




Biofertilizantes Mineralizados en Sistemas Agroecológicos: Interacciones Microbianas y Desafíos para el Escalamiento Productivo Mineralized Biofertilizers in Agroecological Systems: Microbial Interactions and Challenges for Production Scaling

Oneyda Trejo-Ibarra¹ , Irasema Vargas-Arispuro¹ ,
Eber Addí Quintana-Obregón² , Esteban Sánchez-Chávez³ ,
Emmanuel Aispuro-Hernández¹  y Miguel Ángel Martínez-Téllez^{1†} 

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD); (O.T.I.), (I.V.A.), (E.A.H.), (M.A.M.T.). ² Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)-(CIAD); (E.A.Q.O.). Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas, No. 46, Col La Victoria. 83304 Hermosillo, Sonora, México.

³ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD). Av. Cuarta Sur 3820, Fracc. Vencedores del Desierto. 33089 Delicias, Chihuahua, México; (E.S.C.).

† Autor para correspondencia: miguel.martinez@ciad.mx

RESUMEN

El deterioro de los suelos agrícolas, caracterizado por la reducción progresiva de la disponibilidad de nutrientes, de materia orgánica, pérdida de la estructura y de poblaciones de microorganismos benéficos, constituye una problemática crítica que amenaza la seguridad alimentaria debido a sus efectos adversos sobre la producción de los cultivos y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En este contexto, la implementación de prácticas agroecológicas emerge como una estrategia clave para la preservación y restablecimiento de estas.

La agroecología, como disciplina, integra principios ecológicos con prácticas agrícolas con el objetivo de diseñar sistemas alimentarios sostenibles que operen en sinergia con la naturaleza, minimizando la dependencia de insumos químicos que impactan negativamente los ecosistemas. Entre las estrategias agroecológicas, destaca el uso de biofertilizantes mineralizados como una alternativa prometedora para restaurar el microbioma del suelo, mejorar la nutrición de las plantas y fomentar sistemas agrícolas respetuosos con el ambiente. Estos biofertilizantes contienen microorganismos benéficos, como fijadores de nitrógeno, degradadores de celulosa y productores de sideróforos, los cuales establecen interacciones simbióticas con las plantas y el entorno edáfico. Estas interacciones contribuyen a procesos clave como la mineralización y solubilización de nutrientes para favorecer la absorción y asimilación de macro y micronutrientes esenciales para los cultivos.

El objetivo de la presente revisión es compilar y analizar el potencial agroecológico de los biofertilizantes mineralizados en la nutrición vegetal y la restauración de suelos degradados, con énfasis en sus técnicas de producción, los microorganismos benéficos involucrados y sus reportes agronómicos en diversos cultivos. Para ello, se realizó una búsqueda bibliográfica en bases de datos científicas como Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar, SciELO y Redalyc, abarcando publicaciones en español e inglés de los últimos 15 años, con énfasis en estudios experimentales, revisiones sistemáticas y literatura técnico-normativa relacionada con prácticas agroecológicas y biofertilización mineral.

Palabras clave: agricultura sostenible y sustentable, biodiversidad, conservación de suelos, prácticas agroecológicas.

SUMMARY

The deterioration of agricultural soils, characterized by the progressive reduction in nutrient availability, organic matter, and the loss of soil structure and populations of beneficial microorganisms, represents a critical challenge that threatens food security due to its adverse effects on crop production and the sustainability of agricultural systems. In this context, the implementation of agroecological practices emerges as a key strategy for soil preservation and restoration.



Cita recomendada:

Trejo-Ibarra, O., Vargas-Arispuro, I., Quintana-Obregón, E.A., Sánchez-Chávez, E., Aispuro-Hernández, E., & Martínez-Téllez, M. A. (2025). Biofertilizantes Mineralizados en Sistemas Agroecológicos: Interacciones Microbianas y Desafíos para el Escalamiento Productivo. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-10. e2222. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2222>

Recibido: 27 de marzo de 2025.

Aceptado: 22 de mayo de 2025.

Revisión: Volumen 43.

Octubre de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Dámaris Leopoldina Ojeda-Barrios

Editor Técnico:

Dr. Gerardo Cruz Flores



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Agroecology, as a discipline, integrates ecological principles to design sustainable food systems that operate in harmony with nature, minimizing dependence on chemical inputs that negatively affect ecosystems. Among agroecological strategies, the use of mineralized biofertilizers stands out as a promising alternative for restoring the soil microbiome, improving plant nutrition, and promoting environmentally friendly agricultural systems. These biofertilizers contain beneficial microorganisms, such as nitrogen-fixing, cellulose-degrading, and siderophore-producing bacteria, that establish symbiotic interactions with plants and the surrounding soil environment. These interactions contribute to key processes such as nutrient mineralization and solubilization, enhancing the uptake and assimilation of essential macro- and micronutrients by crops.

The objective of this review is to compile and analyze the agroecological potential of mineralized biofertilizers in plant nutrition and the restoration of degraded soils, with emphasis on their production techniques, the beneficial microorganisms involved, and their reported agronomic benefits in various crops. To this end, a bibliographic search was conducted in scientific databases such as Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar, SciELO, and Redalyc, covering publications in Spanish and English from the last 15 years, with a focus on experimental studies, systematic reviews, and technical and regulatory literature related to agroecological practices and mineral biofertilization.

Index words: *sustainable agriculture, biodiversity, soil conservation, agroecological practices.*

INTRODUCCIÓN

Las prácticas agrícolas actuales generan importantes consecuencias negativas al ambiente, como el desgaste del suelo, la contaminación hídrica, la tala intensiva, el daño a la diversidad biológica y el cambio climático principalmente debido al uso intensivo de agroquímicos en sistemas de producción especializados (Ramírez-Juárez, 2022). En respuesta a estos desafíos, es crucial promover sistemas agrícolas integrales y sostenibles que aseguren la producción de alimentos, sin comprometer la persistencia de los recursos naturales. Estos sistemas se basan en la interacción natural entre los cultivos y los microorganismos del suelo que favorecen la fijación de elementos esenciales y mejoran la fertilidad, promoviendo así la productividad vegetal y la protección del ambiente (Altieri *et al.*, 2021). En este contexto, la agroecología emerge como una estrategia clave, proponiendo el uso de biofertilizantes, que mejoran la actividad microbiana y la retención de elementos en el suelo (Iqbal *et al.*, 2021).

