



UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO  
FACULTAD DE POSGRADO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

BACILLUS SUBTILIS COMO ESTRATEGIA DE CONTROL BIOLÓGICO  
CONTRA PSEUDOCERCOSPORA FIJIENSIS EN BANANO: ALCANCES Y  
PERSPECTIVA

Autor:

MARIA MERCEDES VARGAS MENDOZA  
GARCÍA BAJAÑA BRAYAN HERNÁN

Director:

SEVILLA CARRASCO JAIME DAVID

*Milagro, 2026*

# ***Bacillus subtilis* as a biological control strategy against *Pseudocercospora fijiensis* in banana: scope and perspectives.**

## ***Bacillus subtilis* como estrategia de control biológico contra *Pseudocercospora fijiensis* en banano: alcances y perspectivas.**

**Autores:**

Vargas-Mendoza, María Mercedes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Biotecnología, Universidad Estatal De Milagro (UNEMI), Milagro, Ecuador.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2272-3867> Correo: [mvargasm22@unemi.edu.ec](mailto:mvargasm22@unemi.edu.ec)

García-Bajaña, Brayan Hernán<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Maestría en Biotecnología, Universidad Estatal De Milagro (UNEMI), Milagro, Ecuador.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0643-5303> Correo: [bgarciab6@unemi.edu.ec](mailto:bgarciab6@unemi.edu.ec)

Sevilla-Carrasco, Jaime David<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Maestría en Biotecnología, Universidad Estatal De Milagro (UNEMI), Milagro, Ecuador.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5257-299X> Correo: [jsevillac@unemi.edu.ec](mailto:jsevillac@unemi.edu.ec)

**\*Autor para correspondencia:** [mvargasm22@unemi.edu.ec](mailto:mvargasm22@unemi.edu.ec)

### **Resumen**

El banano constituye un pilar económico y social en Ecuador, sin embargo, enfrenta la amenaza crítica de la Sigatoka negra (*Pseudocercospora fijiensis*), enfermedad que compromete la productividad y competitividad internacional. El manejo convencional basado en fungicidas químicos ha generado resistencia del patógeno, altos costos y efectos ambientales adversos, lo que justifica explorar alternativas sostenibles como *Bacillus subtilis*. En el estudio, se **propuso** analizar el potencial de *Bacillus subtilis* como estrategia de control biológico frente a la Sigatoka negra, describir sus mecanismos de acción e integrar evidencia científica en distintos contextos experimentales. Se realizó una revisión narrativa de literatura científica publicada entre 2020 y 2025, integrando estudios experimentales, ensayos de campo y revisiones internacionales, considerando parámetros epidemiológicos, fisiológicos y productivos. La evidencia demuestra que *Bacillus subtilis* reduce la severidad de la enfermedad, prolonga la longevidad foliar, mejora el desarrollo vegetativo y aumenta el rendimiento comercial del banano. Sus mecanismos de acción incluyen la producción de lipopéptidos antifúngicos que desestabilizan membranas fúngicas, la inhibición de la germinación de esporas y la inducción

de resistencia sistémica en la planta. Además, la optimización de medios de cultivo con residuos agroindustriales fortalece la viabilidad económica del biocontrol. *Bacillus subtilis* constituye una alternativa sostenible que disminuye la dependencia de fungicidas, cumple regulaciones internacionales y consolida la competitividad del banano ecuatoriano; sin embargo, la evidencia permanece dispersa y limitada a escalas reducidas, exigiendo la realización de investigaciones y protocolos estandarizados para garantizar su aplicabilidad en sistemas productivos reales.

**Palabras clave:** *Bacillus subtilis*; Banano; Biocontrol; *Pseudocercospora fijiensis*; Sigatoka negra; Sostenibilidad

### Abstract

Banana constitutes an economic and social pillar in Ecuador; however, it faces the critical threat of Black Sigatoka (*Pseudocercospora fijiensis*), a disease that compromises productivity and international competitiveness. Conventional management based on chemical fungicides has generated pathogen resistance, high costs, and adverse environmental effects, which justifies exploring sustainable alternatives such as *Bacillus subtilis*. This study aimed to analyze the potential of *Bacillus subtilis* as a biological control strategy against Black Sigatoka, describe its mechanisms of action, and integrate scientific evidence across different experimental contexts. A narrative review of scientific literature published between 2020 and 2025 was conducted, integrating experimental studies, field trials, and international reviews, considering epidemiological, physiological, and productive parameters. Evidence demonstrates that *Bacillus subtilis* reduces disease severity, prolongs leaf longevity, improves vegetative development, and increases the commercial yield of banana. Its mechanisms of action include the production of antifungal lipopeptides that destabilize fungal membranes, inhibition of spore germination, and induction of systemic resistance in the plant. Furthermore, the optimization of culture media with agro-industrial residues strengthens the economic viability of biocontrol. *Bacillus subtilis* represents a sustainable alternative that reduces dependence on fungicides, complies with international regulations, and consolidates the competitiveness of Ecuadorian banana; however, the evidence remains scattered and limited to small-scale studies, requiring further large-scale research and standardized protocols to ensure its applicability in real production systems.

**Keywords:** *Bacillus subtilis*; Banana; Biocontrol; *Pseudocercospora fijiensis*; Black Sigatoka; Sustainability.

**Fecha de recibido: 18 de junio 2026**

**Fecha de aceptado: 18 de junio 2026**

**Fecha de publicado: 20 de junio 2026**

## **Introducción**

El cultivo de banano (*Musa* spp.) es el principal pilar de la economía agrícola y de exportación no petrolera del Ecuador, alcanzando en 2025 un récord cercano a los 377 millones de cajas exportadas (Asociación de Comercialización y Exportación de Banano del Ecuador [ACORBANEC], 2026). A pesar de este liderazgo global, la sostenibilidad de la industria enfrenta desafíos críticos debido a factores físicos, químicos y biológicos que afectan su rendimiento. En los ecosistemas tropicales, variables como las condiciones climáticas fluctuantes, la degradación del suelo y la presión de organismos patógenos son determinantes en la productividad. La falta de una gestión adecuada de estas variables impacta directamente el sistema productivo, reduciendo la calidad del fruto y comprometiendo la estabilidad de toda la cadena agrícola (Villegas Alpízar y Araya Villalobos, 2021).

Dentro del complejo de enfermedades foliares en musáceas, la Sigatoka negra, causada por el hongo *Pseudocercospora fijiensis*, es la amenaza fitopatológica más destructiva a nivel mundial debido a la severa defoliación y pérdidas económicas que ocasiona (Cruz Martín et al., 2020; Salvador Adriano Anaya et al. 2025). Actualmente, el manejo de esta micosis se basa casi exclusivamente en el uso intensivo de fungicidas químicos por su eficacia inmediata; sin embargo, esta práctica genera resistencia en el patógeno, eleva los costos de producción y provoca efectos ambientales adversos. Al presentar limitaciones que comprometen la sostenibilidad biológica y operativa del cultivo a largo plazo, resulta imprescindible explorar alternativas como *Bacillus subtilis*, bacteria capaz de ofrecer soluciones biológicas seguras y duraderas que resguarden la productividad agrícola y reduzcan el impacto ecológico (Cruz Martín et al., 2020).

En esta nueva perspectiva, las investigaciones científicas señalan que *Bacillus subtilis* produce compuestos proteicos con actividad antifúngica *in vitro* frente al patógeno, lo que refuerza la base molecular de su acción y abre la posibilidad de un manejo biológico sostenible. Asimismo, las evidencias obtenidas en condiciones de campo demuestran que la aplicación de la cepa *Bacillus subtilis* ANT01 reduce significativamente la severidad de la Sigatoka negra en plátano macho (*Musa balbisiana*), lo que confirma su eficacia como agente biológico capaz de disminuir la dependencia de fungicidas químicos.

A pesar de estos avances científicos significativos, surge un vacío de conocimiento crítico debido a que la información se encuentra sumamente dispersa en diferentes investigaciones, reportes locales y tesis académicas con variabilidad metodológica, lo que dificulta comprender de manera integral su efectividad general, sus modos de acción específicos y su viabilidad dentro del contexto productivo real. Con el propósito de resolver este conflicto documental y centralizar la evidencia empírica reciente, se plantea la siguiente interrogante central de investigación: ¿Cuál es el potencial de *Bacillus subtilis* como estrategia de control biológico frente a *Pseudocercospora fijiensis* en el cultivo de banano, según la evidencia científica

reciente? La motivación del autor para elegir este tema y realizar la presente revisión bibliográfica de tipo narrativa radica en la necesidad imperativa de integrar, sistematizar y analizar críticamente la literatura científica reciente para identificar los patrones de éxito biológico del antagonista y delimitar sus cuellos de botella en sistemas agrícolas modernos.

Científicamente, esta revisión se justifica por la necesidad de proveer un marco analítico que fortalezca el conocimiento sobre el control biológico en cultivos tropicales, aportando valor conceptual a la microbiología agrícola, la fitopatología y la biotecnología aplicada. Comprender de forma teórica cómo actúa *Bacillus subtilis* mediante la síntesis de compuestos antifúngicos y la activación de defensas en la planta permite profundizar en la dinámica entre microorganismos benéficos y fitopatógenos. En el ámbito práctico, el estudio aporta fundamentos sólidos para implementar estrategias sostenibles en la producción bananera, optimizar costos y reducir el riesgo de resistencia; un aspecto estratégico para el Ecuador, donde este cultivo es un pilar de las exportaciones no petroleras. Finalmente, el carácter innovador del trabajo radica en la integración sistemática de la evidencia científica generada entre 2020 y 2025, lo que ofrece una visión global del fenómeno para identificar oportunidades de aplicación real y establecer bases firmes hacia la sostenibilidad del sector.

Para responder a la pregunta planteada y delimitar el alcance de esta revisión, el texto se organiza en seis secciones principales que corresponden a los objetivos específicos del estudio. Tras este marco introductorio, la primera sección analiza el efecto de *Bacillus subtilis* sobre los índices de severidad de la Sigatoka negra. La segunda sección evalúa el impacto de la inoculación bacteriana en el desarrollo vegetativo y los parámetros de rendimiento agronómico del cultivo. La tercera sección examina la producción biotecnológica de metabolitos secundarios y la optimización de los medios de cultivo. La cuarta sección detalla los mecanismos de inhibición celular sobre las estructuras reproductivas de *Pseudocercospora fijiensis*. Posteriormente, la quinta sección ofrece un análisis comparativo de las dosis de aplicación, metodologías de inoculación y diseños experimentales utilizados en la literatura. Finalmente, la sexta sección valora el potencial de la bacteria como alternativa sostenible dentro del escenario productivo del banano en el Ecuador.

### **Efecto sobre los índices de severidad de la Sigatoka negra**

La Sigatoka negra, causada por *Pseudocercospora fijiensis*, constituye la enfermedad foliar más devastadora del banano y plátano en regiones tropicales. Su impacto se mide oficialmente mediante el Índice de Severidad de Stover y Dickson, modificado por Gauhl, que permite cuantificar el daño en el follaje y evaluar la eficacia de estrategias de control. En los últimos años, el uso de *Bacillus subtilis* como biocontrolador ha demostrado resultados significativos en la reducción de la severidad, el retraso en la evolución de síntomas y la prolongación de la longevidad foliar.

#### **Índices epidemiológicos estándar**

En México, Salvador Adriano et al. (2025) demostraron que la aplicación de *Bacillus subtilis* ANT01 disminuyó la severidad en un 58.1%, validando su impacto directo en la escala de

Stover-Dickson y consolidando su papel como alternativa sostenible frente a fungicidas químicos. De manera complementaria, Castillo Arévalo (2022) en Nicaragua comparó tratamientos biológicos y químicos, encontrando que la combinación de *Trichoderma sp.* y *Bacillus subtilis* alcanzó la menor severidad registrada (30.26%), incluso superior al control químico, lo que confirma que los biocontroladores pueden igualar o superar la eficacia de los fungicidas sintéticos en condiciones de campo. En Ecuador, García Sánchez et al. (2022) reportó que la integración de agentes microbiológicos como *Bacillus sp.* junto con fungicidas minerales disminuyó el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), reforzando la importancia de incorporar biocontroladores en programas de manejo integrado.

#### Dinámica de la evolución de síntomas

La acción de *Bacillus subtilis* también se refleja en el retraso de la progresión sintomática de la Sigatoka negra. Adriano Anaya et al. (2023) observaron que la mezcla de extractos alcohólicos de clavo y ajo, combinada con la bacteria, retrasó la aparición de lesiones críticas y disminuyó el promedio ponderado de severidad (0.67–0.84 frente a 0.95 en el control). García Giraldo et al. (2022) confirmaron que la inoculación con *Bacillus subtilis* EA-CB0575 disminuyó la severidad, y modificó el microbiota rizosférica, fortaleciendo la resistencia sistémica de las plantas. Estos resultados evidencian que el biocontrol es modulador integral de la salud vegetal, retrasando la transición hacia estadios necróticos avanzados.

#### Parámetros de longevidad foliar

Un criterio esencial dentro de los índices epidemiológicos es la evaluación de la longevidad foliar, medida a través de la “hoja más joven enferma” (YLI) y el número de hojas sanas a la floración (NHF). En República Dominicana, Núñez Ramos et al. (2025) reportaron que el YLI se desplazó hacia hojas de mayor edad, mientras que el NHF aumentó, demostrando que *Bacillus subtilis* prolonga la funcionalidad foliar y optimiza la capacidad fotosintética. De manera complementaria, Marcano et al. (2025) evaluaron bacterias promotoras de crecimiento vegetal, incluyendo *Bacillus licheniformis*, en sistemas de banano orgánico, encontrando una disminución significativa en la severidad y un mejor comportamiento en variables de desarrollo y productividad. Estos resultados confirman que la acción del biocontrol fortalece parámetros fisiológicos críticos para el rendimiento agrícola, asegurando mayor vigor vegetativo y resiliencia frente a *Pseudocercospora fijiensis*.

### Impacto en el desarrollo vegetativo y rendimiento agronómico

#### Variables morfológicas vegetativas

La aplicación de *Bacillus subtilis* ha demostrado que estimula el crecimiento vegetativo del banano. En Ecuador, Esteves López (2025) reportó que la combinación de *Bacillus subtilis* con tierra leonardita incrementó la altura de las plantas hasta 283.5 cm en la floración y el diámetro del pseudotallo a 88.83cm, parámetros críticos para la resistencia al vuelco por peso del racimo o vientos fuertes. Estos resultados confirman que la bacteria favorece la tasa de emisión foliar y la robustez estructural, siendo un bioestimulante en los sistemas productivos tropicales.

## Fisiología y arquitectura radicular

La colonización de *Bacillus subtilis* en la rizosfera del banano potencia la fisiología radicular al formar *biofilms* estables sobre las raíces, lo que incrementa su longitud, volumen y biomasa. Este efecto mejora la absorción de agua y nutrientes como fósforo y hierro, mientras la producción de fitohormonas (ácido indolacético y giberelinas) estimula la formación de raíces laterales y fortalece la arquitectura radicular, generando un sistema ramificado y eficiente.

De manera complementaria, Adjei et al. (2025), confirman que las cepas específicas de *Bacillus subtilis*, como la R31, modulan el microbiota rizosférica al crear un entorno favorable para microorganismos benéficos y limitar la presencia de patógenos. Este equilibrio microbiano fortalece las defensas naturales de la planta y activa mecanismos de resistencia sistémica, lo que incrementa la resiliencia frente a condiciones de estrés hídrico. En consecuencia, la interacción de la bacteria con la rizosfera asegura mayor vigor vegetativo y un rendimiento agronómico sostenible en el banano.

## Componentes del rendimiento

De manera complementaria, Marcano et al. (2025) evaluaron las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de banano orgánico, incluyendo *Bacillus licheniformis*, y observaron una disminución significativa en la severidad de la enfermedad junto con mejoras en el rendimiento productivo. Al respecto, confirman que la integración de bacterias benéficas dentro de programas de manejo sostenible contribuye en la obtención de frutos con mejor calibración y mayor aceptación en mercados de exportación, consolidando el *Bacillus subtilis* como bioinsumo estratégico para la productividad agrícola.

## Producción biotecnológica de metabolitos secundarios y optimización de medios de cultivo

### Optimización nutricional (Sustratos)

La multiplicación eficiente de *Bacillus subtilis* exige un análisis minucioso de los medios de cultivo, de su composición depende la estabilidad del crecimiento y la viabilidad económica de la producción. Los medios convencionales, como Landy o Luria-Bertani, han sido empleados en la investigación microbiológica por su capacidad de sostener un crecimiento estable y reproducible; sin embargo, su elevado costo representa una limitación significativa para su aplicación a gran escala en los programas de biocontrol agrícola. Esta restricción ha impulsado la búsqueda de alternativas basadas en residuos agroindustriales, capaces de mantener rendimientos comparables y, al mismo tiempo, garantizar la sostenibilidad económica de los procesos productivos.

En respuesta a esta limitación, los residuos agroindustriales son alternativas estratégicas para la optimización nutricional. La melaza, el suero de leche, los hidrolizados de harina de banano y el raquis de palma han demostrado ser fuentes de carbono y nitrógeno de bajo costo, capaces de mantener rendimientos comparables a los medios tradicionales. Correa da Silva et al. (2024)

evidenciaron que la melaza de soya puede ser utilizada como sustrato alternativo, garantizando productividad y sostenibilidad; de manera complementaria, confirmaron que la melaza de origen agroindustrial mantiene resultados similares a los medios convencionales, mientras Mkhitarian et al. (2025) demostraron que el suero de leche es eficiente para la producción de enzimas extracelulares. Yu et al. (2025) señalaron que la combinación de melaza y urea reduce costos hasta en un 90% sin afectar la biomasa ni la actividad enzimática, consolidando la importancia de integrar fuentes alternativas de bajo costo en la producción bacteriana.

En comparación entre los medios convencionales y alternativos el aprovechamiento de residuos agroindustriales disminuye los costos de producción, y fortalece la sostenibilidad del biocontrol. Esta estrategia asegura que la eficiencia productiva de *Bacillus subtilis* se traduzca en un vigor vegetativo y productividad agrícola, vinculando directamente la optimización nutricional con el impacto agronómico del cultivo de banano.

#### Variables cinéticas y operacionales

El rendimiento de *Bacillus subtilis* en fermentación industrial depende de parámetros físicos regulados con precisión, dado que, determinan la velocidad de crecimiento celular y la síntesis proteica. La literatura especializada coincide en que el control de la temperatura, el pH, la agitación y el oxígeno disuelto constituye la base para maximizar la eficiencia productiva del microorganismo.

Vehapi et al. (2023) establecieron que el crecimiento óptimo ocurre a pH cercano a 7.5, temperatura de 37 °C, agitación de 150 rpm y oxígeno disuelto alrededor del 30%, condiciones que permiten alcanzar altas concentraciones de biomasa en menor tiempo. De manera complementaria, Stamenković et al. (2023) reportaron que la optimización de la fuente de carbono y la transferencia de oxígeno posibilita la obtención de densidades celulares superiores a  $4.5 \times 10^9$  UFC/mL, correlacionadas con una mayor eficiencia como bioestimulante agrícola.

Valera Montero et al. (2021)) resaltaron que el control de pH, oxígeno disuelto y temperatura en biorreactores tipo airlift incrementa la biomasa, mientras Sun et al. (2023) demostraron que bajo condiciones controladas la bacteria activa rutas hormonales como brasinoesteroides y jasmonatos que promueven el crecimiento radicular y aumentan el rendimiento del banano. Los resultados confirman que la regulación cinética y operacional asegura la producción de biomasa y proteínas, también potencia la síntesis de metabolitos bioactivos con impacto directo en la productividad agrícola.

#### Métodos de cuantificación

La validación de la eficiencia productiva de *Bacillus subtilis* en los sistemas de fermentación requiere la aplicación de protocolos estandarizados que aseguren la reproducibilidad y el rigor analítico. En la literatura científica, la cuantificación de biomasa mediante densidad óptica es un método confiable para evaluar el crecimiento bacteriano en biorreactores, permitiendo correlacionar de forma directa la absorbancia con la concentración celular. Valera Montero et al. (2021) demostraron que este procedimiento es fundamental para monitorear la dinámica de

multiplicación en medios nutritivos optimizados, garantizando un control preciso de la biomasa producida.

De manera complementaria, la determinación de proteína total mediante el método de Bradford constituye una herramienta fundamental para evaluar la capacidad biosintética de la bacteria. Mkhitarian et al. (2025) destacaron que este análisis permite cuantificar la producción de enzimas extracelulares en rangos de pH y temperatura controlados, vinculando la actividad proteica con la eficacia del biocontrol. La combinación de ambos métodos densidad óptica y Bradford ofrece una visión integral del rendimiento fermentativo, al medir la acumulación de biomasa y la síntesis de proteínas funcionales.

Al respecto, la relación entre cuantificación y aplicación agronómica ha sido confirmada por Cedeño Moreira et al. (2026) que evidenciaron que la medición de biomasa y proteínas totales es indispensable para asegurar concentraciones adecuadas de metabolitos antifúngicos. Estos metabolitos son responsables de reducir la incidencia de *Pseudocercospora fijiensis* en banano y de favorecer el crecimiento vegetativo, lo que demuestra que la estandarización de métodos analíticos valida la eficiencia productiva, y garantiza el impacto agronómico del microorganismo.

### **Mecanismos de inhibición celular sobre las estructuras reproductivas de *Pseudocercospora fijiensis***

#### **Lipopéptidos cíclicos (Antagonismo directo)**

El antagonismo directo de *Bacillus subtilis* contra *Pseudocercospora fijiensis* se explica principalmente por la acción de los lipopéptidos cíclicos. Estas moléculas iturinas, fengicinas y surfactinas poseen estructuras anfífilas que les permiten insertarse en la membrana plasmática del hongo, rica en ergosterol, generando poros y desestabilizando la permeabilidad celular (Markelova & Chumak, 2025; Yaraguppi et al., 2023). Este proceso conduce a la fuga de metabolitos esenciales y a la entrada de iones, provocando un colapso osmótico y la lisis celular (Madduri et al., 2024). Además, se ha demostrado que la interacción de estos compuestos con la membrana fúngica genera estrés oxidativo y disfunción mitocondrial, acelerando la muerte celular (Ramesh et al., 2023).

Por otra parte, las fengicinas y las iturinas ejercen un efecto destructivo adicional al degradar orgánulos internos y fragmentar las hifas, lo que compromete la viabilidad del micelio (Xiao et al., 2021). La surfactina, aunque presenta menor actividad antifúngica individual, potencia la acción de las otras familias de lipopéptidos, intensificando el daño estructural y generando un efecto sinérgico en el control del patógeno (Liu et al., 2023; Valenzuela Ruiz et al., 2020; Villegas Escobar & Correa Álvarez, 2021). En conjunto, estos metabolitos limitan la colonización de *P. fijiensis* en el cultivo de banano.

## Efecto en el ciclo reproductivo del hongo

Los metabolitos producidos por *Bacillus subtilis* ejercen un impacto directo sobre las estructuras reproductivas de *Pseudocercospora fijiensis*. Se ha demostrado que los lipopéptidos bacterianos inhiben la germinación de ascosporas el inóculo primario que se transporta por el viento y de conidias, reduciendo la capacidad de dispersión del patógeno en el cultivo de banano (Ahmad et al., 2023). Esta inhibición limita la formación de nuevas infecciones y disminuye la presión epidemiológica en el campo, lo que representa un efecto clave en la reducción de la Sigatoka negra.

A nivel microscópico, los extractos de *B. subtilis* provocan vacuolización, deformación y lisis de las hifas, además de colapso en la pared celular, impidiendo la elongación y ramificación normal del micelio (Chiluisa Utreras et al., 2026). Estas alteraciones morfológicas comprometen la viabilidad de las estructuras reproductivas y vegetativas, afectando de manera integral el ciclo de vida del hongo. En consecuencia, la bacteria destruye las células fúngicas, e interfiere directamente en el ciclo epidemiológico de *P. fijiensis*, reduciendo su capacidad de perpetuación en el cultivo de banano.

## Inducción de Resistencia Sistémica (ISR)

Además del antagonismo directo, *Bacillus subtilis* es activador de defensas en la planta hospedera. Al colonizar raíces y tejidos, esta bacteria desencadena rutas hormonales dependientes de ácido jasmónico y etileno, que coordinan respuestas defensivas en órganos distantes al sitio de colonización (Jung et al., 2024). Este fenómeno, es una resistencia sistémica inducida (ISR), fortalece la inmunidad de la musácea frente a futuros ataques, generando un estado de preparación defensiva que incrementa la capacidad de respuesta de la planta ante la infección foliar.

A nivel molecular, la inoculación con *B. subtilis* estimula la expresión de genes relacionados con defensa como PR10, NPR1 y COI1, además de inducir la producción de fitoalexinas y proteínas relacionadas con patogénesis (Samaniego Gámez et al., 2023; Zhu et al., 2022). Asimismo, se refuerza la pared celular mediante la deposición de lignina, lo que dificulta la penetración del patógeno. Este proceso genera un estado de “priming” defensivo, en el cual la planta no responde de manera inmediata, pero queda preparada para activar respuestas más rápidas e intensas frente a la infección (Kaleh et al., 2024). En conjunto, la ISR convierte a *Bacillus subtilis* en un aliado estratégico que limita el desarrollo del hongo, y potencia la resistencia natural del banano contra la Sigatoka negra.

La acción de *Bacillus subtilis* frente a *Pseudocercospora fijiensis* es un proceso multifacético que combina la disrupción física de las membranas celulares, la alteración de las estructuras reproductivas y la activación de defensas propias de la planta. Los lipopéptidos secretados por la bacteria desestabilizan la organización lipídica del hongo, comprometiendo su viabilidad; los extractos bacterianos impiden la germinación de esporas y deforman el micelio, limitando la propagación; y la colonización vegetal desencadena respuestas inmunológicas que refuerzan la resistencia del banano. En conjunto, estos mecanismos convierten a *B. subtilis* en un agente

biológico capaz de frenar la Sigatoka negra mediante una estrategia integral que une la acción antimicrobiana directa con la potenciación de la defensa sistémica de la musácea.

### **Valoración del potencial de la bacteria como alternativa sostenible dentro del escenario productivo del banano en el Ecuador**

La producción de banano en el Ecuador depende del control de la Sigatoka negra, una enfermedad que ha obligado al uso intensivo de fungicidas químicos en las provincias de Los Ríos, Guayas y El Oro. El empleo constante de estas moléculas, como los triazoles y las estrobilurinas, ha generado la aparición de cepas resistentes del hongo *Pseudocercospora fijiensis*, lo que incrementa los costos y reduce la eficacia de los programas de manejo. Frente a esta problemática, la bacteria *Bacillus subtilis* es una alternativa sostenible: su aplicación permite reducir la frecuencia de los tratamientos químicos, cumplir con las regulaciones internacionales sobre residuos en fruta de exportación y adaptarse a las condiciones climáticas locales mediante formulaciones adecuadas. La valoración es fundamental para entender cómo el biocontrol puede integrarse en el sistema productivo del banano ecuatoriano, equilibrando la productividad agrícola con la competitividad comercial y la responsabilidad ambiental.

#### **Sustitución y manejo de resistencia**

El empleo de *Bacillus subtilis* en el manejo de la Sigatoka negra constituye una estrategia que permite reducir la frecuencia de aplicaciones de fungicidas convencionales, como los triazoles y las estrobilurinas. Esta práctica disminuye la presión de selección que ha favorecido la resistencia de *Pseudocercospora fijiensis* en las zonas bananeras ecuatorianas. Ensayos realizados en La Troncal demostraron que la aplicación de *B. subtilis* redujo la severidad de la enfermedad, mostrando que el biocontrol puede complementar y espaciar los tratamientos químicos sin comprometer la productividad (Alcoser Bonifaz, 2021).

La eficacia de *Bacillus subtilis* en el manejo de la Sigatoka negra se sustenta en la producción de lipopéptidos como surfactina, fengicina e iturina, moléculas que actúan mediante mecanismos distintos a los fungicidas sintéticos y que generan disrupciones en la membrana de los hongos patógenos. Este modo de acción alternativo contribuye a frenar la proliferación de cepas resistentes y ofrece una ventaja frente a la pérdida de sensibilidad observada en *Pseudocercospora fijiensis* hacia ingredientes activos como difenoconazol y azoxistrobina (Cuéllar Gaviria et al., 2023). Los resultados consolidan que *B. subtilis* es una estrategia sostenible que complementa el manejo químico y fortalece la competitividad del banano ecuatoriano en mercados internacionales.

#### **Contexto de mercados internacionales y regulaciones**

El banano ecuatoriano, principal producto agrícola de exportación, se enfrenta a crecientes exigencias en los mercados internacionales, especialmente en la Unión Europea. La estrategia “Farm to Fork”, parte del Pacto Verde Europeo, establece como meta reducir en un 50% el uso de pesticidas sintéticos y ampliar la agricultura orgánica al 25% de la superficie agrícola para 2030 (European Commission, 2020). Estas medidas incluyen la disminución progresiva de los

Límites Máximos de Residuos (LMR) en frutas importadas, lo que representa un desafío directo para Ecuador, su producción bananera ha dependido históricamente de fungicidas químicos.

En este escenario, el biocontrol con *Bacillus subtilis* es una alternativa estratégica para cumplir con las regulaciones internacionales. Su aplicación permite espaciar los tratamientos químicos y reducir la presencia de residuos en la fruta, facilitando el cumplimiento de los LMR exigidos por la Unión Europea. Investigaciones recientes en revistas indexadas señalan que el uso de microorganismos antagonistas como *B. subtilis* contribuye a la sostenibilidad del cultivo y responde a la demanda de consumidores europeos por productos con menor impacto ambiental (Esteves López, 2025).

La pertinencia de este enfoque se refuerza con los avances nacionales en producción sostenible. Según datos oficiales, Ecuador consolida su liderazgo regional con más de 78.000 hectáreas bajo producción orgánica, de las cuales el banano representa más del 90% de las exportaciones certificadas hacia la Unión Europea y Estados Unidos (Bravo, 2025). Este crecimiento refleja el compromiso de los productores con las buenas prácticas agrícolas y la trazabilidad exigida por los mercados internacionales. De esta manera, la incorporación de *B. subtilis* ayuda a cumplir con las regulaciones internacionales, y consolida la posición del país como proveedor confiable de fruta sostenible y competitiva en los mercados globales.

#### Desafíos agronómicos locales (Limitaciones)

*Bacillus subtilis* es una estrategia de biocontrol en el banano ecuatoriano enfrenta limitaciones propias de las condiciones agroclimáticas locales. En las provincias productoras, caracterizadas por alta humedad y temperaturas elevadas, la persistencia del microorganismo en el campo puede verse reducida, lo que exige formulaciones más resistentes y adaptadas a ambientes tropicales (Esteves López, 2025). Estas condiciones también favorecen la rápida proliferación de *Pseudocercospora fijiensis*, aumentando la presión de infección y dificultando la eficacia de los tratamientos biológicos.

Otro desafío agronómico es la coexistencia de sistemas convencionales y orgánicos. Ecuador cuenta con cerca de 200.000 hectáreas de banano convencional, lo que genera riesgos de contaminación cruzada por fumigaciones aéreas en plantaciones vecinas orgánicas. Este problema ha sido señalado por Agrocalidad como uno de los principales retos para garantizar la integridad de los productos destinados a la Unión Europea (Bravo, 2025). La transición hacia sistemas más sostenibles implica costos adicionales y periodos de hasta tres años donde los productores no pueden comercializar como orgánico, limitando la adopción masiva del biocontrol.

La falta de infraestructura para la producción y distribución de bioinsumos representa otra limitación. Aunque existen experiencias exitosas en el uso de *B. subtilis*, la disponibilidad de productos formulados con calidad homogénea aún es restringida. Investigaciones recientes destacan que, si bien la producción orgánica de banano aporta beneficios económicos y ambientales, todavía enfrenta desafíos relacionados con la certificación, la trazabilidad y la

competitividad frente al sistema convencional (Quevedo Carranza et al. 2025). Superar estas limitaciones requiere inversión en investigación, transferencia tecnológica y políticas públicas que incentiven el uso de biocontrol, garantizando su eficacia bajo las condiciones agronómicas locales.

### **Problemática fitosanitaria**

La Sigatoka negra, causada por *Pseudocercospora fijiensis*, es la enfermedad foliar destructiva del banano a nivel mundial. Su impacto se refleja en pérdidas de hasta un 50% del rendimiento cuando no se aplican medidas de control, debido a la reducción del área fotosintética y al deterioro de la calidad del fruto (Villegas Alpizar & Araya Villalobos, 2021). Estas cifras evidencian que el problema trasciende lo local y constituye una amenaza global para la seguridad alimentaria y la economía agrícola.

En su investigación, Becker et al. (2021) el manejo convencional de la enfermedad se basa en la aplicación intensiva de fungicidas químicos, con programas que pueden incluir entre 40 y 60 aplicaciones anuales en sistemas de producción intensiva. Este nivel de intervención implica costos elevados para los productores y genera una presión ambiental considerable, especialmente en países tropicales donde el cultivo se desarrolla de manera continua.

Uno de los principales desafíos actuales es la resistencia del patógeno a los fungicidas sistémicos. Estudios realizados en México confirmaron la sensibilidad reducida de *P. fijiensis* frente a moléculas comúnmente utilizadas, lo que limita la eficacia de los programas de control y obliga a incrementar la frecuencia de aplicaciones (García Munguía et al., 2022). Este fenómeno aumenta los costos de producción, y compromete la sostenibilidad del manejo fitosanitario.

En Ecuador, donde el banano constituye el principal producto de exportación no petrolero, la presión de esta enfermedad afecta directamente la competitividad internacional y la estabilidad de miles de empleos vinculados a la cadena productiva (Asociación de Comercialización y Exportación de Banano del Ecuador (ACORBANEC), 2026).

La problemática fitosanitaria del banano trasciende lo económico y se proyecta hacia dimensiones ambientales y sociales; según Brito et al. (2020) Además de los costos financieros, la aplicación intensiva de fungicidas acarrea consecuencias ambientales y sociales significativas. Este tipo de prácticas provoca la contaminación de suelos y cuerpos de agua, al tiempo que incrementa los riesgos para la salud de los trabajadores agrícolas y de las comunidades cercanas a las plantaciones. Tales impactos refuerzan la urgencia de implementar alternativas de manejo que reduzcan la dependencia de agroquímicos y promuevan prácticas agrícolas sostenibles.

En este contexto, la Sigatoka negra constituye hoy un problema crítico porque combina el incremento de costos por resistencia del patógeno y efectos ambientales y sociales derivados del uso intensivo de fungicidas. Esta amenaza convierte a la enfermedad en un factor limitante para la sostenibilidad del cultivo de banano y justifica la búsqueda de estrategias innovadoras

de control biológico que puedan integrarse en programas de manejo más eficientes y responsables.

### **Limitaciones de los enfoques actuales**

El manejo de la Sigatoka negra se ha basado históricamente en la aplicación intensiva de fungicidas químicos, con programas que pueden incluir entre 40 y 60 aplicaciones anuales, lo que representa una de las cargas fitosanitarias más altas en cultivos tropicales (Becker et al., 2021). Este nivel de intervención genera presión económica y ambiental difícil de sostener en el tiempo.

El impacto económico es considerable. En Costa Rica, los costos asociados a fungicidas representan hasta el 30% del total de la producción bananera (Becker et al., 2021). En Ecuador, donde el banano es el principal producto de exportación no petrolero, esta dependencia afecta la competitividad internacional y la rentabilidad de los productores (ACORBANEC, 2026).

A nivel ambiental, la aplicación intensiva de fungicidas genera contaminación de suelos y cuerpos de agua, además de riesgos para la biodiversidad en ecosistemas tropicales (Esguera et al., 2024). Los residuos químicos pueden persistir y afectar organismos no objetivo, lo que plantea un desafío adicional en términos de sostenibilidad agrícola.

### **Emergencia del control biológico**

La agricultura moderna enfrenta el reto de producir de manera sostenible, reduciendo la dependencia de agroquímicos y mitigando sus impactos negativos. En este contexto, Canto Canché et al. (2023) y Chen, Qin, You, & Long (2023) mencionan que el control biológico aprovecha la acción de microorganismos benéficos para suprimir patógenos y mejorar la salud de los cultivos. Este enfoque se alinea con los principios de la agroecología y responde a las demandas de consumidores y mercados internacionales que priorizan productos más sostenibles y ambientalmente responsables (Becker, Esker, & Umaña, 2021)

El uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), como *Bacillus subtilis*, representa un ejemplo de este cambio de paradigma. Estas bacterias actúan como antagonistas frente a hongos fitopatógenos, también inducen resistencia sistémica en las plantas y favorecen la estabilidad del microbioma asociado al cultivo. En consecuencia, su aplicación puede contribuir a disminuir la severidad de enfermedades como la Sigatoka negra y a mejorar parámetros productivos sin recurrir exclusivamente a fungicidas químicos (García Giraldo et al., 2022).

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de *Bacillus subtilis* en programas de manejo integrado puede generar beneficios adicionales. El control biológico ofrece ventajas estratégicas frente a los métodos convencionales: disminuye la presión ambiental, reduce el riesgo de resistencia del patógeno y puede integrarse en sistemas de producción orgánica o de bajo impacto. Nihorimbere et al. (2024) destacan que estas características lo convierten en una alternativa atractiva para países productores como Ecuador, donde la competitividad

internacional depende cada vez más de cumplir estándares de sostenibilidad y responsabilidad social.

Se deduce que, la emergencia del control biológico en banano refleja una transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles. *Bacillus subtilis*, por su versatilidad y eficacia reportada en distintos contextos, es un agente fundamental, aunque requiere consolidar la evidencia científica para garantizar su aplicabilidad en sistemas productivos reales.

### **Introducción específica a *Bacillus subtilis***

Dentro del amplio espectro de microorganismos utilizados en el control biológico, *Bacillus subtilis* ha adquirido un papel destacado por su versatilidad y eficacia reportada en diversos cultivos agrícolas. Esta bacteria, ampliamente distribuida en suelos y rizosferas, se caracteriza por su capacidad de colonizar raíces y hojas, generando un efecto protector frente a múltiples patógenos. Su uso ha sido documentado en hortalizas, cereales y frutales, evidencia su potencial como herramienta transversal en la agricultura sostenible (Kumar et al., 2022).

En el caso del banano, *Bacillus subtilis* es un agente para reducir la incidencia de enfermedades foliares como la Sigatoka negra. Estudios recientes han señalado que su aplicación puede contribuir a disminuir la severidad de la enfermedad y mejorar parámetros productivos, aunque los resultados aún son variables según las condiciones agronómicas y los contextos experimentales (García Giraldo et al., 2022).

### **Estado del conocimiento**

En el marco de la investigación contemporánea sobre alternativas sostenibles para el manejo de enfermedades en banano, los microorganismos benéficos han adquirido un papel protagónico. **García Giraldo et al. (2022)** evidencian que la inoculación de *Bacillus subtilis* en plantas micropropagadas suprime la Sigatoka negra, e induce cambios en el microbioma radicular. Estos resultados, se suman a un cuerpo creciente de estudios que, en condiciones controladas de laboratorio y en ensayos de campo, reflejan el interés por evaluar la aplicabilidad de este agente biológico en escenarios productivos reales.

La evidencia disponible señala que los estudios sobre *Bacillus subtilis* en banano se concentran en dos grandes enfoques: ensayos experimentales controlados, que buscan demostrar su eficacia en la reducción de la severidad de enfermedades, y evaluaciones en condiciones agronómicas diversas, que analizan su desempeño en sistemas de producción con diferentes niveles de tecnificación. Esteves López (2025) confirma que la combinación de *Bacillus subtilis* con tierra leonardita mejora el rendimiento del cultivo, lo que refleja la diversidad metodológica y explica la variabilidad en los efectos reportados.

A nivel internacional, se han publicado revisiones que resaltan que *Bacillus subtilis* es un biocontrolador versátil, capaz de integrarse en programas de manejo integrado de plagas y enfermedades. Nihorimbere et al. (2024) manifiestan que, pese a los avances significativos, la evidencia aún permanece fragmentada y dispersa en estudios aislados, lo que dificulta establecer conclusiones sólidas sobre su eficacia en el manejo de la Sigatoka negra.

En el contexto latinoamericano, investigaciones realizadas en Costa Rica y Colombia han reportado resultados positivos en la reducción de la severidad de la enfermedad y en la mejora de parámetros productivos. Becker et al. (2021) documentan experiencias exitosas en Costa Rica, mientras que García Giraldo et al. (2022) destacan la supresión de la Sigatoka negra en Colombia mediante inoculación radicular. Estos resultados refuerzan la necesidad de integrar la información disponible para generar una visión más completa y aplicable.

### Vacío de investigación

A pesar de los avances en el estudio de *Bacillus subtilis* es un agente de biocontrol, la evidencia científica disponible presenta una marcada dispersión. La variabilidad en los resultados constituye otro aspecto crítico. Mientras algunos trabajos reportan reducciones significativas en la severidad de la Sigatoka negra, otros muestran efectos dependientes de factores como la dosis aplicada, el método de inoculación y las condiciones ambientales (García Giraldo et al., 2022). Esta falta de consistencia limita la posibilidad de recomendar protocolos estandarizados para su uso en programas de manejo integrado.

Asimismo, la mayoría de los estudios sobre *Bacillus subtilis* en banano se han desarrollado en escalas reducidas ensayos de laboratorio o parcelas experimentales, lo que limita la extrapolación de los resultados hacia sistemas productivos comerciales. Muratov et al. (2025) señalan que, aunque se han identificado mecanismos de protección como la formación de *biofilms* frente a condiciones adversas, aún persiste la ausencia de investigaciones a gran escala en contextos tropicales, especialmente en América Latina. Esta carencia genera incertidumbre sobre la aplicabilidad real de *Bacillus subtilis* en plantaciones de banano destinadas a la exportación, donde los desafíos agronómicos y económicos requieren evidencia más robusta y contextualizada.

Otro vacío identificado es la escasa integración de la evidencia en revisiones sistemáticas o narrativas. Aunque existen publicaciones que destacan el potencial del biocontrol, pocas han consolidado los hallazgos recientes en un marco analítico que permita identificar tendencias, limitaciones y oportunidades de aplicación. La información disponible se centra en resultados puntuales como la reducción de la severidad de la enfermedad o la producción de metabolitos antifúngicos, sin ofrecer una síntesis crítica que relacione estos descubrimientos con la sostenibilidad de los sistemas productivos ni con la competitividad del sector bananero en mercados internacionales (Becker et al., 2021).

En consecuencia, la literatura actual refleja un escenario en el que el potencial de *Bacillus subtilis* está reconocido, pero aún no existe consenso sobre su eficacia ni claridad sobre las condiciones óptimas para su implementación. Esta fragmentación del conocimiento constituye una **brecha científica**: la ausencia de revisiones narrativas que integren la evidencia publicada entre 2020 y 2025, evalúen los mecanismos de acción y valoren su aplicabilidad en sistemas productivos reales. Este vacío justifica la necesidad de una revisión integral que aporte fundamentos técnicos y oriente estrategias sostenibles de manejo de la Sigatoka negra en el cultivo de banano, especialmente en países tropicales como Ecuador, donde el banano constituye un pilar económico y social.

## Conclusiones

El análisis crítico de la evidencia científica publicada entre 2020 y 2025 confirma que *Bacillus subtilis* constituye un agente biológico con alto potencial para el manejo sostenible de la Sigatoka negra en el cultivo de banano. Su eficacia se sustenta en la reducción de los índices de severidad, la prolongación de la longevidad foliar y la mejora de parámetros vegetativos y comerciales, posicionándose como un bioinsumo estratégico dentro de los sistemas productivos tropicales.

Los mecanismos de acción de *B. subtilis* son multifacéticos: la producción de lipopéptidos cíclicos (iturinas, fengicinas y surfactinas) desestabiliza las membranas fúngicas y compromete la viabilidad celular de *Pseudocercospora fijiensis*; la inhibición de la germinación de esporas limita la propagación epidemiológica; y la inducción de resistencia sistémica fortalece las defensas naturales de la planta. Esta combinación de antagonismo directo y activación inmunológica convierte a la bacteria en un biocontrolador integral.

En el contexto ecuatoriano, la incorporación de *B. subtilis* representa una alternativa sostenible frente a la dependencia histórica de fungicidas químicos. Su aplicación contribuye a reducir la presión de selección que favorece la resistencia del patógeno, facilita el cumplimiento de regulaciones internacionales sobre límites máximos de residuos y consolida la competitividad del banano en mercados globales. Sin embargo, persisten limitaciones asociadas a factores agroclimáticos, la coexistencia de sistemas convencionales y orgánicos, y la escasa infraestructura para bioinsumos, exigiendo la inversión en investigación aplicada y políticas públicas de apoyo.

La revisión evidencia un vacío científico relevante: la dispersión de resultados, la variabilidad metodológica y la ausencia de estudios a gran escala en condiciones tropicales. Superar esta brecha requiere consolidar protocolos estandarizados y fortalecer la transferencia tecnológica hacia los productores, de modo que *Bacillus subtilis* pueda integrarse de manera efectiva en programas de manejo fitosanitario sostenible, garantizando la productividad agrícola y la responsabilidad ambiental del sector bananero.

## Bibliografía

- Adriano Anaya, M., Matías Castillo, S., Moreno Castillo, B., Vázquez Ovando, A., & Salvador Figueroa, M. (2023). Mixture of clove (*Syzygium aromaticum*) and garlic (*Allium sativum*) alcoholic extracts in the control of black Sigatoka in “Macho” plantain. *Mexican Journal of Phytopathology*, 41(1), 82–92. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2207-3>
- Ahmad, T., Xing, F., Nie, C., Cao, C., Yu, X., & Liu, Y. (2023). Biocontrol potential of lipopeptides produced by *Bacillus subtilis*. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1150217>
- Alcoser Bonifaz, J. A. (2021). Uso de *Bacillus subtilis* para el control de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) en el cultivo de banano en el sector de La Troncal – Cañar. *Revista Protección Vegetal [Tesis de grado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]*, 36(2), 45–53. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/17198>
- Asociación de Comercialización y Exportación de Banano del Ecuador (ACORBANEC). (2026). Ecuador exporta más de 377 millones de cajas de banano en 2025. *Portal Frutícola*, 1-2. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2026/05/07/bocas-del-toro/>
- Becker, P., Esker, P., & Umaña, G. (2021). Incorporación de microorganismos para reducir el uso de fungicidas químicos en programas de control de sigatoka negra en Costa Rica mediante el uso de fungicidas biológicos. *ScienceDirect. Elsevier*, 146, 105657. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105657>
- Bravo, M. (2025). Ecuador consolida su liderazgo en producción orgánica con más de 78.000 hectáreas. *Revista Portal Frutícola*. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2025/11/03/ecuador-produccion-organica/>
- Brito, F., Santos, J., Azevedo, V., Peixoto, Y., De Oliveira, S., Ferreira, C., Haddad, F., Amorim, E., Fraaije, B., & Miller, R. (2020). Genetic Diversity and Azole Fungicide Sensitivity in *Pseudocercospora musae* Field Populations in Brazil. *Frontiers in Microbiology*, 11(99), 1-21. <https://doi.org/DOI: 10.3389/fmicb.2020.00099>
- Castillo Arévalo, T. (2022). Alternativas biológicas y químicas para el manejo de la Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en cultivo de plátano (*Musa paradisiaca* L.) en Rivas, Nicaragua. *Ciencia E Interculturalidad*, 31(02), 153–165. <https://doi.org/10.5377/rci.v31i02.15188>
- Cedeño Moreira, A., López Cedeño, K., Morejón Centeno, M., Torres Rodríguez, J., Arellano Ibarra, K., Alejandro Rosas, J., & Alvarado Mávil, A. (2026). Eficacia de *Trichoderma* sp. y *Bacillus subtilis* como agentes de control biológico contra *Pseudocercospora fijiensis* en el cultivo del banano (*Musa × paradisiaca*). *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 4(2), 1-15. <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n2/145>
- Chen, J., Qin, H., You, C., & Long, L. (2023). Mejora de la expresión secretoria y caracterización de xilanas termolabile y  $\beta$ -xilosidasa de *Pseudothermotoga thermarum* y su aplicación en la degradación sinérgica de lignocelulosa. *Fronteras en Bioingeniería y Biotecnología*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1270805>
- Chiluisa Utreras, V., Vásquez Gualavisí, G., Cabezas Yerovi, A., & Acurio Vásquez, R. (2026). Gene expression of lipopeptide biosynthesis in *Bacillus subtilis* analyzed by RT-qPCR. *Revista Enfoque UTE*, 17(2), 45–59. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1206>
- Correa da Silva, A., Santa Rosa Dorigan, B., Machado da Silva Neto, J., Rosa Magri, M., Rossi, F., Francisco, K., Ceccato Antonini, S., & Fontanetti, A. (2024). Soy molasses as culture medium for *Bacillus* species aiming at plant growth promotion. *Revista Fermentation*, 10(Edición 8. Artículo 403), 1–17. [https://www.researchgate.net/publication/382928426\\_Soy\\_Molasses\\_as\\_Culture\\_Medium\\_for\\_Bacillus\\_Species\\_Aiming\\_at\\_Plant\\_Growth\\_Promotion](https://www.researchgate.net/publication/382928426_Soy_Molasses_as_Culture_Medium_for_Bacillus_Species_Aiming_at_Plant_Growth_Promotion)

- Cruz Martín, M., Mena, E., Acosta Suárez, M., Pichardo, T., Rodríguez, E., & Alvarado Capó, Y. (2020). Protein compounds of *Bacillus subtilis* with in vitro antifungal activity against *Pseudocercospora fijiensis*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(1), 345-356. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7058733/>
- Cuéllar Gaviria, T., García Botero, C., Ju, K., & Villegas Escobar, V. (2023). The genome of *Bacillus tequilensis* EA-CB0015 sheds light into its epiphytic lifestyle and potential as a biocontrol agent. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1135487>
- Esguera, J., Balendres, M., & Paguntalan, D. (2024). Overview of the Sigatoka leaf spot complex in banana and its current management. *Tropical Plants*, 3(e002), 1-18. <https://doi.org/doi:10.48130/tp-0024-0001>
- Esteves Lopez, A. (2025). Efecto de la bacteria *Bacillus subtilis* más tierra leonardita en el rendimiento del banano (*Musa AA*). *Polo del Conocimiento*, 10(9), 323-334. <https://orcid.org/0009-0006-7321-794X>
- European Commission. (2020). A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. *Comisión Europea (European Commission)*, 1-23. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0381>
- García Giraldo, G., Posada, L., Pérez-Jaramillo, J., Carrión, V., Raaijmakers, J., & Villegas Escobar, V. (2022). *Bacillus subtilis* EA-CB0575 inoculation of micropropagated banana plants suppresses black Sigatoka and induces changes in the root microbiome. *Revista Plant and Soil*, 479, 513-527. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-022-05540-z>
- García Sánchez, H., Jaramillo Aguilar, E., & Herrera Reyes, S. (2022). Fungicidas a base de azufre y *Bacillus* sp. en manejo integrado de Sigatoka negra. *Revista Científica Agroecosistemas*, 10(3), 153-158. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/573>
- Jung, J., Ahn, S., Kim, D. H., & Riu, M. (2024). riple interactions for induced systemic resistance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1464710>
- Kaleh, A. M., Singh, P., Chua, K. O., & Harikrishna, J. A. (2024). Modulation of plant transcription factors and priming of stress tolerance by plant growth-promoting bacteria. *Annals of Botany*, 135(3), 387-402. <https://doi.org/10.1093/aob/mcae166>
- Liu, L., Jin, X., Lu, X., Guo, L., Lu, P., Yu, H., & Lv, B. (2023). echanisms of surfactin from *Bacillus subtilis* against *Fusarium foetens*. *Journal of Fungi*, 9, 367. <https://doi.org/10.3390/jof9030367>
- Madduri, M., Rudramurthy, S. M., & Roy, U. (2024). Lipopeptides induce membrane permeabilization in *Candida glabrata*. *Acta Biochimica Polonica*, 71. <https://doi.org/10.3389/abp.2024.11999>
- Marcano, I., Díaz-Alcántara, C., Pimentel-Pujols, A., Vicioso-Alcalá, A., & Núñez-Ramos, P. (2025). Viabilidad de bacterias benéficas para el control de *Mycosphaerella fijiensis* y desarrollo de plantas de banano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales (Aug 2025)*, 12(2), 8. <https://doi.org/10.53287/khmn9570su68y>
- Markelova, N., & Chumak, A. (2025). Antimicrobial activity of *Bacillus* cyclic lipopeptides. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(1), 1-15. <https://doi.org/10.3390/ijms26010336>
- Mkhitarian, A., Paloyan, A., Khoyetsyan, L., Dyukova, K., Izmailyan, M., Kinosyan, M., Davidyan, T., Hakhoyan, G., & Hambardzumyan, A. (2025). Utilization of whey as a fermentation medium for protease production by *Bacillus* strains. *Functional Food Science*, 5(11), 598-610. <https://doi.org/10.31989/ffs.v5i11.1797>

- Muratov, E., Keilholz, J., Kovács, Á., & Moeller, R. (2025). The biofilm matrix protects *Bacillus subtilis* against hydrogen peroxide. *Revista Biofilm. Elsevier*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biofilm.2025.100274>
- Nihorimbere, G., Korangi Alleluya, V., Nimbeshaho, F., Nihorimbere, V., Legrève, A., & Ongena, M. (2024). *Bacillus* based biocontrol beyond chemical control in central Africa: the challenge of turning myth into reality. *Revista Frontiers in Plant Science*, 15(1349357). <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1349357>
- Núñez Ramos, P., A., C. C., & Pulido Blanco, V. (2025). Efectos del control de la sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* Morelet) en zonas bananeras de Valverde, República Dominicana. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 12(1), 1-14. <https://doi.org/10.53287/spkj9013ru79j>
- Quevedo Carranza, E., Prado Carpio, E., Valarezo Macías, C., & Rentería Minuche, J. (2025). Análisis de los beneficios económicos y ambientales: Producción de banano orgánico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 10031–14729. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/10031/14729>
- Ramesh, S., Madduri, M., Rudramurthy, S. M., & Roy, U. (2023). Mode of action of *Bacillus*-derived antifungal lipopeptides. *Microbiology Spectrum*, 11(2). <https://doi.org/10.1128/spectrum.01583-22>
- Salvador Adriano, M., Constantino Salazar, F., Salvador Figueroa, M., Salgado Mora, M. G., & Adriano Anaya, M. (2025). Efecto de *Bacillus subtilis* ANT01 sobre la severidad de sigatoka negra en plátano “macho” (*Musa balbisiana*). *Biotecnia*, 27(e2475), 1-7. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2475>
- Samaniego Gámez, B. Y., Valle Gough, R. E., