

Los Microorganismos del Suelo y su Relación Eterna con las Plantas

Soil Microorganisms and their Eternal Relationship with Plants

Adilene Velázquez-Medina¹, Evangelina Esmeralda Quiñones-Aguilar², Ernestina Gutiérrez-Vázquez¹, Nuria Gómez-Dorantes¹, Gabriel Rincón-Enríquez² y Luis López-Pérez^{1*}

¹ Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Unidad Posta Veterinaria Km 9.5 Carretera Morelia-Zinapécuaro. Col. El Trébol CP. 58880. Tarímbaro, Michoacan, México. ² Control Biológico de Enfermedades de Plantas. Laboratorio de Fitopatología, Unidad de Biotecnología Vegetal. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ).

Autor de correspondencia*: luis.lopez.perez@umich.mx

RESUMEN

En este trabajo, se resalta la relación natural que existe entre los microorganismos presentes en el suelo tales como las bacterias, actinobacterias, hongos de diversos tipos, entre muchos otros y las raíces de las especies vegetales. Estos microorganismos tienen una relación íntima con las plantas, debido a que aprovechan las sustancias que las raíces excretan como aminoácidos y ácidos orgánicos para alimentarse, reproducirse y hacer de la raíz su hábitat. Por otro lado, los microorganismos les confieren a las plantas diversos beneficios como, la estimulación en el crecimiento mediante distintas actividades o mecanismos, entre estos: la fijación de nitrógeno atmosférico, producción de sustancias orgánicas que ayudan a la solubilización, movilidad y disponibilidad de minerales como nitratos, fósforo y calcio del suelo y producen fitohormonas que ayudan al desarrollo de las raíces. Los microorganismos también protegen de algunos patógenos mediante distintos mecanismos de acción como: la competencia por espacio y nutrientes, la producción de sustancias con propiedades antifúngicas y antibacteriales e inducción a la resistencia sistémica. De esta manera, se hace énfasis en la ventaja que le aporta a las plantas asociarse con los microorganismos y que esta relación sea constante para el beneficio de ambas especies.

Palabras clave: hábitat microbiológico, simbiosis, sinergismos, antagonismos, rizósfera.

INTRODUCCIÓN

Es en la raíz de la planta donde se localiza la mayor diversidad y actividad biológica, convirtiéndose en el principal nicho ecológico para la mayoría de los microorganismos del suelo. La zona donde se da la relación planta-microorganismo se denomina rizósfera (Figura 1),

ABSTRACT

This work highlights the natural relationship between soil microorganisms such as bacteria, actinobacteria, various types of fungi, and many others and the roots of plant species. These microorganisms establish an intimate association with plants, utilizing substances excreted by the roots, such as amino acids and organic acids, to feed, reproduce, and make the roots their habitat. In turn, microorganisms provide plants with various benefits, including stimulating growth through different activities or mechanisms. These include atmospheric nitrogen fixation, the production of organic compounds that enhance the solubilization, mobility, and availability of minerals such as nitrates, phosphorus, and calcium from the soil, as well as the production of phytohormones that support root development. Microorganisms also protect plants from certain pathogens through mechanisms such as competition for space and nutrients, the production of substances with antifungal and antibacterial properties, and the induction of systemic resistance. Thus, this relationship emphasizes the advantages for plants in associating with microorganisms, fostering a continuous and mutually beneficial interaction for both species.

Key words: microbiological habitat, symbiosis, synergisms, antagonisms, rhizosphere.

INTRODUCTION

The plant root functions as the primary ecological niche for the majority of soil microorganisms due to its considerable diversity and biological activity. The region in which plant-microorganism interactions take place is known as the rhizosphere, extending from the root surface to 3 mm into the soil (Cabrera *et al.*, 2018). In this region there is a

que comprende desde la superficie de las raíces hasta 3 mm al interior del suelo (Cabrera *et al.*, 2018). En esta región se lleva a cabo una maravillosa asociación entre al menos tres organismos de distintos dominios, como son las plantas (*plantae*), los hongos (*fungi*) del reino de los que comprende desde la superficie de las raíces hasta 3 mm al interior del suelo (Cabrera *et al.*, 2018). En esta región se lleva a cabo una maravillosa asociación entre al menos tres organismos de distintos dominios, como son las plantas (*plantae*), los hongos (*fungi*) del reino de los eucariotas y las bacterias (*Archaeobacteria* y *Eubacteria*) (Woese *et al.*, 1990; Cavalier-Smith, 1998).

wonderful association between at least three organisms from different domains, such as plants (*plantae*), fungi (*fungi*) of the eukaryote kingdom and bacteria (*Archaeobacteria* y *Eubacteria*) (Woese *et al.*, 1990; Cavalier-Smith, 1998). In this area, beneficial associations with microorganisms enhance plant growth, productivity, and resilience to adverse environmental conditions.

For optimal growth, plants require light, water, and nutrients from the soil, which are primarily facilitated by microorganisms through various mechanisms, including fixing atmospheric nitrogen and making phosphorus, calcium, and potassium accessible to the roots. Moreover,



Figura 1. Zona de la rizósfera de una planta en pleno crecimiento. Flechas rojas indican la zona rizosférica.

Fuente: elaboración propia.

Figure 1. Rhizosphere zone of a plant in full growth. Red arrows indicate the rhizospheric zone.

Source: Own elaboration.

Debido a que en esta zona existen asociaciones benéficas con microorganismos, las plantas pueden crecer, ser altamente productivas y resistentes a condiciones adversas en los ambientes donde se desarrollan. Las plantas, para su crecimiento saludable requieren de luz, agua y nutrientes del suelo, los cuales en gran medida son facilitados por la acción de los microorganismos mediante diversos mecanismos de acción como: la fijación de nitrógeno atmosférico, poner a disponibilidad el fósforo, calcio y potasio a las raíces. Así mismo, los microorganismos benefician a las plantas produciendo fitohormonas, éstas

microorganisms contribute to plant health by producing phytohormones, resulting in benefits such as increased root development, improved nutrient absorption, enhanced foliage, and stimulation of flowering and fruiting (Alcantara-Cortes *et al.*, 2019). Microorganisms also provide benefits to plants by synthesis of enzymes and antibiotics that enhance and activate defense systems against biotic factors, including pest insect attacks and pathogenic microorganisms that compromise plant health, as well as abiotic factors such as water extremes, temperature fluctuations, and high solar radiation (Ayan *et al.*, 2021).

generan en las plantas beneficios como aumentar el número de raíces mejorando la absorción de nutrientes, incrementan el follaje, y estimulan floración y fructificación (Alcantara-Cortes *et al.*, 2019). Otro beneficio es la síntesis de enzimas y antibióticos que promueven y estimulan en la planta los sistemas de defensa contra factores bióticos, como el ataque de insectos plaga y microorganismos patógenos que perjudican la salud de la planta, y factores abióticos como el exceso o déficit hídrico, altas o bajas temperaturas y alta radiación solar (Ayan *et al.*, 2021).

Los microorganismos asociados a las plantas requieren de compuestos indispensables para su crecimiento tales como aminoácidos (triptófano, arginina, cisteína, glutamina y asparagina), carbohidratos (glucosa, arabinosa, manosa, fructosa, maltosa, galactosa y ribosa), ácidos orgánicos (acético, ascórbico, benzoico y málico). Estos los obtienen de diferentes fuentes como residuos vegetales, animales, agua y minerales en el suelo, principalmente obtenidos de las sustancias excretadas por raíces de plantas. Por lo que, los microorganismos y las plantas se necesitan entre sí para poder vivir (Moreno-Reséndez *et al.*, 2018).

Colonización endosimbótica y exosimbótica

En los suelos de uso agrícola, los bosques y jardinerías, se encuentra una gran diversidad de microorganismos como bacterias, actinobacterias, levaduras y hongos filamentosos (Figuras 2 y 3); algunos pueden ser nocivos para las plantas, y muchos otros son benéficos. Los microorganismos hacen de las raíces de las plantas su nicho ecológico, cuando estos penetran al interior de la raíz y ahí se establecen, se conocen como endosimbiontes; por otro lado, los microorganismos que se establecen sobre la superficie de la raíz se les denominan exosimbiontes (Figura 4). Todo esto se puede lograr gracias a la estrecha relación que se da entre plantas y microorganismos. Sin embargo, a pesar de los beneficios que se dan en esta asociación, existen también microorganismos perjudiciales para las plantas, que les ocasionan daños e inclusive la muerte. Estos microorganismos patógenos están en constante lucha con los benéficos para colonizar las raíces y el éxito en el crecimiento de la planta dependerá de que organismo (patógeno o benéfico), se establezca primero en la raíz (Velazco-Jiménez *et al.*, 2020).

Mecanismos de acción de los microorganismos en la promoción y crecimiento vegetal

Intervención en ciclos biogeoquímicos de la naturaleza

Los microorganismos participan en los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, fósforo y demás elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La acción de estos incluye la fijación, solubilización, volatilización, movilización e inmovilización de los nutrientes, con lo que los microorganismos regulan de alguna manera el crecimiento y desarrollo vegetal.

Microorganisms associated with plants require essential compounds for their growth and development, including amino acids (tryptophan, arginine, cysteine, glutamine, and asparagine), carbohydrates (glucose, arabinose, mannose, fructose, maltose, galactose, and ribose), and organic acids (acetic, ascorbic, benzoic, and malic). These compounds are derived from various sources, such as plant and animal waste, water, and minerals in the soil, with a primary source being substances excreted by plant roots. Consequently, a mutual dependency exists between microorganisms and plants for sustenance (Moreno-Reséndez *et al.*, 2018).

Endosymbiotic and Exosymbiotic Colonization

In the soils of crops, forests, and gardens, a considerable diversity of microorganisms such as bacteria, actinobacteria, yeasts, and filamentous fungi can be found (Figures 2 and 3). While some of these microorganisms can be harmful to plants, many others are beneficial. Microorganisms make the roots of plants their ecological niche; when they penetrate the interior of the root and establish themselves there, they are referred to as endosymbionts. In contrast, microorganisms that establish themselves on the surface of the root are known as exosymbionts (Figure 4). This interaction is made possible by the close relationship between plants and microorganisms. However, despite the advantages that arise from this association, there are also harmful microorganisms that can damage plants and even lead to their death. These pathogenic microorganisms are in a continuous struggle with beneficial ones to colonize the roots, and the success of plant growth will depend on which organism (pathogenic or beneficial) establishes itself first in the root system (Velazco-Jiménez *et al.*, 2020).

Mechanisms of Action of Microorganisms in Plant Promotion and Growth

Intervention in Biogeochemical Cycles of Nature

Microorganisms play a crucial role in the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, phosphorus, and other essential elements required for plant growth and development. Their actions involve the fixation, solubilization, volatilization, mobilization, and immobilization of nutrients, which indicates that microbial activity significantly influences the growth and development of plants.

Atmospheric Nitrogen Fixation

Nitrogen is a primary nutrient for plants and one of the most limited resources in the soil due to its high mobility and reactivity. While it is predominantly supplied to the soil through chemical fertilizers, certain microorganisms, particularly bacteria, possess the remarkable capability to fix atmospheric nitrogen, which constitutes approximately 78%

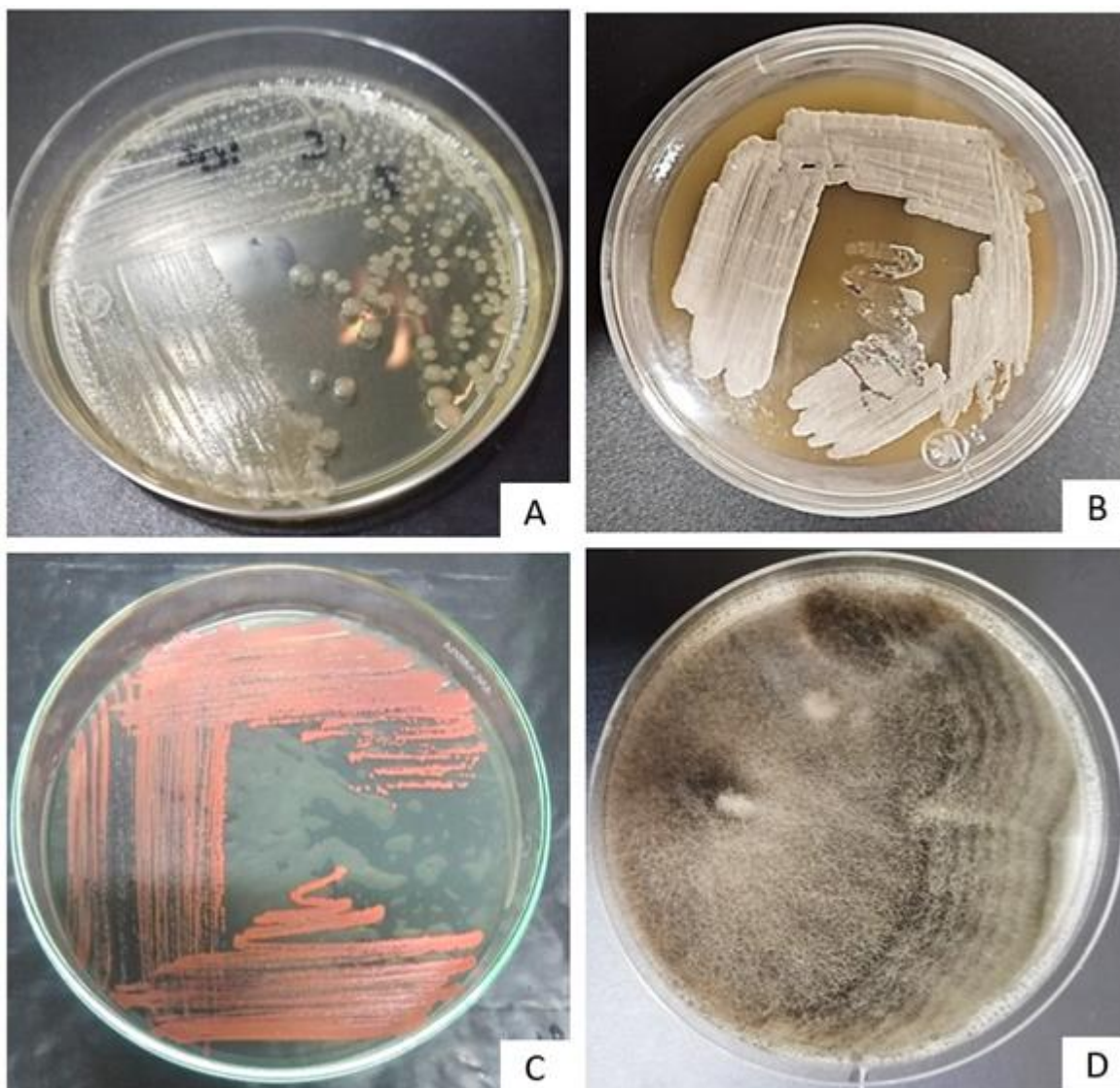


Figura 2. Morfología macroscópica de microorganismos aislados de suelos. A. Bacterias; B. Actinobacteria; C. Levaduras y D. Hongo filamentosos.

Figure 2. Macroscopic morphology of microorganisms isolated from soils: A. Bacteria; B. Actinobacteria; C. Yeasts; D. Filamentous fungi. Source: Own elaboration.

Fijación de nitrógeno atmosférico

El nitrógeno, es uno de los nutrientes principales para las plantas y también de los más escasos en el suelo, debido a su alta movilidad y reactividad. Principalmente es proporcionado al suelo mediante fertilizaciones químicas; sin embargo, existe un grupo de microorganismos, especialmente bacterias, que tienen la asombrosa capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, hasta 78 % de la atmósfera, y convertirlo en formas disponibles para que las plantas lo puedan absorber y aprovechar para su crecimiento. En este

of the atmosphere, and convert it into forms that are readily available for plant absorption and growth. Notable microorganisms, such as *Rhizobium* spp. and *Bradyrhizobium* spp., engage in symbiotic nitrogen fixation, meaning they enter the roots of specific plants and form structures known as nodules, where the fixation process occurs. This symbiosis is particularly evident in legumes, including beans, chickpeas, and peas (Bianco y Cenzano, 2018).

Certain bacterial genera established in the rhizosphere do not require a symbiotic relationship with

sentido, existen microorganismos como *Rhizobium* sp y *Bradyrhizobium* sp que fijan nitrógeno atmosférico de manera simbiótica, esto quiere decir que entran en las raíces de las plantas y forman estructuras llamadas nódulos donde se lleva a cabo la fijación. Este proceso sucede de forma específica en leguminosas como el frijol, el garbanzo o el chícharo (Bianco y Cenzano, 2018).

plant roots to fix atmospheric nitrogen. Genera such as *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Gluconacetobacter*, and *Herbaspirillum* perform this process independently, referred to as “free-living” (Bautista-Cruz y Martínez-Gallegos, 2020). The extent of nitrogen fixation by these microorganisms is influenced by the organic matter content and temperature of their environment

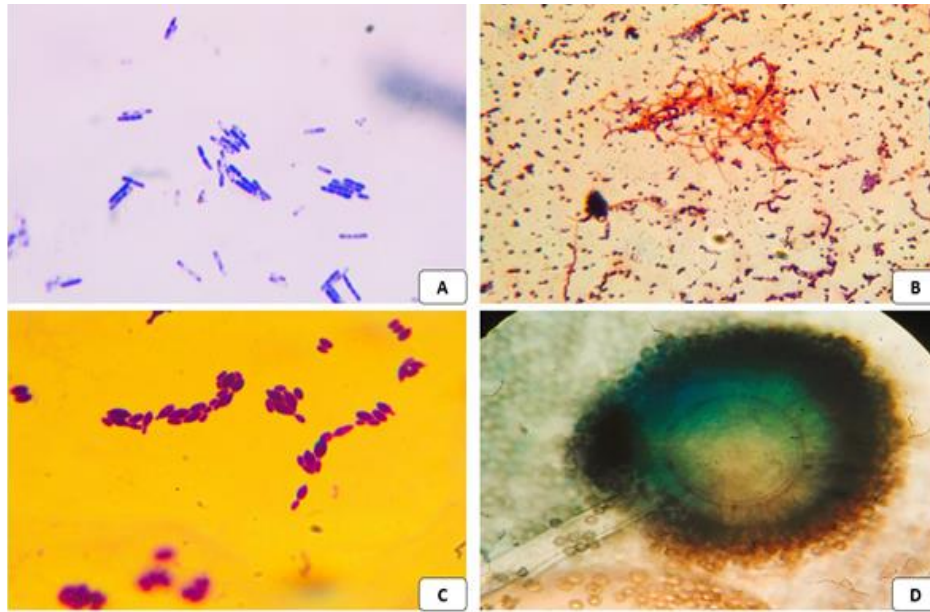


Figura 3. Morfología microscópica de microorganismos aislados de suelos. A. Bacterias; B. Actinobacteria; C. Levaduras y D. Hongo filamentoso Fuente: elaboración propia.

Figure 3. Microscopic morphology of microorganisms isolated from soils: A. Bacteria; B. Actinobacteria; C. Yeasts; D. Filamentous fungi. Source: Own elaboration.

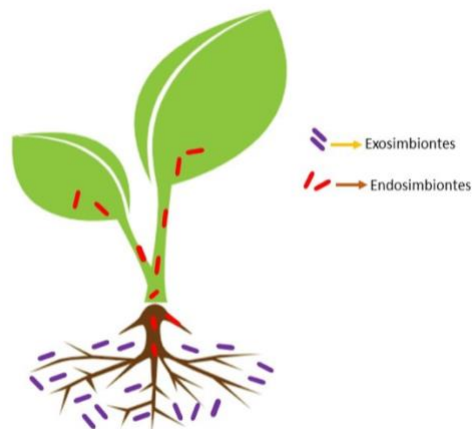


Figura 4. Microorganismos endosimbiontes y exosimbiontes. Fuente: elaboración propia

Figure 4. Endosymbionts and exosymbionts microorganisms. Source: Own elaboration.

Cabe mencionar que algunos géneros bacterianos que se establecen en la rizósfera, no necesitan una relación simbiótica con las raíces para fijar nitrógeno atmosférico. Géneros como *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Gluconacetobacter* y *Herbaspirillum*, realizan este proceso de forma individual conocido como “de vida libre” (Bautista-Cruz y Martínez-Gallegos, 2020) (Figura 5). La cantidad de nitrógeno que pueden fijar los microorganismos depende del contenido de materia orgánica y temperatura que se encuentren en su hábitat. Se sabe que al aplicar *Azospirillum* sp en cultivos de trigo y maíz se puede aportar por este proceso de fijación biológica del 5 % al 18 % del contenido de nitrógeno total de la planta. Las bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico son un gran potencial para disminuir la cantidad de fertilizantes nitrogenados químicos; ya que la aplicación excesiva de estos en el suelo ocasiona pérdida de fertilidad, productividad y genera contaminación (Castaño *et al.*, 2021).

Solubilización de fosfatos

La cantidad de fósforo disponible en el suelo suele ser pequeña para los requerimientos nutricionales de los cultivos, ya que la mayoría se encuentra formando complejos químicos insolubles con otros minerales presentes en el suelo como calcio, hierro y aluminio, en forma de fosfato tricálcico (Ca_3PO_4), fosfato de hierro (FePO_4), fosfato de aluminio (AlPO_4), formas químicas que las plantas no pueden absorber (Corrales *et al.*, 2014; Arias-Mota *et al.*, 2019). Algunos microorganismos tienen la capacidad de solubilizar estos complejos, mediante la utilización de los azúcares que exudan las raíces de las plantas, los cuales son metabolizados; en este proceso liberan ácidos orgánicos como: ácido butírico, oxálico, málico, succínico, láctico, cítrico, que acidifican el suelo, lo cual genera reacciones que separan los fosfatos del calcio, hierro y aluminio del fósforo, dejando asimilable el fósforo para las plantas. Otro mecanismo de los microorganismos para solubilizar el fósforo es mediante la separación de fosfatos por medio de la producción de enzimas (moléculas orgánicas que aceleran la velocidad de la reacción), como las fosfatasa ácidas y alcalinas (Díaz *et al.*, 2020) (Figura 5), que son capaces de solubilizar el fósforo procedente de la materia orgánica mediante la hidrólisis de enlaces éster del fosfato orgánico.

Los microorganismos producen estas enzimas en condiciones específicas, cuando hay disponibilidad de materia orgánica como el humus, estiércol, residuos vegetales; en un suelo con bajo nivel de fósforo, estos factores protegen las enzimas y hacen que persistan en el suelo por largo tiempo. Cabe mencionar que las enzimas fosfatasa ácidas actúan en un pH de 4 y las alcalinas en un pH de 9, pero si se producen cambios bruscos de pH las enzimas se pueden inactivar. Algunos géneros de bacterias que realizan este mecanismo son *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*; actinomicetos como

Research indicates that the application of *Azospirillum* sp. to wheat and corn crops can contribute 5% to 18% of the total nitrogen content of the plants through this biological fixation process. Atmospheric nitrogen-fixing bacteria present significant potential to reduce reliance on chemical nitrogen fertilizers, as excessive application can lead to diminished soil fertility, reduced productivity, and environmental pollution (Castaño *et al.*, 2021).

Phosphate Solubilization

The availability of phosphorus in soil is typically limited for crop nutritional needs, as most of it exists in insoluble chemical complexes with minerals such as calcium, iron, and aluminum, manifesting as tricalcium phosphate (Ca_3PO_4), iron phosphate (FePO_4), and aluminum phosphate (AlPO_4). These forms are not readily absorbable by plants (Corrales *et al.*, 2014; Arias-Mota *et al.*, 2019). Certain microorganisms possess the capability to solubilize these complexes by utilizing the sugars exuded by plant roots, metabolizing them to release organic acids including butyric, oxalic, malic, succinic, lactic, and citric acids, which acidify the soil. This acidification initiates reactions that release phosphates from calcium, iron, and aluminum, converting them into a form assimilable by plants. Additionally, microorganisms solubilize phosphorus through the secretion of enzymes, such as acid and alkaline phosphatases (Díaz *et al.*, 2020), which accelerate the hydrolysis of ester bonds in organic phosphates. These enzymes are produced under specific conditions when organic matter, including humus, manure, and plant residues, is present. In soils with low phosphorus levels, these factors help protect the enzymes, allowing for prolonged persistence in the soil. It is important to note that acid phosphatases function optimally at a pH of 4, while alkaline phosphatases are effective at a pH of 9; however, significant shifts in pH may inactivate these enzymes. Notable bacterial genera involved in this mechanism include *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Pseudomonas*, and *Rhizobium*, along with actinomycetes such as *Streptomyces* and *Micromonospora* (Fernández y Rodríguez, 2005).

Production of Siderophores

What is a siderophore? Siderophores are organic compounds, often referred to as "chelators," characterized by their low molecular weight. Their primary function is to chelate iron, facilitating its uptake by plant roots, thereby providing an indirect means for iron acquisition (see Figure 6). It is important to note that iron is a vital nutrient for plants, as it plays a crucial role in processes such as respiration, photosynthesis, and nitrogen fixation. However, in the soil, iron is often bound to oxides, rendering it unavailable to plants. This is where the role of siderophores becomes significant. Certain bacteria, including *Bacillus firmus*,

Streptomyces y *Micromonospora* (Fernández y Rodríguez, 2005).

Bacillus amyloliquefaciens, *Pseudomonas aureofaciens*, *Pseudomonas putida*, and actinobacteria of the genus *Streptomyces*, are known to produce these compounds (León-Fajardo *et al.*, 2019).

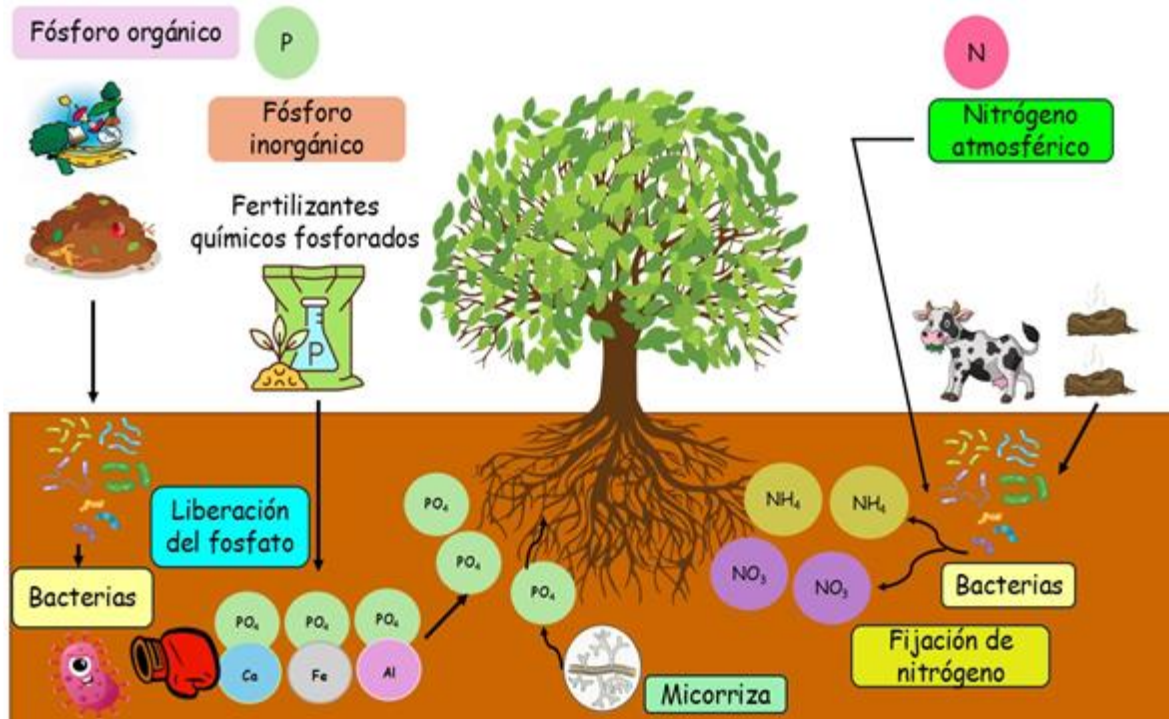


Figura 5. Función de las bacterias en la liberación de fosfato y fijación de nitrógeno. Fuente: elaboración propia.

Figure 5. Role of bacteria in phosphate release and nitrogen fixation. Source: Own elaboration.

Producción de sideróforos

¿Qué es un sideróforo? son compuestos orgánicos también llamados “quelantes” de bajo peso molecular, su acción es atraer el hierro hacia las raíces de la planta para que lo pueda absorber, esta es una manera indirecta de la adquisición del hierro (Figura 6). Cabe mencionar que el hierro, es un nutriente esencial para las plantas debido a que actúa en procesos como la respiración, fotosíntesis y fijación de nitrógeno; en el suelo se encuentra unido con óxidos y esto los hace no disponibles para las plantas. Es en esta etapa donde entra la acción de los sideróforos, algunas bacterias que producen estos compuestos son *Bacillus firmus*, *Bacillus amyloliquefaciens* y *Pseudomonas aureofaciens*. *Pseudomonas putida*; y actinobacterias del género *Streptomyces* (León-Fajardo *et al.*, 2019).

Producción de fitohormonas

Los microorganismos por procesos propios de su metabolismo primario y secundario sintetizan y excretan hacia su exterior, ciertos compuestos orgánicos que tienen

Production of Phytohormones

Microorganisms synthesize and excrete specific organic compounds through processes associated with their primary and secondary metabolism, which function as growth regulators for plants. For instance, tryptophan, an essential amino acid, initiates the synthesis pathway of the plant hormone auxins, enhancing root production and facilitating greater soil exploration for nutrient acquisition. Adenine, a nitrogenous base integral to DNA, serves as the precursor for cytokinins, which play a role in fruit development; phenylalanine functions as a precursor for salicylic acid, another plant hormone, which accelerates flowering and bolsters resistance to drought. Carotene promotes the production of abscisic acid, crucial for seed development and maturation. Additionally, amino acids such as glutamic acid, threonine, glycine, and arginine stimulate the production of gibberellins, which are essential for seed germination (Cadena-Zamudio *et al.*, 2016) (Table 1). It is important to note that plants produce hormones in low quantities; however, microorganisms stimulate an increase in these hormones to promote plant growth. Notable genera and

actividad como reguladores del crecimiento para las plantas. Por ejemplo, el triptófano, conocido como un aminoácido esencial que induce la vía de síntesis de una de las hormonas vegetales llamadas auxinas, las cuales aumentan la producción de raíces y de esta manera la planta mejora la exploración en el suelo y puede encontrar más nutrientes; la adenina, que es una base nitrogenada constituyente del ADN, actúa como el precursor de otras hormonas vegetales llamadas citoquininas, estas intervienen en el desarrollo del fruto; la fenilalanina, tiene acción como el precursor del ácido salicílico clasificado como otra hormona vegetal, la cual acelera la floración y aumenta la resistencia a la falta de agua; el caroteno, induce la producción de ácido abscísico que interviene en el desarrollo y maduración de las semillas; otros aminoácidos como el ácido glutámico, treonina, glicina y arginina son iniciadores de la producción de giberelinas que estimulan la germinación de las semillas (Cadena-Zamudio *et al.*, 2016) (Tabla 1). Cabe destacar que las plantas producen hormonas en baja cantidad, pero los microorganismos estimulan el aumento del contenido de estas para incrementar el crecimiento vegetal. Algunos géneros y especies de bacterias que producen fitohormonas son: *Azospirillum brasilense*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus licheniformis*, *Rhizobium leguminosarum* y *Pseudomonas*; y actinobacterias como *Frankia*, *Micromonospora* y *Streptomyces* (Ona-Yanez, 2021).

species of bacteria that produce phytohormones include *Azospirillum brasilense*, *Bradyrhizobium japonicum*, *Bacillus licheniformis*, *Rhizobium leguminosarum*, and *Pseudomonas*, as well as actinobacteria such as *Frankia*, *Micromonospora*, and *Streptomyces* (Ona-Yanez, 2021).

Enemies of Harmful Microorganisms to Plants

Microorganisms present in the rhizosphere engage in continuous competition to associate with plant roots, alongside another category of microorganisms that pose a threat to plants, namely pathogens, which can cause damage or even mortality. Bacteria, actinobacteria, and fungi possess the capacity to exert antagonistic activity against pathogenic microorganisms through various mechanisms, including the production of:

- 1) Lytic enzymes that degrade the cell wall of harmful microorganisms, resulting in cellular rupture of the pathogen.
- 2) Volatile compounds some of these are detected by plants and serve to activate the plant's own defense mechanisms, indicating potential danger from phytopathogen attacks.
- 3) Antibiotics, fundamental part of the also known as biocontrol, which may be volatile or non-volatile compounds that inhibit the growth and development of microorganisms.
- 4) Competition, the struggle among microorganisms for nutrient acquisition, leading to the detriment of one microorganism to benefit another.

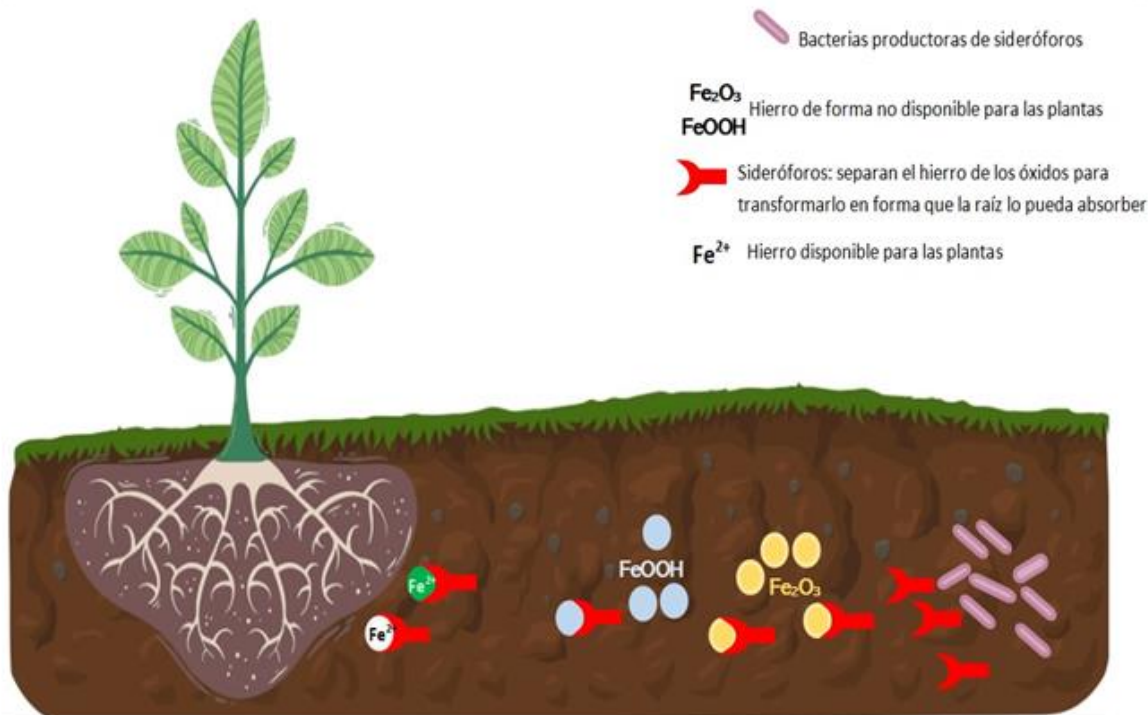


Figura 6. Función de los sideróforos en la adquisición de hierro para las plantas. Fuente: elaboración propia.

Figure 6. Function of siderophores in the acquisition of iron for plants. Source: own elaboration.

Tabla 1. Iniciadores de hormonas vegetales y funciones en la planta.

Table 1. Plant hormone initiators and functions in the plant.

Iniciador de la producción de fitohormonas	Fitohormona	Funciones de las fitohormonas en la planta
Triptófano	Auxina	Causa división celular. Formación y alargamiento de tallos. Producción de raíces.
Adenina	Citoquinina	División celular. Evita el envejecimiento de la planta. Acelera la germinación de las semillas. Estimulacrecimiento de brotes laterales de tallos y raíces. Necesaria para la maduración de los frutos.
Fenilalanina	Ácido salicílico	Controla la actividad de fotosíntesis con cierre de estomas. Acelera la floración. Induce resistencia en plantas en ambiente con poca agua y salinidad
Acido glutámico, treonina, glicina, prolina y arginina	Giberelinas	Acelera la germinación de las semillas. Aumenta el desarrollo de los tejidos de la planta. Participa en el proceso de la floración.
Ácido aspártico y metionina	Etileno	Acelera la maduración de los frutos. Promueve la formación de raíces laterales. En baja concentración potencializa la acción de la auxina y citoquina.
Carotenoides	Ácido abscísico	Regula el cierre y apertura de los estomas. Induce a la activación de la resistencia de la planta. Interviene en el desarrollo y maduración de semillas.

Enemigos de microorganismos perjudiciales para las plantas

Los microorganismos que se encuentran en la rizósfera, están en una competencia y lucha constante por asociarse con las raíces de las plantas junto con otro grupo de microorganismos que pueden ser nocivos para las plantas, es decir, son patógenos y les pueden provocar daños e inclusive la muerte. Las bacterias, actinobacterias y hongos tienen la capacidad de ejercer un efecto contra los microorganismos patógenos llamado actividad antagónica; esta acción se lleva a cabo mediante diferentes mecanismos con la producción de:

- 1) Enzimas líticas que degradan la pared celular del microorganismo perjudicial, esto ocasiona la ruptura celular del patógeno.
- 2) Compuestos volátiles, algunos de estos son detectados por las plantas y funcionan como un activador de los mecanismos de defensa propios de la planta que indican que está en peligro por el ataque de un fitopatógeno (Figura 7).
- 3) Antibióticos, parte fundamental del también llamado biocontrol, estos pueden ser compuestos volátiles y no volátiles, los cuales inhiben el crecimiento y desarrollo de microorganismos.

5) Amensalism, also known as antagonism, in which microorganisms inhibit the growth and survival of pathogenic microorganisms (Beneduzi *et al.*, 2012; Vinchira-Villarraga and Moreno-Sarmineto, 2019).

Therefore, the beneficial relationship between plant-microorganisms leads to a joint combat in order to survive in the surrounding environment that sometimes becomes hostile due to the presence of pathogenic microorganisms.

Induction of Systemic Resistance in Plants by Microorganisms

In agricultural crops, most plants are in contact with harmful microorganisms, which cause a loss in fruit or seed yield. To solve the problems caused by harmful microorganisms to plants, integrated pest management is used, which consists of phyto-genetic controls, varietal, biological, chemical and biochemical resistances, which have an impact on the environment (Delgado-Oramas, 2020). Therefore, for several years, the natural capacity of plants to protect themselves from harmful microorganisms has been studied through a phenomenon known as resistance systemic induced.

The induction of systemic resistance is a mechanism

4) Competencia: lucha entre microorganismos para obtener los nutrientes, donde implica el daño de un microorganismo para que el otro pueda sobrevivir.

Amensalismo: también llamado antagonismo, en esta relación los microorganismos impiden el desarrollo y supervivencia del microorganismo patógeno (Beneduzi *et al.*, 2012; Vinchira-Villarraga y Moreno-Sarmineto, 2019).

Por lo anterior, la relación benéfica entre planta-microorganismos, conlleva a un combate en conjunto para poder sobrevivir en el ambiente circundante que a veces se torna hostil por la presencia de microorganismos patógenos.

that plants utilize to defend against pathogen attacks. It involves the recognition of a pathogen by the plant, followed by an immediate signaling response that activates defense proteins and enzymes. The interaction between a specific pathogen and a plant species is characterized by specificity and reliability. Upon recognition, the plant's response is initiated by an increase in the expression of defense genes, resulting in biochemical, cellular, and structural changes. These changes include the physical strengthening of cell walls through the production of lignins and callus formation,

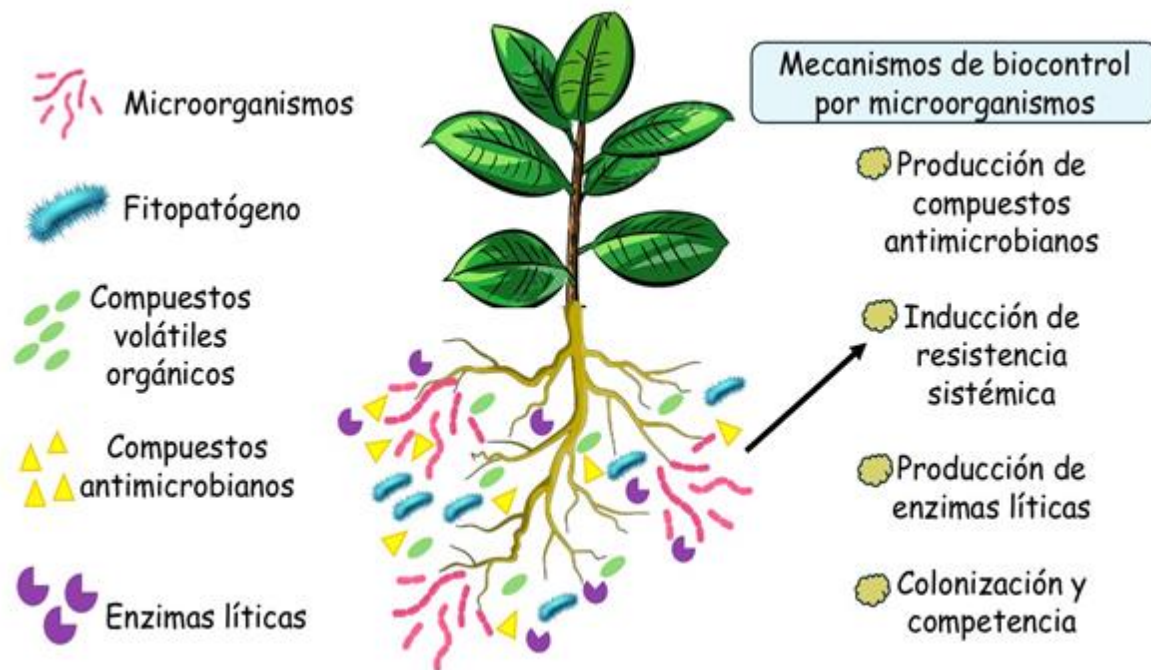


Figura 7. Mecanismos de biocontrol de microorganismos contra fitopatógenos en plantas. Fuente: elaboración propia.

Figure 7. Biocontrol mechanisms of microorganisms against phytopathogens in plants. Source: Own elaboration.

Inducción de la resistencia sistémica de las plantas por los microorganismos

En los cultivos agrícolas, la mayoría de las plantas se encuentran en contacto con microorganismos nocivos, que causan una pérdida en el rendimiento de los frutos o semillas. Para resolver los problemas que causan los microorganismos nocivos para las plantas, se utiliza el manejo integrado de plagas que consiste en controles fitogenéticos, resistencias varietales, biológicos, químicos y bioquímicos, los cuales tienen un impacto en el medio ambiente (Delgado-Oramas, 2020). Por lo que, durante varios años, se ha estudiado la capacidad natural que poseen las plantas para protegerse de

as well as an increased production of phytoalexins and antimicrobial proteins such as chitinases, β -1,3-glucanases, peroxidases, and pathogenesis-related proteins (De-Bashan *et al.*, 2007). The enhancement of defense-related gene expression is regulated by signaling molecules, including ethylene, jasmonic acid, and salicylic acid (Laredo *et al.*, 2017).

Induced systemic resistance has been shown to be augmented by plant growth-promoting rhizobacteria, such as *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Gluconacetobacter*, *Pseudomonas*, and *Bacillus*. Notably, the *Bacillus* genus can induce defense mechanisms against viral diseases (Pedraza *et al.*, 2020). This underscores the beneficial nature of the

los microorganismos nocivos, a través de un fenómeno conocido como inducción de la resistencia sistémica.

La inducción de la resistencia sistémica, son mecanismos que han desarrollado las plantas para defenderse de ataques de patógenos, el cual consiste en el reconocimiento del patógeno por la planta y una inmediata respuesta de señalización para activar defensas como proteínas y enzimas.

La resistencia sistémica inducida se ha demostrado que puede ser potenciada por rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, como *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Gluconacetobacter*, *Pseudomonas* y *Bacillus*; en particular *Bacillus* sp, puede inducir mecanismos de defensa contra enfermedades producidas por virus (Pedraza *et al.*, 2020). Con lo anterior se evidencia que la asociación eterna de plantas y microorganismos es benéfica en diversos aspectos de la salud de las especies vegetales. La interacción entre un patógeno particular y una especie de planta es específica e invariable y después del reconocimiento comienza la respuesta de la planta con un incremento en la expresión de genes de defensa que ocasionan diversos cambios bioquímicos, celulares y estructurales como: el fortalecimiento físico de las paredes celulares por la producción de ligninas y formación de callo, se incrementa la producción de fitoalexinas y se induce la producción de proteínas antimicrobianas como las quitinasas, β -1,3-glucanases o peroxidases, y las proteínas relacionadas con la patogénesis (De-Bashan *et al.*, 2007). El aumento en la expresión de los genes relacionados con la defensa está regulado por moléculas de señalización como el etileno, el ácido jasmónico y el ácido salicílico (Laredo *et al.*, 2017). En muchos de los casos, las asociaciones entre plantas-microorganismos benéficos para el crecimiento vegetal, contribuyen a la producción de proteínas, enzimas o sustancias antimicrobianas y antifúngicas que tienen un efecto positivo para prevenir los efectos de los patógenos.

Conclusión

Las interacciones entre los microorganismos en el suelo y las raíces de las plantas pueden ser benéficas ya que en la rizosfera se lleva a cabo el compartimiento de nutrientes, aminoácidos y proteínas, donde las bacterias, actinobacterias, hongos micorrízicos arbusculares levaduras y hongos filamentosos utilizan la fuente de sustancias excretadas por las raíces de las plantas, para sobrevivir y poder realizar la colonización endosimbótica, exosimbótica. Los mecanismos de promoción de crecimiento vegetal como la intervención en los ciclos biogeoquímicos de la naturaleza como la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfatos, producción de sideróforos y fitohormonas que apoyan el crecimiento vegetal y la buena sanidad vegetal. También existen algunas relaciones perjudiciales que llegan a interrumpir el ciclo de vida de las plantas, pero los microorganismos benéficos del

enduring association between plants and microorganisms in promoting the health of plant species

The interaction between a particular pathogen and a plant species is specific and invariable and after recognition the plant response begins with an increase in the expression of defense genes that cause various biochemical, cellular and structural changes such as: physical strengthening of cell walls by lignin production and callus formation, increased production of phytoalexins and induced production of antimicrobial proteins such as chitinases, β -1,3-glucanases or peroxidases, and pathogenesis-related proteins (De-Bashan *et al.*, 2007). Increased expression of defense-related genes is regulated by signaling molecules such as ethylene, jasmonic acid and salicylic acid (Laredo *et al.*, 2017). In many of the cases, plant-microorganism associations beneficial to plant growth contribute to the production of proteins, enzymes or antimicrobial and antifungal substances that have a positive effect in preventing the effects of pathogens.

Conclusion

The interactions between microorganisms in the soil and plant roots can be beneficial because in the rhizosphere is carried out the sharing of nutrients, amino acids and proteins, where bacteria, actinobacteria, arbuscular mycorrhizal fungi, yeasts and filamentous fungi use the source of substances excreted by plant roots, to survive and to perform endosymbiotic, exosymbiotic colonization. L, plant growth promoting mechanisms such as intervention in the biogeochemical cycles of nature like nitrogen fixation, phosphate solubilization, production of siderophores and phytohormones that support plant growth and good plant health. There are also some harmful relationships that come to interrupt the life cycle of plants, but beneficial soil microorganisms will have a good friendship with plants for the protection of pathogenic enemies with the production of substances and induction of systemic resistance, which supports the preservation of ecosystems and avoid the massive use of agrochemicals that have a negative impact on the environment.

suelo tendrán una buena amistad con las plantas para la protección de enemigos patógenos con la producción de sustancias e inducción de la resistencia sistémica, lo anterior, apoya en la preservación de los ecosistemas y evitar el uso masivo de agroquímicos que tiene un impacto negativo en el medio ambiente.

Referencias

- Alcantara-Cortes, J. S., Acero Godoy, J., Alcántara Cortés, J. D., & Sánchez Mora, R. M. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*, *17*(32), 109-129. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-24702019000200109&script=sci_arttext
- Arias-Mota, R. M., Romero-Fernández, A. D. J., Bañuelos-Trejo, J. & Cruz-Elizondo, Y. D. L. (2019). Inoculación de hongos solubilizadores de fósforo y micorrizas arbusculares en plantas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *10*(8), 1747-1757. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1558>
- Ayan, L. R., Coutiño, P. M., González, M. M., Vázquez, R. L., & Hernández, F. G. (2021). Microorganismos del suelo y sus usos potenciales en la agricultura frente al escenario del cambio climático. *Magna Scientia UCEVA*, *1*(1), 104-117. <https://doi.org/10.54502/msuceva.v1n1a14>
- Bautista-Cruz, A. & Martínez-Gallegos, V. (2020). Promoción del crecimiento de *Agave potatorum* Zucc. por bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre. *Terra latinoamericana*, *38*(3), 555-567. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.647>
- Beneduzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and molecular biology*, *35*, 1044-1051. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572012000600020>
- Bianco, L. & Cenzano, A. M. (2018). Leguminosas nativas: estrategias adaptativas y capacidad para la fijación biológica de nitrógeno. Implicancia ecológica. *Idesia (Arica)*, *36*(4), 71-80. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005002601>
- Cabrera, E. V. R., Bonilla, B., & Aguilar, M. (2018). Interacciones entre plantas y bacterias promotoras de crecimiento vegetal. *Revista Citecsa*, *10*(15), 23. <https://www.proquest.com/openview/095b7a5b32005fa2df9eba0e53d63903/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2043072>
- Cadena-Zamudio, J. D., Martínez-Peña, M. D., Guzmán-Rodríguez, L. F., Arteaga-Garibay, R. I., & De Morelos, T. (2016). Aplicación de secuenciación masiva para el estudio y exploración de diversidad microbiana y su aprovechamiento biotecnológico. *Agroproductividad*, *9*(2), 70-83. [https://revista-](https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/723)
- <https://doi.org/10.22490/21456453.4040>
- Castaño, A. M. P., Durango, D. P. M., Polanco-Echeverry, D., & Arias, J. A. C. (2021). Rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR): Una revisión sistemática 1990-2019. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *12*(2), 161-178. <https://doi.org/10.22490/21456453.4040>
- Corrales Ramirez, L. C., Arevalo Galvez, Z. Y., & Moreno Burbano, V. E. (2014). Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *Nova*, *12*(21), 68-79. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-24702014000100006&script=sci_arttext
- Cavalier-Smith, T. (1998). A revised six-kingdom system of life. *Biological Reviews*, *73*(3), 203-266.
- De-Bashan, L. E., Holguin, G., Glick, B. R., & Bashan, Y. (2007). *Microbiología agrícola. Hongos, bacterias, micro y macrofauna, control biológico, planta-microorganismo*. Bacterias promotoras de crecimiento en plantas para propósitos agrícolas y ambientales. Editorial Trillas, 170-224. https://www.researchgate.net/publication/255484106_Plant_growthpromoting_bacteria_for_agriculture_and_the_environment
- Delgado-Oramas, B. P. (2020). La resistencia inducida como alternativa para el manejo de plagas en las plantas de cultivo. *Revista de Protección Vegetal*, *35*(1).
- Díaz Lezcano, M. I., Fiori Fernández, C., Ayala Aguilera, L., Yubero, F., Martínez López, R., & López, M. (2020). Actividad de fosfatasa-alcalina y crecimiento del arroz con inoculación biológica y micronutrientes. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *11*(3), 481-492. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i3.1873>
- Fernández, M. T., & Rodríguez, H. (2005). El papel de la solubilización de fósforo en los biofertilizantes microbianos. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, *39*(3), 27-34. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120688005.pdf>
- aredo Alcalá, E. I.,
- Martínez Hernández, J. L., Iliná, A., Guillen Cisneros, L., & Hernández Castillo, F. D. (2017). Aplicación de ácido jasmónico como inductor de resistencia vegetal frente a patógenos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *8*(3), 673-683. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.40>
- León-Fajardo, M., Mancilla-Felipez J. D., & Ortuño-Castro, F. N. (2019). Evaluación de bacterias endófitas promotoras de crecimiento en el cultivo de quinua. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, *7*(2), 88-99. http://www.scielo.org.bo/pdf/jsab/v7n2/v7n2_a03.pdf
- Moreno-Reséndez, A., Carda-Mendoza, V., Reyes-Carrillo, J. L., Vásquez-Arroyo, J., & Cano-Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una

alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68-83.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-34752018000100068&script=sci_arttext

Ona-Yanez, L. (2021). Plantas y microorganismos rizosféricos: Una vía sostenible para generar crecimiento vegetal. *Revista Científica Interdisciplinaria Investigación Y Saberes*, 11(3), 110-131. <https://orcid.org/0000-0001-5958-9057>

Pedraza, L. A., López, C. E., & Uribe-Vélez, D. (2020). Mecanismos de acción de *Bacillus* spp. contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con plantas. *Acta biológica colombiana*, 25(1), 112-125.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120548X2020000100112&script=sci_abstract&tlng=en

Woese, C. R., Kandler, O., & Wheelis, M. L. (1990). Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(12), 4576-4579.