A pesar de los beneficios que la adopción de prácticas agroecológicas puede brindar en términos de seguridad y sostenibilidad alimentaria, una transición agroecológica eficiente será factible cuando se conozcan las bases científicas que sustenten los alcances de su implementación y que permitan diseñar protocolos bien estructurados para la producción de biofertilizantes, y faciliten su operación a mediana y gran escala. El objetivo de esta revisión es analizar el potencial agroecológico de los biofertilizantes mineralizados en la nutrición vegetal y la restauración de suelos agrícolas, integrando las técnicas de producción, los mecanismos de interacción microbiológica y su capacidad para estimular procesos simbióticos que mejoran la productividad en cultivos.

PROBLEMÁTICA GENERADA POR EL USO DE AGROINSUMOS CONVENCIONALES

Desde mediados del siglo XX se incrementó la producción agrícola mundial, gracias al uso de agroquímicos, semillas mejoradas y sistemas de riego (Martínez-Dalmau, Berbel y Ordóñez, 2021). No obstante, el uso excesivo de estos agroinsumos genera consecuencias perjudiciales, como el desgaste de suelos (Wu *et al.*, 2020), el cambio climático, la contaminación de mantos acuíferos y el daño a la fauna silvestre (Hickman *et al.*, 2021). Aunado a esto, se reporta que el costo destinado a la fertilización química, control de plagas y malezas para la producción de una hectárea de maíz, se incrementó de 23.3% a 25.9% en el periodo de 2011 a 2012, y de 31% a 35% en el periodo de 2019 y 2020 (Chávez-Díaz *et al.*, 2020).

Por otra parte, se sabe que el uso de fertilizantes nitrogenados tiene un impacto negativo en el microbioma del suelo y afecta las interacciones que se realizan en la rizosfera (Zhu, Vivanco y Manter, 2016). El nitrógeno es un macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas; sin embargo, en los sistemas agrícolas industrializados,

más de la mitad del fertilizante nitrogenado sintético aplicado no es aprovechado por las plantas superiores y se pierde por procesos como la lixiviación (West *et al.*, 2014). Estas pérdidas ocasionan problemáticas graves para los ecosistemas, como la contaminación ambiental de aguas subterráneas que llega a ser perjudicial para la salud humana (Martínez-Dalmau *et al.*, 2021). La pérdida de la biodiversidad puede generar inseguridad alimentaria ya que disminuye la capacidad de los sistemas de producción agrícola de enfrentar plagas, enfermedades y daño al agroecosistema (Sarandón, 2020).

En este sentido, los desafíos actuales para la generación de alimentos se enfocan en impulsar políticas agrarias que promuevan cambios en la economía del campo y el sector rural para promover la seguridad alimentaria, además de proponer prácticas agrícolas sustentables con una orientación integral que permita la preservación del suelo, la conservación de la biodiversidad y promueva la sostenibilidad de la agricultura (Sarandón, 2020).

AGROECOLOGÍA

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la agroecología tiene como propósito promover la salud del suelo y fomentar prácticas productivas sostenibles. Entre sus principios se incluyen la diversificación de cultivos, la conservación de la biodiversidad y la mejora de la calidad de los alimentos producidos mediante procesos naturales, como fijación de nutrientes y control biológico de plagas (FAO, 2018; Dussi y Flores, 2018),

Las prácticas agroecológicas aportan numerosos beneficios a la agricultura sostenible cuando se implementan en sistemas de producción de mediana y gran escala; estos aportes no solo responden a la alta demanda y la sostenibilidad ambiental, sino que también permiten abordar desafíos económicos y sociales asociados con estos sistemas de producción (Montalba, Sarandón, Gazzano, Jacobi y Rist, 2021). La elaboración y aplicación de biofertilizantes desempeñan un papel fundamental en la transición agroecológica. El uso de biofertilizantes promueve el crecimiento de las plantas cultivadas y favorece la actividad microbiana en el suelo, estimulando las interacciones simbióticas entre los microorganismos presentes en los biofertilizantes, en la rizosfera y en la planta (Chávez-Díaz *et al.*, 2020; Iqbal *et al.*, 2021).

BIOFERTILIZANTES

Los biofertilizantes se derivan de fuentes naturales de origen animal (estiércol), fuentes vegetales, desechos alimenticios y otros materiales biodegradables (lixiviados, bioles, bokashi). Son clasificados en sólidos y líquidos (Cuadro 1), los sólidos se producen mediante un proceso aeróbico, mientras que los líquidos se generan a partir de la fermentación, ya sea aeróbica o anaeróbica (bioles), y su composición nutricional varía según la fuente orgánica empleada (Lazcano, Zhu-Barker y Decock, 2021).

El compostaje es un proceso de transformación bioquímica en el que distintos grupos de microorganismos, principalmente termófilos y nemátodos, desempeñan funciones esenciales durante un proceso de fermentación (Chen, Zhang y Yuan, 2020).

Por otro lado, el vermicompost o humus de lombriz es un biofertilizante que se obtiene por la actividad de lombrices, principalmente del género *Eisenia fetida* (Savigny), también llamada "lombriz de tierra de compost" o "lombriz de tierra roja". Es altamente eficaz para cultivos de frutas y hortalizas a pequeña y gran escala de producción, ya que contiene un alto porcentaje de nutrientes esenciales para las plantas (Ilie y Mihalache 2019).

El bokashi se obtiene mediante la descomposición de residuos orgánicos, incluidos los desechos de alimentos, a través de una fermentación controlada con ácido láctico en un ambiente anaeróbico. Su nombre proviene de una técnica tradicional japonesa con el mismo término; durante el proceso, el entorno ácido y la ausencia de oxígeno inhiben la proliferación de patógenos (Olle, 2020).

El biol se produce en biodigestores (tanques de plástico) a partir de la fermentación de heces frescas de animales (cerdos, vacas y ovejas) y residuos vegetales, las cuales se disuelven en agua con leche, suero, melaza y ceniza (Peñañiel y Ticona, 2015).

Por otra parte, los biofertilizantes mineralizados se producen a través de la degradación de materia orgánica mediante fermentación microbiana en condiciones aeróbicas, a partir de composta en un medio líquido enriquecido con polvo de rocas (harina de rocas) como aporte mineral y con flujo de oxígeno (Olle, 2020). La incorporación de polvo de rocas en biofertilizantes orgánicos es una estrategia que permite mejorar los nutrientes del suelo, potenciar el desarrollo y producción del cultivo, así como elevar la resistencia a la toxicidad por metales, estrés salino y sequía (González-Fuentes *et al.*, 2020).

