión es explorar el potencial de los bioinoculantes en la agricultura y los sistemas agroforestales, centrándose en los microorganismos promotores de crecimiento vegetal. Se examinarán métodos para obtener microorganismos solubilizadores de fosfato y fijadores de nitrógeno, criterios principales para la elección de bioinoculantes, así como las diferentes estrategias para su producción a gran escala.

Microorganismos utilizados en bioinoculantes

Los microorganismos han sido ampliamente empleados en el campo de la biotecnología gracias a su alta diversidad metabólica y su potencial para aceptar modificaciones genéticas. Esto permite su uso como biofábricas para ser empleados en la síntesis de fármacos, la bioremediación, la biominería y otras acciones beneficiosas para el ser humano (Santomartino et al., 2023).

Una de las mayores aplicaciones de los microorganismos, se dan gracias a sus actividades de promoción de crecimiento vegetal, permitiendo crear insumos a partir de ellos; los cuales pueden ser clasificados como: biofertilizantes (solubilizan y/o fijan elementos), bioestimulantes, (sintetizan compuestos orgánicos y enzimas beneficiosas para promover el crecimiento de las plantas y mejorar su metabolismo) y agentes de biocontrol, (aquellos que pueden competir con los patógenos de la planta, al ocupar el espacio y usar los nutrientes)(Teraiya et al., 2023).

Los microorganismos promotores de crecimiento vegetal (MPCV) pueden tener tanto promoción directa como indirecta. Los MPCV pueden estimular el crecimiento de las plantas, facilitando la adquisición de recursos mediante la fijación de elementos esenciales como el nitrógeno, fósforo y hierro, o la alteración de la producción de fitohormonas, como las auxinas y citoquininas, las cuales promueven el desarrollo aéreo y radical de las plantas (Sevim et al., 2023; Teraiya et al., 2023). También se pueden encontrar la ACC desaminasa, la cual actúa sobre la 1aminociclopropano-1-carboxilato (ACC), transformándolo en α -cetobutirato y amoníaco. La molécula ACC, se genera en condiciones de estrés abiótico, perjudicando el desarrollo y estimulando el deterioro prematuro en las plantas (Teraiya et al., 2023).

Muchos de los MPCV son aislados de la rizosfera (suelo de 1 a 5 mm adherido), y reciben el nombre de rizobacterias (Orozco-Mosqueda et al., 2022). La rizosfera de suelos bajo especies de usos forestal y agroforestal son un excelente reservorio de comunidades microbiales benéficas para la promoción del crecimiento o la inducción de resistencia a patógenos (Yang et al, 2024; Yu et al., 2022). Estas pueden estar de forma libre, asociadas, endofíticas o formando nódulos. Entre sus características se encuentra una alta

plasticidad bioquímica, que les permite metabolizar compuestos naturales e incluso xenobióticos, sustancias químicas que no se encuentran de forma natural en el medio, como pesticidas, herbicidas y fármacos. Los principales géneros son *Azospirillum*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Burkholderia* y *Serratia*, entre otros (Khatoon et al., 2020; Teraiya et al., 2023).

Otro grupo de gran interés son hongos micorrízicos arbusculares (HMA), los cuales pueden formar arbusculos o vesículas en las raíces de las plantas. Las raíces micorrizadas tienen un mayor acceso al suelo, lo cual es favorable para su crecimiento y resistencia a condiciones adversas. Además, optimizan la nutrición de las plantas al aumentar la disponibilidad de nutrientes mediante su translocación y mejoran la estructura del suelo al incrementar su porosidad y capacidad de retención de agua y nutrientes.

Estos organismos pertenecen al filo Mucoromycota subfilo Glomeromycota, los géneros más abundantes son *Glomus*, *Acaulospora*, *Gigaspora* y *Scutellospora*. (Begum et al., 2019; Teraiya, et al., 2023; Varón López et al., 2023). En regiones donde se utilizan prácticas de sistemas agroforestales, se han aislado micorrizas, principalmente de los géneros *Acaulospora*, *Claroideoglomus*, *Funneliformis*, *Glomus*, *Gigaspora* y *Scutellospora* (Da Silva Sousa, 2013; Masebo et al., 2023)

Los microorganismos (MO), tienen un gran potencial como inoculantes, sin embargo, para que el proceso de promoción sea exitoso, es crucial una adecuada colonización de la rizosfera (Albright et al., 2022). Los procesos de inoculación se ven influenciados por tres condiciones principales: la presión del propágulo, el filtrado ambiental y las interacciones bióticas. La concentración y la frecuencia de aplicación de los microorganismos juegan un papel fundamental en el resultado, ya que es

necesario alcanzar el equilibrio entre la cantidad de individuos que se multiplican y mueren. Es esencial una estrategia de aplicación que facilite la interacción rápida del inoculante con el tejido, evitando pérdidas en el proceso. Además, las condiciones bióticas y abióticas del entorno deben estar dentro de rangos adecuados para que los microorganismos puedan establecerse y encontrar un nicho disponible. En los sistemas agroforestales el uso de los microorganismos ha permitido mejorar de forma global el sistema productivo.

Elementos disponibles a través de los microorganismos

Dentro de los elementos de mayor interés para la producción de las plantas, se encuentra el nitrógeno, un elemento esencial para los organismos vivos. El nitrógeno forma parte de los ácidos nucleicos, las proteínas, hormonas, vitaminas, además de ser parte importante del ATP, la molécula energética base de los seres vivos (Rana et al., 2019). En el suelo, el nitrógeno se encuentra limitado, aunque se pueden encontrar algunas bacterias y arqueas, que tienen la capacidad de fijar el nitrógeno molecular (N_2) presente en la atmósfera, para una forma asimilable para las plantas. Este proceso se puede llevar a cabo en condiciones de simbiosis, como es el caso de *Rhizobium* que genera nódulos en plantas leguminosas, o en condiciones libres, como algunas especies de bacterias como *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Azotobacter* y de arqueas como *Methanococcus*, *Methanosarcina*, y *Methanobacterium* (Khatoon et al., 2020; Sevim, et al., 2023)

Otros compuestos relevantes para el crecimiento, desarrollo de las plantas son el fósforo y el potasio, los cuales se encuentran en los suelos, aunque solo están disponibles en baja concentración (Sevim, et al., 2023). Entre los géneros que solubilizan el fósforo, se encuentra, *Azospirillum*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Gordonia*, *Bacillus*,

Bradyrhizobium, Thiobacillus, Mycobacterium, Micrococcus y Agrobacterium, mientras que aquellas que tienen la capacidad de disolver el potasio insoluble son algunas de los géneros, Pseudomonas, Pantoea, Rhizobium (Khatoun et al., 2020; Prola & Bortolato, 2022).

Algunos microorganismos promotores de crecimiento tienen la capacidad de sintetizar sideróforos, compuestos quelantes de hierro, considerado un micronutriente esencial que generalmente se encuentra en forma insoluble. Cuando se encuentran asociadas con las plantas, pueden transferirles el hierro, favoreciendo su crecimiento y desarrollo de la raíz y los brotes. Los organismos con la capacidad de sintetizar este tipo de moléculas también pueden actuar como biocontrol frente a fitopatógenos. Entre los géneros que presentan esta característica se encuentran diferentes especies de Pseudomonas y Bacillus (Pahari et al., 2017).

Obtención de microorganismos

Para el aislamiento e identificación de los microorganismos, se encuentran distintas metodologías. Las más conocidas son las dependientes de cultivo. Se empieza con muestras colectadas del suelo, se realizan diluciones seriadas y se siembran en medios de cultivo selectivos y/o diferenciales (Gaete et al., 2020; Gao et al., 2019; Jansson et al., 2023). Algunos medios ayudan a caracterizar actividades específicas, como el agar cromo azurolo para la producción de sideróforos, y el caldo de soja triptico con L-triptofano para determinar la producción de AIA (ácido indol-3-acético) (Gaete et al., 2020; Sherpa et al., 2021).

Otros medios y actividades de promoción, se pueden encontrar los que permiten establecer actividades específicas como la fijación de nitrógeno, para los cuales se utiliza el medio de cultivo ELMARC (extracto de levaduras manitol-agar-rojo congo), el cual

puede ser empleado tanto para las bacterias de vida libre, como aquellas que forman nódulos en las raíces de las plantas, estas últimas mediante la desinfección y maceración de los tejidos (Argumedo Delira, et al., 2020).

También se pueden usar medios para el aislamiento de microorganismos solubilizadores de fosfato, como por ejemplo el Pikovskaya, el cual se encuentra compuesto principalmente por fosfato insoluble, ya sea calcio o hierro. Para el aislamiento de hongos, se utiliza frecuentemente medios de cultivo como el PDA (Agar papa dextrosa), agar dextrosa Sabouraud (SDA), Agar Extracto de Malta (MEA), CYA Suplementado con NaCl al 5%(CYAS), Agar Creatina Sacarosa (CREA), Agar Diclorán Glicerol al 18% (DG18), Agar Avena (OA) y Agar Extracto de Levadura Czapek (CYA) (Acharya & Hare, 2022; Kharkwal, et al., 2024; Paiva et al., 2023)

El uso de medios de cultivo es una estrategia ampliamente usada para el aislamiento, caracterización e incluso identificación de organismos, esta última puede ser apoyada por la identificación molecular usando genes ribosomales, como 16S, 18S e ITS. Estos marcadores moleculares se encuentran altamente conservados, pero presentan pequeñas regiones variables que permite diferenciar distintos grupos de organismos (Cortés López et al., 2020; Gohil et al., 2019; Jansson et al., 2023).

Existen otras herramientas que usan el DNA para evaluar la respuesta de la comunidad microbiana a la aplicación de los inoculantes. Ejemplos incluyen la meta taxonomía que permite identificar quienes están presentes y la metagenómica, que ayudan a saber qué están haciendo. También hay técnicas que utilizan en el RNA (transcriptómica), proteínas (proteómica) o metabolitos (metabolómica). La metaxonomía identifica los microorganismos mediante la comparación de secuencias de ADN, de las regiones

ribosomales. La metagenómica permite una visión más amplia de la diversidad genética y funcional de los microorganismos presentes. La transcriptómica, analiza el ARN microbiano para entender que se está expresando mientras que la metaproteómica estudia los perfiles proteicos de las comunidades, destacando las funciones y actividades metabólicas de los organismos presentes (Jansson et al., 2023).

Producción de bioinoculantes

A nivel mundial, el mercado de biofertilizantes ha crecido considerablemente en los últimos años. En el 2016, alcanzaba los 1106.4 millones de dólares y se estimaba un crecimiento anual en un 14.2%, proyectándose a alcanzar los 3124.5 millones de dólares para finales de 2024. La industria está en etapa de desarrollo y presenta grandes proyecciones, aunque enfrenta el reto de ganar credibilidad entre los consumidores, en comparación a los agroinsumos tradicionales. Los mayores productores de biofertilizantes a nivel mundial son Argentina, Canadá, China, India, Estados Unidos y Europa, mientras que regiones como África se encuentran en etapa piloto (Raimi et al., 2021).

En Colombia se producen aproximadamente 47 inoculantes biológicos, registrados en el ICA. Los departamentos con mayor producción global de productos biológicos son Cundinamarca (48.99%), seguido del Tolima y Antioquia (14.9% cada uno). De los inoculantes biológicos, el 29.8% está enfocado en la fijación de nitrógeno, mientras que el 14.9% en la solubilización de fósforo. Entre los microorganismos que se encuentran en los bioinoculantes están las bacterias del género *Azotobacter chroococcum*, *Bradyrhizobium japonicum* y *Pseudomonas fluorescens*, así como hongos micorrízicos de los géneros *Glomus* y *Acaulospora* (Pérez Lavalle et al., 2017).

Entre los biofertilizantes empleados en sistemas agroforestales, se encuentran aquellos que contienen microorganismos de los géneros *Rhizobium*, *Azospirillum* y *Azotobacter*, los cuales han demostrado efectos positivos en la promoción del crecimiento de plantas en estos sistemas. En particular, su uso ha sido estudiado en sistemas silvopastoriles, demostrando beneficios en el crecimiento de leucaena, pastos guinea (*Megathyrsus maximus*) y eucalipto (Bonilla et al., 2021; Zapata & Silva, 2020).

Para la fabricación de bioinoculantes, según Bonilla et al. (2021), existen diferentes métodos de formulación que buscan generar condiciones para que el inóculo sea eficiente, estable en almacenamiento y reproducible en campo. A pesar de que los inoculantes son una buena alternativa para reemplazar el uso de fertilizantes químicos, aún existen algunos inconvenientes que deben ser superados, principalmente en la comercialización, ya que muchas veces las cepas bacterianas pueden sobrevivir en condiciones de laboratorio, pero no en el campo.

El método más utilizado para la producción de inoculantes son los medios de cultivo sin formulación adicional, inoculando semillas y plantas con cultivos bacterianos en suspensión. Este es uno de los métodos más documentados en los sistemas agroforestales, especialmente en las leguminosas arbóreas como la Leucaena, donde se inoculan las bacterias del género *Rhizobium* spp para la fijación del nitrógeno (Bonilla et al., 2021; Diaz, 2022). Sin embargo, existen otros métodos como los inoculantes líquidos, que son simples cultivos o suspensiones bacterianas modificadas con sustancias que mejoran la adherencia, estabilidad y capacidad de dispersión, siendo fáciles de producir en condiciones de laboratorio y con bajos costos de producción (Bonilla et al., 2021).

Otro método conocido es el de los inoculantes con portadores orgánicos, empleando principalmente turba, que mejora el tamaño del grano, pH y la humedad. Sin embargo, su costo de producción ha llevado a buscar alternativas como el lignito, el carbón, el polvo de bonote, compost de diferentes orígenes y residuos de caña. Otra alternativa es el uso de inoculantes poliméricos con formulaciones sintéticas, como el Alginato, el Agar, la kappa carragenina, la pectina, el quitosano y la goma, que proporcionan ventajas sobre la turba y que mejoran la producción industrial, alargando la vida útil, teniendo una supervivencia mucho más adecuada al campo, con fácil fabricación, un mejor rendimiento y suficiente densidad celular. (Bonilla et al.,2021).

De estos inoculantes son los poliméricos los que presentan mayores ventajas, ya que no son tóxicos y están libres de conservantes dañinos para las plantas inoculadas, no generan contaminación secundaria debido a su degradación gradual por los microorganismos del suelo y proporcionan protección física para las bacterias contra otras competidoras del suelo y reducen el estrés ambiental a la vez que retienen humedad suficiente para la supervivencia de las bacterias y se pueden dispersar en el agua para permitir el movimiento de estas. Estos inoculantes son secos, por lo que pueden ser almacenados en condiciones más favorables, ofrecen una calidad de fabricación alta, son de fácil manipulación y pueden ser mejorados cuando están en contacto con otros nutrientes que aumenta la supervivencia de las bacterias tras la inoculación. (Bonilla et al.,2021).

Finalmente, el método de macroesferas de alginato proporcionan una efectividad muy grande para inmovilizar ciertas PGPB/PGPR mezclando la bacteria con alginato y en ocasiones con caolina para formar esferas que posteriormente se seca y se emplean, se ha documentado en diferentes bacterias sus

efectos en lo que destaca su alta eficiencia, reduce el estrés salino, extiende la vida útil de las bacterias y proporciona protección contra las altas temperaturas (Bonilla et al.,2021).

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) es el encargado a nivel nacional de regular la producción, importación y uso de bioinsumos agrícolas, incluidos los inoculantes biológicos. Mediante la Resolución 068370 del 2020, establece los requisitos para el registro de productores, envasadores, importadores y departamentos técnicos que realizan ensayos de eficacia agronómica a estos productos. Esta resolución también detalla los requisitos para su registro, especificando el procedimiento, incluyendo plazos, documentos y las acciones a seguir en caso de incumplimiento por parte de los solicitantes.

De igual manera, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), junto con el ICA y AGROSAVIA, en el 2022, establecieron el "Protocolo técnico y normativo de bioinsumos, agroinsumos y controladores biológicos de origen natural", el cual se presenta como un instructivo para los usuarios con interés en introducción organismos vivos foráneos para el desarrollo de bioinsumos. Este protocolo detalla la necesidad de una Licencia Ambiental, solicitada ante la ANLA, para el desarrollo de estas prácticas, conforme a lo establecido en el Decreto 1076 de 2015. Esta licencia contempla una fase de investigación, en la cual se realiza un estudio de impacto ambiental, y una segunda fase de comercialización.

Aplicación y beneficios de los bioinoculantes en sistemas agroforestales.

Una de las asociaciones de mayor interés entre plantas y microorganismos se da en los sistemas agroforestales. Estos sistemas integran árboles, arbustos y cultivos agrícolas o ganaderos en un mismo espacio, y los

microorganismos juegan un papel esencial en mantener la relación dinámica entre sus componentes. Son responsables de descomponer la materia orgánica y liberar nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. Además, fijan nitrógeno atmosférico y solubilizan fosfatos de fuentes inorgánicas, haciendo estos nutrientes más disponibles para las plantas y ayudando en el transporte de agua y nutrientes (Beule et al., 2022; Fahad et al., 2022).

En la última década, la agricultura ha presentado un gran interés en no solo aumentar la producción de los cultivos. En la última década, ha aumentado el interés por la agricultura no solo para incrementar la producción de cultivos, sino también para mejorar la calidad del suelo. Una estrategia importante en este sentido es la implementación de sistemas agroforestales. Estos, contribuyen a mejorar la calidad del suelo, la cual se relaciona con sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y se define como su capacidad para mantener la fertilidad, la salud ecológica y los servicios ambientales de los ecosistemas (Chadwick et al., 2023; Osinuga et al., 2023).

Tradicionalmente, para mejorar la producción de cultivos se emplean distintos agroquímicos, preferidos por su efectividad y rápida acción. Sin embargo, estos pueden alterar el equilibrio natural del suelo, conduciendo a problemas de contaminación y agotamiento de nutrientes por su uso intensivo, aumentando la concentración de elementos como Pb, Cd, Cu, Mn, Zn y Hg en los suelos y aguas subterráneas. Esto representa un riesgo de toxicidad para el ecosistema y la salud humana. Además, agroquímicos pueden cambiar el pH, afectar las propiedades químicas y físicas del suelo y consecuentemente reducir a largo plazo la productividad de los cultivos (Speight, 2017; Osinuga et al., 2023).

Además del riesgo de contaminación por los excesos de fertilizantes, existen otros riesgos como son las sequías y el estrés por fósforo para el sistema planta-suelo. La deficiencia en fósforo es una de las principales limitaciones para el crecimiento y la producción sostenible de cultivos a nivel mundial, causando alteraciones en los procesos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y moleculares de las plantas (Benmrid et al., 2023).

Se espera que la extensión de la sequía y la deficiencia de fósforo se intensifique en el futuro. En este escenario, los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV) presentan un gran potencial para mejorar la calidad del suelo, y para reducir el uso de fertilizantes químicos sintéticos (Bonilla et al., 2022). Los MPCV, al ser utilizados como bioinoculantes, promueven el crecimiento y desarrollo de las plantas, al aumentar la disponibilidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), sintetizar hormonas vegetales, e incluso en la prevención de estrés biológico (Bonilla et al., 2022).

Los MPCV también pueden ayudar a las plantas a enfrentar el estrés en plantas por escasez de agua, alta salinidad o la presencia de metales pesados, proporcionando así una alternativa biotecnológica (Benmrid et al., 2023). Microorganismos como virus, arqueas, bacterias, hongos, y protozoos, entre otros realizan funciones de gran importancia en los ecosistemas, como la descomposición de materia orgánica y el aprovechamiento de los nutrientes (Jansson et al., 2023; Xiao et al., 2023).

El uso de MPCV representa una alternativa prometedora al uso de agroinsumos. Aunque, se encuentran limitaciones, ya que su efectividad, puede estar limitada por las condiciones ambientales, y baja colonización y persistencia en la rizosfera. Para superar estos inconvenientes, existen tecnologías emergentes como la biología sintética, las

cuales permiten la transformación de genética de los microorganismos e incluso de algunos procesos metabólicos, los cuales podrían ayudar a mejorar la colonización raíces de las plantas y establecer una relación simbiótica más efectiva. Esto podría aumentar su capacidad para proporcionar nutrientes y proteger las plantas contra patógenos. La introducción de nuevos genes y funciones, aunque es prometedora, requiere un análisis ético y de seguridad que debe ser evaluadas en cuanto a su impacto en la salud y el medio ambiente (Wang et al., 2022)

Conclusiones

En conclusión, los bioinoculantes se destacan como una alternativa sostenible a los productos químicos, ofreciendo beneficios significativos para los sistemas agroforestales, la producción agrícola y la conservación del medio ambiente. Los principales hallazgos de esta revisión subrayan que el uso de bioinoculantes puede mejorar la salud del suelo, incrementar el rendimiento de los cultivos y reducir la dependencia de insumos. Sin embargo, su éxito reside en una implementación cuidadosa que considere las condiciones bióticas y abióticas del entorno.

Estos agentes biológicos, son relevantes en la agricultura moderna, especialmente frente a los desafíos climáticos y ambientales actuales. Las plantas se ven influenciadas por condiciones como la sequía y otros factores estresantes, generando muertes masivas, lo que materializa en disminución de la producción. En este contexto, los bioinoculantes mejoran las condiciones del ambiente, facilitando prácticas agrícolas y agroforestales más sostenibles y ayudando a mitigar los efectos negativos de la agricultura intensiva.

Por último, se requiere una mayor investigación para mejorar la estabilidad y la eficacia de los bioinoculantes en condiciones reales de campo, así como para desarrollar

tecnologías innovadoras que permitan una producción más eficiente, una aplicación precisa y un monitoreo efectivo de su desempeño agronómico. En este contexto, se necesitan estudios adicionales para explorar el potencial de la biotecnología, incluyendo la encapsulación de microorganismos y la biología sintética, con el fin de mejorar la persistencia, la colonización de raíces y la interacción simbiótica entre los inoculantes y las plantas.

Referencias

- Acharya, T., & Hare, J. (2022). Sabouraud Agar and Other Fungal Growth Media. En *Fungal biology* (pp. 69-86). https://doi.org/10.1007/978-3-030-83749-5_2
- Albright, M. B., Louca, S., Winkler, D. E., Feeser, K. L., Haig, S., Whiteson, K. L., Emerson, J. B., & Dunbar, J. M. (2021). Solutions in microbiome engineering: prioritizing barriers to organism establishment. *The ISME Journal*, 16(2), 331-338. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-01088-5>
- Aravind, J., Kamaraj, M., Thayanithi, S., & Palanisamy, S. B. (2024). A review of the impact of herbicides and insecticides on the microbial communities. *Environmental Research*, 245, 118020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118020>
- Arora, N. K., & Mishra, J. (2024). Next generation microbe-based bioinoculants for sustainable agriculture and food security. *Environmental Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s42398-024-00308-w>
- Benmrid, B., Ghoulam, C., Zeroual, Y., Kouisni, L., & Bargaz, A. (2023). Bioinoculants as a means of increasing crop tolerance to drought and phosphorus deficiency in legume-cereal intercropping systems. *Communications*

- Biology, 6(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1038/s42003-023-05399-5>
- Beule, L., Vaupel, A., & Moran-Rodas, V. E. (2022b). Abundance, Diversity, and Function of Soil Microorganisms in Temperate Alley-Cropping Agroforestry Systems: A Review. *Microorganisms*, 10(3), 616. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030616>
- Bonilla Buitrago, R. R., González de Bashan, L. E., Pedraza, R. O., Estrada Bonilla, G. A., & Pardo Díaz, S. (2021). Bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia)
- Buitrago, R. R. B., de-Bashan, L. E., Pedraza, R. O., Estrada-Bonilla, G., & Pardo-Díaz, S. (2021). Bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible. En Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia)eBooks. <https://doi.org/10.21930/agrosaviaanalysis.7405019>
- Chadwick, J., Zhang, P., Ullah, S., & Lynch, I. (2023b). Use of nanotechnology to increase nutrient use efficiency, enhance crop nutrition, and reduce agrochemical pollution. En Elsevier eBooks (pp. 17-41). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91233-4.00010-7>
- Cortés-López, N. G., Ordóñez-Baquera, P. L., & Domínguez-Viveros, J. (2020b). Herramientas moleculares utilizadas para el análisis metagenómico. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(4), 1150-1173. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i4.5202>
- Da Silva Sousa, C., Menezes, R. S. C., De Sá Barreto Sampaio, E. V., De Sousa Lima, F., Oehl, F., & Maia, L. C. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi within agroforestry and traditional land use systems in semi-arid Northeast Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35(3), 435-441. <https://doi.org/10.4025/actasciagr.on.v35i3.16213>
- Díaz-Acuña, A. (2022). “Beneficios Ambientales y Económicos de *Rhizobium* spp., en Relación Simbiótica con Especies Vegetales en Base a su Capacidad de Fijación de Nitrógeno”, Revisión Sistemática. Universidad de Santander.
- Gaete, A., Mandakovic, D., & González, M. (2020). Isolation and Identification of Soil Bacteria from Extreme Environments of Chile and Their Plant Beneficial Characteristics. *Microorganisms*, 8(8), 1213. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8081213>
- Gao, J., Luo, Y., Wei, Y., Huang, Y., Zhang, H., He, W., Sheng, H., & An, L. (2019). Screening of plant growth promoting bacteria (PGPB) from rhizosphere and bulk soil of *Caragana microphylla* in different habitats and their effects on the growth of *Arabidopsis* seedlings. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 33(1), 921-930. <https://doi.org/10.1080/13102818.2019.1629841>
- Gohil, N., Panchasara, H., Patel, S., & Singh, V. (2019b). Molecular Biology Techniques for the Identification and Genotyping of Microorganisms. En Springer eBooks (pp. 203-226). https://doi.org/10.1007/978-981-13-8739-5_11
- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., Pradhan, A., Jinger, D., Rawale, G., Yadav, D. K., Kumar, V., Farooq, T. H., Ali, B., Sawant, A. V., Saud, S., Chen, S., & Poczai, P. (2022). Agroforestry Systems for Soil Health

- Improvement and Maintenance. Sustainability, 14(22), 14877. <https://doi.org/10.3390/su142214877>
- Henchion, M., Moloney, A., Hyland, J., Zimmermann, J., & McCarthy, S. (2021). Review: Trends for meat, milk and egg consumption for the next decades and the role played by livestock systems in the global production of proteins. *Animal*, 15, 100287. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100287>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2020). Resolución No. 068370. "Por medio de la cual se establecen los requisitos para el registro de productor, productor por contrato, envasador, importador y departamentos técnicos de ensayos de eficacia agronómica de Bioinsumos para uso agrícola; así como los requisitos para el registro de Bioinsumos para uso agrícola"
- Jansson, J. K., McClure, R., & Egbert, R.G.(2023). Soil microbiome engineering for sustainability in a changing environment. *Nature Biotechnology*, 41(12),17161728. <https://doi.org/10.1038/s41587-023-01932-3>
- Kharkwal, A. C., Joshi, H., Shandilya, C., Dabral, S., Kumar, N., & Varma, A. (2024). Isolation and characterization of a newly discovered plant growthpromoting endophytic fungal strain from the genus *Talaromyces*. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54687-5>
- Khatoon, Z., Huang, S., Rafique, M., Fakhar, A., Kamran, M. A., & Santoyo, G. (2020). Unlocking the potential of plant growthpromoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. *Journal Of Environmental Management*, 273, 111118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111118>
- Kumar, M., Poonam, Ahmad, S., & Singh,R.P.(2022). Plant growth promoting microbes: Diverse roles for sustainable and ecofriendly agriculture. *Energy Nexus*, 7, 100133. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100133>
- Masebo, N., Birhane, E., Takele, S.,Belay,Z.,Lucena, J.J., PérezSanz, A., & Anjulo, A. (2023). Diversity of Arbuscular Mycorrhizal fungi under different agroforestry practices in the drylands of Southern Ethiopia. *BMC Plant Biology*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04645-6>
- Mielke, K. C., Bertuani, R. R., Pires, F. R., Cotta, A. J. B., Filho, F. B. E., & Madalão, J. C. (2020). Does *Canavalia ensiformis* inoculation with *Bradyrhizobium* sp. enhance phytoremediation of sulfentrazone-contaminated soil? *Chemosphere*, 255, 127033. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127033>
- Orozco-Mosqueda, M., Fadji, A. E., Babalola, O. O., Glick, B. R., & Santoyo, G. (2022). Rhizobiome engineering: Unveiling complex rhizosphere interactions to enhance plant growth and health. *Microbiological Research*, 263, 127137. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127137>
- Osinuga, O. A., Aduloju, A. B., & Oyegoke, C. O. (2023). Impact of agrochemicals application on soil quality indicators and trace elements level of wetlands under different uses. *Journal Of Trace Elements And Minerals*, 5, 100090. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100090>
- Pahari, A., Pradhan, A., Nayak, S. K., & Mishra, B. B. (2017). Bacterial Siderophore as a Plant Growth Promoter. En *Springer eBooks*(pp. 163-180). https://doi.org/10.1007/978-98110-6847-8_7

- Pantera, A., Mosquera-Losada, M. R., Herzog, F., & Herder, M. D. (2021). Agroforestry and the environment. *Agroforestry Systems*, 95(5), 767-774. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00640-8>
- Paiva, D. S., Trovão, J., Fernandes, L., Mesquita, N., Tiago, I., & Portugal, A. (2023). Expanding the Microcolonial Black Fungi Aeminiaceae Family: *Saxispiralis lemorum* gen. et sp. nov. (Mycosphaerellales), Isolated from Deteriorated Limestone in the Lemos Pantheon, Portugal. *Journal Of Fungi*, 9(9), 916. <https://doi.org/10.3390/jof9090916>
- Pérez Lavallo, L., Bolívar Anillo, H. J., & Díaz Pérez, A. (2017). Biofertilizantes en Colombia. En H.H. Estrada-López, H. G. Saumett-España, M.A. IglesiasNavas, M. J. Bahamón, A.M. Cáceres-Martelo, C. E. Restrepo Flórez, A. Díaz Pérez, *Productos de confitería nutracéutica. Una opción empresarial para cultivadores de frutas y hortalizas* (pp.179-222). Barranquilla: Universidad Simón Bolívar.
- Prola, F., & Bortolato, M. A. (2022). Bacterias Solubilizadoras de Fósforo en el ambiente suelo. ¿Es posible pastorear los cultivos de servicio sin perder beneficios en el suelo?, 49. https://fcagr.unr.edu.ar/wpcontent/uploads/2023/10/AM64_revista.pdf
- Raimi, A., Roopnarain, A., & Adeleke, R. (2021). Biofertilizer production in Africa: Current status, factors impeding adoption and strategies for success. *Scientific African*, 11, e00694. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00694>
- Rana, A., Pandey, R. K., & Ramakrishnan, B. (2019). Enzymology of the nitrogen cycle and bioremediation of toxic nitrogenous compounds. En Elsevier eBooks (pp. 45-61). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818307-6.00003-2>
- Santomartino, R., Aversch, N., Bhuiyan, M., Cockell, C. S., Colangelo-Lillis, J., Gumulya, Y., Lehner, B., Lopez-Ayala, I., McMahon, S., Mohanty, A., Maria, S. R. S., Urbaniak, C., Volger, R., Yang, J., & Zea, L. (2023). Toward sustainable space exploration: a roadmap for harnessing the power of microorganisms. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37070-2>
- Sevim, G., Koçak, F. Ö., & Ünal, D. (2023). Hormonal signaling molecules triggered by plant growth-promoting bacteria. En Elsevier eBooks (pp. 187-196). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91883-1.00013-9>
- Sharma, M., Devi, S., Manorma, K., Kesta, K., Chand, S., Sharma, R., Tomar, M., & Gupta, M. (2024). Plant growth-promoting fungi: a tool for agriculturally important industrial production. En Elsevier eBooks (pp.393-418). <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13932-1.00016-7>
- Sherpa, M. T., Bag, N., Das, S., Haokip, P., & Sharma, L. (2021). Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria isolated from organically grown high yielding pole type native pea (*Pisum sativum* L.) variety Dentami of Sikkim, India. *Current Research In Microbial Sciences*, 2, 100068. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100068>
- Shi, X., Zhao, Y., Xu, M., Ma, L., Adams, J. M., & Shi, Y. (2023). Insight into Plant-Microbe Interactions in rhizosphere for Sustainable Agriculture in the New Crops Era. *NewCrops*. <https://doi.org/10.1016/j.ncrops.2023.11.002>
- Singh, S., Bhoi, T. K., & Vyas, V. (2023). Interceder con biofertilizantes microbianos en sistemas

- agroforestales para mejorar la productividad. En R. Mawar, R. Z. Sayyed, S. K. Sharma, & K. S. Sattiraju (Eds.), *Microorganismos promotores del crecimiento vegetal en regiones áridas* (pp.147-161). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4124-5_8
- Singh, D., Singh, S. K., Modi, A., Singh, P. K., Zhimo, V. Y., & Kumar, A. (2020). Impacts of agrochemicals on soil microbiology and food quality. En Elsevier eBooks (pp. 101-116). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-103017-2.00004-0>
- Speight, J. G. (2017). Sources and Types of Organic Pollutants. En Elsevier eBooks (pp.153-201). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804492-6.00004-6>
- Teraiya, S., Nirmal, D., & Joshi, P. (2023). Potential scope and prospects of plant growth-promoting microbes (PGPMs) in micropropagation technology. En Elsevier eBooks (pp. 249-277).
- Valero, N. o. V., Castro, C. M. V., Morales, Y. E. U., & Gómez, L. C. G. (2021). Bioestimulación de frijol guajiro y su simbiosis con *Rhizobium* por ácidos húmicos y *Bacillus mycoides*. *Biotecnología En el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 119-134. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1608>
- Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M., & Saghai, Y. (2021). A metaanalysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2(7), 494-501. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>
- Varón López, M, Ocampo Guerrero, M, Gallego Santos, J, Ángel González, L, Romero Sánchez, S, González Sierra, Y y Becerra Calderón, L. (2023). *Manual de laboratorio en microbiología general*. (1ª. Ed.). Sello Editorial Universidad del Tolima.
- Wang, G., Ren, Y., Bai, X., Su, Y., & Han, J. (2022a). Contributions of Beneficial Microorganisms in Soil Remediation and Quality Improvement of Medicinal Plants. *Plants*, 11(23), 3200. <https://doi.org/10.3390/plants11233200>
- Wang, L., Zang, X., & Zhou, J. (2022). Synthetic biology: A powerful booster for future agriculture. *Advanced Agrochem*, 1(1), 7-11. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.08.005>
- Xiao, Z., Hou, R., Li, T., Meng, F., Fu, Q., Li, M., Liu, D., Ji, Y., & Dong, S. (2023). Mechanism of microbial inhibition of rainfall erosion in black soil area, as a soil structure builder. *Soil & Tillage Research*, 233, 105819. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105819>
- Yang, Y., Li, Y., Hao, K. et al. (2024) Microbial community composition and co-occurrence network analysis of the rhizosphere soil of the main constructive tree species in Helan Mountain of Northwest China. *Sci Rep* 14, 24557 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76195-2>
- Yu, L., Zi, H., Zhu, H. et al. (2022) Rhizosphere microbiome of forest trees is connected to their resistance to soil-borne pathogens. *Plant Soil* 479, 143–158. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05505-2>
- Zapata Cadavid, A., & Silva Tapasco, B.E. (2020). *Sistemas silvopastoriles: aspectos teóricos y prácticos* (2ª ed., 242 p.). CARDER, CIPAV. Editorial CIPAV.