Cuadro 1. Clasificación de biofertilizantes sólidos y líquidos según sus componentes y tipo de fermentación.
Table 1. Classification of solid and liquid biofertilizers according to their components and type of fermentation.

	Biofertilizante	Componentes principales	Fermentación
Sólido	Composta [†]	Estiércol, cenizas, paja, residuos orgánicos y agua	Anaeróbica y aeróbica
	Vermicomposta [†]	Estiércol o residuos vegetales, paja, lombriz (<i>Eisenia fétida</i>), melaza y agua	Aeróbica
	Bokashi	Estiércol, melaza, microorganismos activados, cenizas	Anaeróbica
Líquido	Biol	Estiércol, melaza, levadura, leche, cenizas, polvo de rocas.	Anaeróbica
	mineralizado	Estiércol, levadura,	

[†] Algunos productos listados, como composta o vermicomposta, son considerados biofertilizantes en sentido amplio por su contenido microbiológico y su efecto benéfico en el suelo, aunque no contengan microorganismos inoculados con funciones específicas. (Peñafiel y Ticona, 2015; Chen, Zhang y Yuan, 2020; Olle, 2020; Lazcano, Zhu-Barker y Decock, 2021).

[†] Some listed products, such as compost or vermicompost, are considered biofertilizers in a broad sense due to their microbiological content and beneficial effect on the soil, even if they do not contain inoculated microorganisms with specific functions. (Peñafiel and Ticona, 2015; Chen, Zhang, and Yuan, 2020; Olle, 2020; Lazcano, Zhu-Barker, and Decock, 2021).

Polvo de Rocas como Fuente Mineral

El polvo de rocas o harina de rocas se elabora mediante la trituración de rocas ígneas graníticas, basaltos, andesitas, rocas sedimentarias, fosforita, caliza y rocas metamórficas, ricas en elementos necesarios como el silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), manganeso (Mn), cobre (Cu), cobalto (Co), zinc (Zn), fósforo (P) y azufre (S) (Restrepo-Rivera, 2007).

Se reporta el efecto positivo de biofertilizantes minerales a base de zeolita y basalto con respecto al aporte mineral en frambuesa, y se indica que la aplicación de zeolita incrementó en 20% la concentración de Mg y 27% la concentración de P, mientras que la aplicación de basalto incremento 55% la concentración de Cu, con respecto a las plantas testigo (González-Fuentes *et al.*, 2020)

Las zeolitas son minerales aluminosilicatos de origen volcánico, caracterizados por tener una estructura tridimensional tetraédrica formada por Si, Al y O₂; estas estructuras contienen poros llenos de moléculas de agua y cationes de K, Na, Ca y Mg intercambiables (Méndez-Argüello y Lira, 2019). Se reportó que la zeolita clinoptilolita es de lenta liberación y en función de su alta capacidad de intercambio catiónico y afinidad por K⁺ y NH₄⁺ le permite capturar el NH₄⁺ para evitar su oxidación a NO₃⁻ por la acción de bacterias nitrificantes y reducir las pérdidas de fertilizantes amoniacales por lixiviación (Bybordi, Saadat y Zargaripour, 2017).

Por otra parte, el silicio (Si) es utilizado para enriquecer los abonos orgánicos, su aplicación limita la acumulación de sodio en las hojas y mantiene un adecuado contenido de agua, la aplicación de silicio al suelo incrementa la capacidad de intercambio catiónico, estimula la absorción de Ca, Mg, P, Fe, Zn, Mo y favorece el desarrollo y producción del cultivo (Araya, Camacho, Molina y Cabalceta, 2015; Mejía-Carranza, Cruz, Alvarado y Ramírez, 2022). Sin embargo, a pesar de ser el segundo elemento con mayor presencia en la corteza terrestre, no forma parte de los elementos esenciales para las plantas. El silicio se transforma en ácido ortosilícico (H₄SiO₄) y traslada los iones fosfato retenidos por los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio o bien, reemplaza a los fosfatos en los sitios de adsorción de las arcillas y aumenta el fósforo disponible (Álvarez y Osorio, 2014).

Mecanismos de Interacción entre Biofertilizantes y Microbiota Rizosférica en la Promoción del Crecimiento Vegetal

La rizosfera es una zona del suelo distinguida por su elevada concentración de nutrientes y que rodea de manera estrecha al sistema radicular de las plantas se divide en tres componentes: la endorizósfera, que corresponde al espacio intercelular dentro de los tejidos radiculares que es colonizado por microorganismos; la ectorizósfera, que abarca el compartimento del suelo que se extiende hasta cinco milímetros desde la raíz; y el rizoplano, que es la interfaz entre la raíz y el suelo (Noumavo, Agbodjato, Baba, Adjanohoun y Baba, 2016).

En esta área se llevan a cabo diversos procesos biológicos esenciales para la interacción entre las plantas y los microorganismos del suelo como la absorción, respiración y exudación, y pueden modificar las condiciones fisicoquímicas del suelo, como el pH, potencial redox, la abundancia de elementos nutritivos, contaminantes y agentes complejantes y quelatantes, y la presión parcial del oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂), que en

conjunto modulan la rizosfera (Gianfreda, 2015). Las interacciones entre los microorganismos presentes en los biofertilizantes, los microorganismos presentes en la rizosfera y la planta presentan diversos mecanismos para estimular el crecimiento y desarrollo vegetal con distintos factores ambientales. Estos mecanismos incluyen la fijación no simbiótica y simbiótica del nitrógeno, la liberación de fosfatos y la síntesis de fitohormonas como el ácido indolacético (Calvo, Nelson y Kloepper, 2014; Goswami, Thakker y Dhandhukia, 2016).

Además, se libera una serie de metabolitos que estimulan una simbiosis benéfica, como los sideróforos, que favorecen la quelación del hierro y elevan su absorción por parte de las plantas, lo que genera un impacto significativo en la salud de las plantas y la fertilidad del suelo (Ahmed *et al.*, 2017).

Dentro de los microorganismos que generan cambios benéficos para los cultivos, o que participan en interacciones positivas entre raíces y microorganismos, se destacan los microorganismos promotores del crecimiento vegetal, también conocidos como PGPM (Plant Growth-Promoting Microorganism), por sus siglas en inglés (Cuadro 2) (Souza, Ambrosini y Passaglia, 2015; Tabassum *et al.*, 2017).

En este contexto, los biofertilizantes surgen como una alternativa que no solo pone en valor la biodiversidad, sino que también favorece la producción, distribución y sostenibilidad agrícola. La aplicación de *Bradyrhizobium* en el cultivo de soya demostró su eficacia como estrategia para reducir la dependencia de agroquímicos. El uso de la cepa ICA 8001 aumentó de forma significativa el rendimiento de las plantas en comparación con los cultivos no inoculados, lo que confirma su potencial para mejorar la productividad en sistemas agrícolas convencionales (Romero-Arias, Ruz, Nápoles, Gómez y Rodríguez, 2019).

Microorganismos Fijadores de Nitrógeno en Biofertilizantes

El nitrógeno forma parte de proteínas, aminoácidos y moléculas como las purinas, pirimidinas y porfirinas que intervienen en el metabolismo y el crecimiento de las plantas (Rodríguez-Yzquierdo *et al.*, 2020). Las plantas superiores no pueden utilizar el nitrógeno atmosférico directamente, sino que lo convierten en formas aprovechables mediante la fijación biológica del nitrógeno (BNF), este proceso es realizado por *Eubacterias* y *Arqueas* que poseen la enzima nitrogenasa, responsable de la reducción del nitrógeno molecular a amoníaco y, este al aceptar un hidrógeno cambiar a ion amonio ya puede ser absorbido y utilizado por las plantas (Ahmed y Kibret, 2014).

Los microorganismos fijadores de nitrógeno juegan un papel fundamental en la mejora de la fertilidad del suelo, particularmente en sistemas agrícolas sostenibles, y se dividen en tres grupos principales según su tipo de interacción con las plantas: simbióticos, no simbióticos y bacterias asociativas fijadoras de nitrógeno (Molina-Romero *et al.*, 2015). Las bacterias simbióticas fijan nitrógeno en asociación con las plantas y se pueden identificar dos grupos principales, el primero incluye bacterias móviles del suelo como *Rhizobium*, atraídas hacia las raíces de las plantas mediante compuestos liberados por las plantas. El segundo grupo está compuesto por actinomicetos y bacterias Gram positivas que nodulan raíces de árboles y arbustos (Calvo-García, 2011).

Cuadro 2. Microorganismos que estimulan el crecimiento vegetal, la fijación de nitrógeno, la solubilización de fosfatos y los productores de sideróforos.

Table 2. Microorganisms that stimulate plant growth, nitrogen fixation, phosphate solubilization, and siderophore production.

Clasificación	Géneros microbianos	Autores
Promotores de crecimiento vegetal	<i>Pseudomonas</i> sp., <i>Agrobacterium</i> sp., <i>Bradyrhizobium</i> sp., <i>Azotobacter</i> sp., <i>Azospirillum</i> sp., <i>Streptomyces</i> sp. y <i>Xanthomonas</i> sp.	Restrepo-Rivera <i>et al.</i> (2015), Velasco-Jiménez, Castellanos, Acevedo, Aarland y Rodríguez (2020) y Jha y Saraf (2015).
Fijadores o captadores de nitrógeno	<i>Rhizobium</i> sp., <i>Bradyrhizobium</i> sp., <i>Azotobacter</i> sp. y <i>Azospirillum</i> sp.	Tortora, Díaz y Pedraza (2011), Martínez-Aguilar, Guevara, Aguilar, Rodríguez y Reyes (2020) y Kawaka (2022).
Solubilizadores y movilizadores de fosfatos	<i>Bacillus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Penicillium</i> sp., <i>Trichoderma</i> sp., <i>Aspergillus</i> sp., <i>Rhizophagus</i> sp., <i>Endogone</i> sp., <i>Erwinia</i> , <i>Gigaspora</i> sp., <i>Acaulospora</i> sp., <i>Mucor</i> sp., <i>Scutellispora</i> sp. y <i>Serratia</i> sp.	Restrepo-Rivera <i>et al.</i> (2015), Beltrán-Pineda (2015), Etesami, Emami y Alikhani (2017), y Rodríguez-Hernández <i>et al.</i> (2020).
Productores de sideróforos	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. pumilus</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>Bradyrhizobium japonicum</i> , <i>Brevibacillus brevis</i> , <i>Chryseobacterium</i> spp., <i>Glomus fasciculatum</i> , <i>Lysinibacillus xylanilyticus</i> , <i>Mycobacterium</i> , <i>Micrococcus</i> sp., <i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Rhizobium</i> sp.	Dehner, Awaya, Maurice y DuBois (2010), Aguado-Santacruz, Moreno, Jiménez, García y Preciado (2012), Gao <i>et al.</i> (2022).

Las bacterias no simbióticas proporcionan al medio compuestos nitrogenados como amonio que las plantas aprovechan directamente para la síntesis de aminoácidos, establecen una relación de mutualismo, sin formar nódulos, y aprovechan los azúcares y aminoácidos liberados por las raíces para realizar la fijación de nitrógeno y liberar amoníaco (Herridge, Peoples y Boddey, 2008).

Microorganismos Productores de Sideróforos

El hierro (Fe) es un micronutriente esencial, es absorbido por las raíces como ion ferroso (Fe^{2+}), desempeña un papel crucial como catalizador de reacciones respiratorias y del proceso de formación de la clorofila; sin embargo, su disponibilidad es limitada en los suelos alcalinos o calcáreos, esto se debe a que el Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} formando hidróxidos insolubles (Harrington y Crumbliss, 2009).

Algunas bacterias promotoras del crecimiento vegetal presentes en los biofertilizantes sintetizan metabolitos conocidos como sideróforos que forman complejos Fe^{3+} -sideróforo, que pueden ser aprovechados por algunas plantas superiores (Aguado-Santacruz, Moreno, Jiménez, García y Preciado, 2012). Los sideróforos se clasifican según la naturaleza química de sus grupos quelantes como sideróforos de tipo catecol, sideróforos de tipo hidroxamato, sideróforos de α -hidroxi-carboxilato y sideróforos de 2-hidroxifenil-tia(oxa)zolina (Puja, Mislin y Rigouin, 2023).

La capacidad del hierro para alternar entre sus estados de oxidación y reducción influye significativamente en su dinámica en el suelo y está relacionada con el pH de este. En ausencia de oxígeno, algunos microorganismos pueden emplear óxidos de Fe^{3+} como aceptores finales de electrones para llevar a cabo la descomposición oxidativa de materia orgánica.

Este proceso genera la reducción del ión férrico a ión ferroso, una forma más soluble que favorece la disolución de los óxidos (Schwertmann y Taylor, 1989).

Las rizobacterias estimulan el desarrollo vegetal, al hacer disponible el Fe tienen el potencial de mejorar la nutrición de hierro en plantas deficientes de este elemento, ya que los quelatos de sideróforos de Fe pueden usarse como una fuente eficaz de hierro por las plantas de manzana (Gao *et al* 2022), además algunas bacterias como *Cellulosimicrobium* sp, gracias a la producción de sideróforos, reducen potencialmente la proliferación de *Botrytis* y *Fusarium* presentes en cebada, lo cual sugiere que estos metabolitos podrían ser potenciales como agentes de biocontrol (Nabti *et al.*, 2014).

Microorganismos Solubilizadores y Movilizadores de Fosfatos Presentes en Biofertilizantes

El fósforo (P) es un macronutriente indispensable para el correcto desarrollo fisiológico de las plantas, está presente en el suelo de forma orgánica e inorgánica, e interviene en mecanismos de almacenamiento y transferencia de energía durante el metabolismo celular (Restrepo-Rivera *et al.*, 2015).

Los microorganismos capaces de solubilizar fósforo, presentes en los biofertilizantes, pueden aumentar la disponibilidad del fósforo inorgánico (P_i) a través de la liberación de ácidos orgánicos tales como el málico, láctico y cítrico que disuelven el P_i al quelar cationes de Ca^{2+} , Al^{3+} y Fe^{2+} (Shrivastava, Srivastava y D'Souza, 2018); estos ácidos, son responsables de la desintegración, concentración y transporte de elementos del suelo y la formación de complejos solubles junto con los cationes de minerales y rocas (Afzal y Bano, 2008; Mayadunna *et al.*, 2023).

Además, los microorganismos solubilizadores de fósforo contribuyen al crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas, incrementan la disponibilidad de micronutrientes como el zinc y el hierro, y fortalecen la eficiencia en la fijación biológica de nitrógeno. Estos microorganismos también son capaces de colonizar las hifas de los hongos, extraer energía de sus exudados, al mismo tiempo que mineralizan los compuestos de fósforo presentes en el suelo (Zhang *et al.*, 2018).

Por otra parte, los microorganismos solubilizadores de fósforo desempeñan funciones adicionales como agentes de control, ya que secretan compuestos antifúngicos como ácido fenilacético (PAL), antibióticos, compuestos fenólicos, flavonoides y enzimas líticas. Entre los biofertilizantes fosfatados más ampliamente reconocidos se encuentran las cepas pertenecientes a los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Aspergillus* y *Penicillium* (Mayadunna *et al.*, 2023).

DESAFIOS DE LAS PRÁCTICAS AGROECOLÓGICAS ANTE LA ESCALA DE PRODUCCIÓN

La agroecología exige un cambio, desde la finca hasta el consumo; su flexibilidad la convierte en una herramienta clave para iniciar la transición agroecológica y transformar la agricultura convencional hacia un modelo sostenible, donde la implementación y las estrategias específicas varían dependiendo del tamaño del sistema, los objetivos del productor y las condiciones socioeconómicas y ambientales del contexto. Aunado a esto, la activación de políticas adecuadas, mercados justos y evidencia científica con alianzas entre investigadores y productores son los principales retos que presentan las prácticas agroecológicas en la producción de bioinsumos y alimentos sostenibles.

Hay evidencia sobre los efectos benéficos de la aplicación de biofertilizantes en distintos cultivos (Cuadro 3). Sin embargo, la dosis de aplicación de los biofertilizantes, composición, concentración microbiológica y contenido de minerales varía según el tipo de biofertilizante y los requerimientos nutricionales de cada cultivo.

Al utilizar un biofertilizante se debe considerar que las cepas seleccionadas no representen un problema para la salud humana, animal o vegetal y que además sean autóctonas del agroecosistema al que se planea su aplicación. Esto garantizará que su actividad se adapte de manera eficiente al entorno al que serán introducidas. Asimismo, es necesario contar con estudios microbiológicos que permitan tomar decisiones respecto al uso y manejo adecuado de las cepas (Basu *et al.*, 2021).

En México, se implementan regulaciones, como la Norma Oficial Mexicana NOM-077-FITO-2000 (2000), la cual establece los parámetros y características para realizar estudios sobre la eficacia biológica en insumos de nutrición vegetal para uso agrícola y la Norma Oficial Mexicana NOM-052-FITO-1995 (1997), la cual regula los lineamientos técnicos para biofertilizantes y micorrizas.

En 2020 la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) presentó su primera agenda para la transición ambiental y ecológica en México, la cual propone una integración socioambiental entre políticas públicas, movimientos sociales, comunidades indígenas, el sector científico y empresarial con el fin de promover una producción agrícola y pesquera sostenible, sin el uso de agroquímicos así como la conservación de semillas nativas (Heredia y Hernández, 2022).

Para la producción de bioinsumos es necesaria la estandarización de calidad, que garantice la consistencia y efectividad de productos como biofertilizantes y biopesticidas frente a la variabilidad microbiológica y las condiciones agroecológicas, así como la vida útil y el almacenamiento de estos productos, ya que es necesario preservar la estabilidad y supervivencia de los microorganismos durante su traslado y conservación.

En 2024, se reportó la conservación de un biofertilizante comercial a base de *Rhizobium* para el cultivo del frijol, demostrándose que la cepa *Rhizobium leguminosarum* CF1 mantuvo una cuenta de 10^8 UFC mL⁻¹, durante 150 y 90 días, cuando el producto se conservó a $4 \pm 29 \pm 2$ °C, respectivamente (Morales-Mena, Nápoles y Hernández, 2022). Este tipo de evidencias permitirá establecer estrategias de producción y comercialización de los bioinsumos.

Por otra parte, los retos económicos de la producción de biofertilizantes como una práctica sustentable, incluyen la inversión inicial para infraestructura, equipos especializados y tecnología a gran escala; sin embargo, se ha demostrado que los gastos de fabricación, inferiores a los costos de materiales químicos tradicionales, proporcionan ventajas económicas comparadas con sistemas convencionales en sistemas de mediana y gran escala.

Cuadro 3. Aplicación de biofertilizantes en distintos cultivos y sus efectos benéficos en las plantas y el suelo.
Table 3. Application of biofertilizers in different crops and their beneficial effects on plants and soil.

Cultivo	Biofertilizante y dosis	Efectos benéficos	Autores
Tomate, chile, sorgo, chícharo y calabaza	Lixiviado de vermicomposta con <i>Bacillus subtilis</i> 10×10^6 UFC y esporas de <i>Glomus geosporum</i> , <i>G. fasciculatum</i> , <i>G. constrictum</i> , <i>G. tortuosum</i> y <i>G. intraradices</i> .	Aumentó la altura de la planta, número de hojas y disminuyó 35% la fertilización química	Senés-Guerrero, Guardiola y Pacheco (2019).
Maíz azul	Cianobacterias: <i>Anabaena</i> (0.588×10^6 UFC), <i>Leptolyngbya</i> (0.588×10^6 UFC) y <i>Synechocystis</i> (0.294×10^6 UFC) en proporciones 2:2:1, respectivamente.	Incrementó el contenido de materia orgánica y disminuyó la acidez del suelo	Rodríguez-Palacio <i>et al.</i> (2019).
Pimiento	Lixiviados de vermicompost (Vegetales 70% + Estiércol de gallinaza 25% + aserrín 5% y mezcla de residuos vegetales 70% + residuos agroindustriales 30%).	Aumentó 15 y 52% el diámetro del fruto en variedades de pimiento con ambos tratamientos en comparación con el control.	Alcívar-Llivicura <i>et al.</i> (2021).
Tomate	Composta, fibra de coco inoculado con <i>Bacillus paralicheniformis</i> , <i>Acinetobacter guillouiae</i> y <i>Aeromonas caviae</i> .	Mejóro el crecimiento y la producción de tomate en comparación al control	Palacio, Nava, Sánchez, Quezada y Sáenz (2022).
Sandia	Biofertilizante inoculado con <i>P. lilacinus</i> (DZ910), <i>B. subtilis</i> (KC1723) y una suspensión combinada de ambos.	Disminución de <i>Aspergillus</i> y <i>Neocosmospora</i> en el suelo	Chen <i>et al.</i> (2023).
Maíz	<i>Azospirillum brasilense</i> , <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Serendipita indica</i> .	Incrementó el diámetro del tallo y la altura de la planta con respecto al control.	Canizalez-Silva <i>et al.</i> (2024).

En este contexto, el fortalecimiento del uso de biofertilizantes mineralizados como herramienta agroecológica para el escalamiento sostenible de la producción agrícola requiere de un enfoque integral que incluya la investigación aplicada, el desarrollo de normativas específicas, la implementación de incentivos económicos y la promoción de estrategias de capacitación técnica y productiva.

CONCLUSIÓN

México busca avanzar hacia un modelo agrícola sostenible, resiliente y equitativo, que priorice la conservación del ambiente, la salud humana, la prosperidad de las comunidades rurales y garantice la seguridad y soberanía alimentarias del país. En este contexto, el uso de biofertilizantes mineralizados emerge como una herramienta clave para impulsar la sostenibilidad en sistemas agrícolas de mediana y gran escala. Si bien aún enfrenta desafíos en materia de escalabilidad, regulación, aceptación y validación de su potencial para mejorar la salud del suelo y reducir los impactos ambientales, su eficiencia productiva lo posiciona como un componente estratégico en la transición hacia una agricultura más resiliente y agroecológica. La consolidación de este enfoque dependerá del fortalecimiento de la investigación científica, la innovación tecnológica y el respaldo gubernamental e institucional, factores esenciales para promover su adopción y maximizar sus beneficios a largo plazo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

FIANANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, investigación, escritura y preparación del borrador original: O.T.I. Edición y revisión del borrador final: M.A.M.T. y E.A.H. Supervisión: M.A.M.T., I.V.A. E.S.C. y E.A.Q.O.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD), a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para realizar estudios de doctorado.

LITERATURA CITADA

- Afzal, A., & Bano, A. (2008). Rhizobium and phosphate solubilizing bacteria improve the yield and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 10(1), 85-88.
- Aguado-Santacruz, G. A., Moreno-Gómez, B., Jiménez-Francisco, B., García-Moya, E., & Preciado-Ortiz, R. E. (2012). Impacto de los sideróforos microbianos y fitosideróforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(1), 9-21.
- Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. *Journal of King saud University-Science*, 26(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>

- Ahmed, B., Zaidi, A., Khan, M. S., Rizvi, A., Saif, S., & Shahid, M. (2017). Perspectives of plant growth promoting rhizobacteria in growth enhancement and sustainable production of tomato. In A. Zaidi & M. S. Khan (Eds.). *Microbial strategies for vegetable production* (pp. 125-149). Cham, Switzerland: Springer Nature.
- Alcívar-Llivicura, M. F., Vera-Rodríguez, J. H., Arévalo-Serrano, O. J., Arévalo, B. D., Pachar, L. E., Castillo, C. B., ... & Paltán, N. D. (2021). Aplicación de lixiviados de vermicompost y respuesta agronómica de dos variedades de pimiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal Recia*, 13(1), 50-58. <https://doi.org/10.24188/recia.v13.n1.2021.793>
- Altieri, M., Nicholls, C., Astier, M., Vásquez, L., Henao, A., & Infante, A. (2021). *Documentando la evidencia en agroecología: Una perspectiva latinoamericana*. Medellín, Colombia: Centro Latinoamericano de Investigaciones Agroecológicas (CELIA).
- Álvarez, C., & Osorio, W. (2014). *Silicio agrónomicamente esencial*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Araya, M. A., Camacho, M. E., Molina, E., & Cabalceta, G. (2015). Evaluación de fertilizantes líquidos con silicio, calcio o magnesio sobre el crecimiento del sorgo en invernadero. *Agronomía Costarricense*, 39(2), 47-60.
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & El Enshasy, H. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1140. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Beltrán-Pineda, M. E. (2015). La solubilización de fosfatos como estrategia microbiana para promover el crecimiento vegetal. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 101-113. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:401
- Bybordí, A., Saadat, S., & Zargaripour, P. (2018). The effect of zeolite, selenium and silicon on qualitative and quantitative traits of onion grown under salinity conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(4), 520-530. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1373278>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1), 3-41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Calvo-García, S. (2011). Bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno. *Cuadernos del Tomás*, 3, 173-186.
- Canizalez-Silva, M., Blanco-Macias, F., España-Luna, M. P., Rosa-Rodríguez, R. D. L., Lozano-Gutiérrez, J., & Lara-Herrera, A. (2024). Microorganismos en la biofertilización del cultivo de maíz como complemento a la fertilización química. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3903>
- Chávez-Díaz, I. F., Zelaya-Molina, L. X., Cruz-Cárdenas, C. I., Rojas-Anaya, E., Ruíz-Ramírez, S., & Santos-Villalobos, S. D. L. (2020). Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1423-1436. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2492>
- Chen, T., Zhang, S., & Yuan, Z. (2020). Adoption of solid organic waste composting products: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 272, 1-10.
- Chen, P., Zhang, J., Li, M., Fang, F., Hu, J., Sun, Z., ... & Li, J. (2023). Synergistic effect of *Bacillus subtilis* and *Paecilomyces lilacinus* in alleviating soil degradation and improving watermelon yield. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1101975. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1101975>
- Dehner, C. A., Awaya, J. D., Maurice, P. A., & DuBois, J. L. (2010). Roles of siderophores, oxalate, and ascorbate in mobilization of iron from hematite by the aerobic bacterium *Pseudomonas mendocina*. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(7), 2041-2048.
- Dussi, M. C., & Flores, L. B. (2018). Visión multidimensional de la agroecología como estrategia ante el cambio climático. *Inter Disciplina*, 6(14), 129-153. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2018.14.63384>
- Etesami, H., Emami, S., & Alikhani, H. A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 897-911. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017000400005>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2018). *Agroecology: Principles and strategies for the transition to agriculture and sustainable food systems*. Rome, Italy: FAO.
- Gao, B., Chai, X., Huang, Y., Wang, X., Han, Z., Xu, X., ... & Wang, Y. (2022). Siderophore production in pseudomonas SP. strain SP3 enhances iron acquisition in apple rootstock. *Journal of Applied Microbiology*, 133(2), 720-732. <https://dx.doi.org/10.1111/jam.15591>
- González-Fuentes, J. A., Jiménez-López, D., Sandoval-Rangel, A., Hernández-Pérez, A., Medrano-Macias, J., & Preciado-Rangel, P. (2020). Effect of mineral amendments on raspberry fruits, mineral content and antioxidants. *Biotechnia*, 22(1), 48-55. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v22i1.1124>
- Goswami, D., Thakker, J. N., & Dhandhukia, P. C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1127500. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127500>
- Gianfreda, L. (2015). Enzymes of importance to rhizosphere processes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 283-306.
- Harrington, J. M., & Crumbliss, A. L. (2009). The redox hypothesis in siderophore-mediated iron uptake. *Biometals*, 22(4), 679-689. <https://doi.org/10.1007/s10534-009-9233-4>
- Heredia-Hernández, D., & Hernández-Moreno, M. C. (2022). Resistencia a la transición agroecológica en México. *Región y Sociedad*, 34, e1581. <https://doi.org/10.22198/rys2022/34/1581>
- Herridge, D. F., Peoples, M. B., & Boddey, R. M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant Soil*, 311, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>
- Hickman, J. E., Kaya, B., Kebede, A., Kandji, S., Fitch, L., Neill, C., ... & Palm, C. A. (2021). Little effect of land use on N₂O and NO emission pulses following rewetting of dry soils across seasonally dry sub-Saharan Africa. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(1), e2020JG005742. <https://doi.org/10.1029/2020JG005742>
- Ilie, V., & Mihalache, M. (2019). Vermicompost production and its importance for soil and agricultural production. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*, 62(1), 1-7.
- Iqbal, A., He, L., Ali, I., Ullah, S., Khan, A., Akhtar, K., ... & Jiang, L. (2021). Co-incorporation of manure and inorganic fertilizer improves leaf physiological traits, rice production and soil functionality in a paddy field. *Scientific Reports*, 11(1), 10048.
- Jha, C. K., & Saraf, M. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 43(4), 407-415. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5171.2164>
- Kawaka, F. (2022). Characterization of symbiotic and nitrogen fixing bacteria. *AMB Express*, 12(1), 99. <https://doi.org/10.1186/s13568-022-01441-7>
- Lazcano, C., Zhu-Barker, X., & Decock, C. (2021). Effects of Organic Fertilizers on the Soil Microorganisms Responsible for N₂O Emissions: A Review. *Microorganisms*, 9(5), 983. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9050983>
- Martínez-Aguilar, F. B., Guevara-Hernández, F., Aguilar-Jiménez, C. E., Rodríguez-Larramendi, L. A., & Reyes-Sosa, M. B. (2020). Caracterización físico-química y biológica del suelo cultivado con maíz en sistemas convencional, agroecológico y mixto en la Frailesca, Chiapas. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 871-881. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.793>
- Martínez-Dalmau, J., Berbel, J., & Ordóñez-Fernández, R. (2021). Nitrogen fertilization. A review of the risks associated with the inefficiency of its use and policy responses. *Sustainability*, 13(10), 5625.
- Mayadunna, N., Karunarathna, S. C., Asad, S., Stephenson, S. L., Elgorban, A. M., Al-Rejaie, S., ... & Suwannarach, N. (2023). Isolation of phosphate-solubilizing microorganisms and the formulation of biofertilizer for sustainable processing of phosphate rock. *Life*, 13(3), 782. <https://doi.org/10.3390/life13030782>

- Mejía-Carranza, J., Cruz-Chávez, D., Alvarado-Hernández, R., & Ramírez-Gerardo, M. G. (2022). Aplicación de un compost con aporte de silicio en cultivo de rosa (*Rosa x hybrida*). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(3), e3227. <https://doi.org/10.19136/era.a9n3.3227>
- Méndez-Argüello, B., & Lira-Saldivar, R. H. (2019). Uso potencial de la zeolita en la agricultura sustentable de la nueva revolución verde. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(17), 191-193. <https://doi.org/10.19136/era.a6n17.1810>
- Molina-Romero, D., Bustillos-Cristales, M. D. R., Rodríguez-Andrade, O., Morales-García, Y. E., Santiago-Saenz, Y., Castañeda-Lucio, M., & Muñoz-Rojas, J. (2015). Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas*, 17(2), 24-34.
- Montalba, R., Sarandón, S., Gazzano, I., Jacobi, J., & Rist, S. (2021). *Marco conceptual y contexto de la agroecología*. En FAO (Ed.). *Agroecología: Transición hacia sistemas alimentarios sostenibles*. Santiago de Chile: FAO.
- Morales-Mena, B., Nápoles-García, M. C., & Hernández-Forte, I. (2024). Efecto de la temperatura y el tiempo de conservación en la calidad de Azofert®-F. *Cultivos Tropicales*, 45(1), 1-8.
- Nabti, E., Bensidhoum, L., Tabli, N., Dahel, D., Weiss, A., Rothballer, M., ... & Hartmann, A. (2014). Growth stimulation of barley and biocontrol effect on plant pathogenic fungi by a Cellulosimicrobium sp. strain isolated from salt-affected rhizosphere soil in northwestern Algeria. *European Journal of Soil Biology*, 61, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.12.008>
- Noumavo, A. P., Agbodjato, N. A., Baba-Moussa, F., Adjanooun, A., & Baba-Moussa, L. (2016). Plant growth promoting rhizobacteria: beneficial effects for healthy and sustainable agriculture. *African Journal of Biotechnology*, 15(27), 1452-1463. <https://doi.org/10.5897/ajb2016.15397>
- NOM-052-FITO-1995 (Norma Oficial Mexicana). (1997). Por la que se establecen los requisitos y especificaciones fitosanitarias para presentar el aviso de inicio de funcionamiento por las personas físicas o morales que se dediquen a la aplicación aérea de plaguicidas agrícolas, publicada el 10 de junio de 1997. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- NOM-077-FITO-2000 (Norma Oficial Mexicana). (2000). Por la que se establecen los requisitos y especificaciones para la realización de estudios de efectividad biológica de los insumos de nutrición vegetal, publicada el 11 de abril de 2000. *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.: SEGOB.
- Olle, M. (2021). Bokashi technology as a promising technology for crop production in Europe. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96(2), 145-152.
- Palacio-Rodríguez, R., Nava-Reyes, B., Sánchez-Galván, H., Quezada-Rivera, J. J., & Sáenz-Mata, J. (2022). Efecto de la inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal de tomate en condiciones de casa sombra comercial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 231-242. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3278>
- Peñañiel, W., & Ticona, D. (2015). Elementos nutricionales en la producción de fertilizante biol con diferentes tipos de insumos y cantidades de contenido ruminal de bovino-matadero municipal de La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 2(1), 87-90.
- Puja, H., Mislin, G. L., & Rigouin, C. (2023). Engineering siderophore biosynthesis and regulation pathways to increase diversity and availability. *Biomolecules*, 13(6), 959.
- Ramírez-Juárez, J. (2022). Seguridad alimentaria y la agricultura familiar en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 553-565. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2854>
- Restrepo-Rivera, J. (2007). *El ABC de la agricultura orgánica y harina de rocas*. Medellín, Colombia: SIMAS. ISBN: 978-99924-55-27-2.
- Restrepo-Franco, G. M., Marulanda-Moreno, S., de la Fe-Pérez, Y., Díaz-de la Osa, A., Lucia-Baldani, V., & Hernández-Rodríguez, A. (2015). Bacterias solubilizadoras de fosfato y sus potencialidades de uso en la promoción del crecimiento de cultivos de importancia económica. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 46(1), 63-76.
- Rodríguez-Yzquierdo, G. A., Pradenas-Águila, H. E., Basso-de-Figuera, C. A., Barrios-García, M., León-Pacheco, R. I., & Pérez-Macías, M. (2020). Efecto de dosis de nitrógeno en la agronomía y fisiología de plantas de maracuyá. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 117-128. <https://doi.org/10.15517/am.v31i1.36815>
- Rodríguez-Hernández, M. G., Gallegos-Robles, M. Á., Rodríguez-Sifuentes, L., Fortis-Hernández, M., Luna-Ortega, J. G., & González-Salas, U. (2020). Cepas nativas de Bacillus spp. como una alternativa sostenible en el rendimiento de forraje de maíz. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 313-321. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.690>
- Rodríguez-Palacio, M., Hernández-Reyes, B., Castilla-Hernández, P., Sánchez-Robles, J., Vela-Correa, G., & Schettino-Bermúdez, B. (2019). Uso potencial de cianobacterias como biofertilizante para el cultivo de maíz azul en la Ciudad de México. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 10(1), 13-27.
- Romero-Arias, A., Ruz-Reyes, R. M., Nápoles-García, M. C., Gómez-Padilla, E. J., & Rodríguez-Rodríguez, S. (2019). Efecto de la aplicación de tres cepas de Bradyrhizobium en el desarrollo morfoagronómico de *Glycine max* L. *Pastos y Forrajes*, 42(4), 290-295.
- Sarandón, S. J. (2020). *Biodiversidad, agroecología y agricultura sustentable*. La Plata, Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.
- Senés-Guerrero, C., Guardiola-Márquez, C., & Pacheco-Mosco, A. (2019). Evaluación de biofertilizantes a base de microorganismos y lixiviado de vermicomposta en cultivos de interés económico en México. *Agro Productividad*, 12(3). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1348>
- Shrivastava, M., Srivastava, P. C., & D'Souza, S. F. (2018). Microbios solubilizadores de fosfato: Diversidad y mecanismo de solubilización de fosfatos. En V. S. Meena (Ed.). *Role of rhizospheric microbes in soil* (pp. 137-165). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0044-8_5
- Souza, R. D., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38, 401-419. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>
- Schwertmann, U., & Taylor, R. M. (1989). Iron oxides. En J. B. Dixon & S. B. Weed (Eds.), *Minerals in soil environments* (2ª ed., pp. 379-438). Madison, WI, USA: Soil Science Society of America.
- Tabassum, B., Khan, A., Tariq, M., Ramzan, M., Khan, M. S. I., Shahid, N., & Aaliya, K. (2017). Bottlenecks in commercialization and future prospects of PGPR. *Applied Soil Ecology*, 121, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.030>
- Tortora, M. L., Díaz-Ricci, J. C., & Pedraza, R. O. (2011). Azospirillum brasilense siderophores with antifungal activity against *Colletotrichum acutatum*. *Archives of Microbiology*, 193(4), 275-286.
- Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 333-345. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>
- West, P. C., Gerber, J. S., Engstrom, P. M., Mueller, N. D., Brauman, K. A., Carlson, K. M., ... & Siebert, S. (2014). Leverage points for improving global food security and the environment. *Science*, 345(6194), 325-328. <https://doi.org/10.1126/science.1246067>
- Wu, L., Jiang, Y., Zhao, F., He, X., Liu, H., & Yu, K. (2020). Increased organic fertilizer application and reduced chemical fertilizer application affect the soil properties and bacterial communities of grape rhizosphere soil. *Scientific Reports*, 10(1), 9568. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66648-9>
- Zhang, L., Shi, N., Fan, J., Wang, F., George, T. S., & Feng, G. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi stimulate organic phosphate mobilization associated with changing bacterial community structure under field conditions. *Environmental Microbiology*, 20(7), 2639-2651. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14289>
- Zhu, S., Vivanco, J. M., & Manter, D. K. (2016). Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize. *Applied Soil Ecology*, 107, 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.009>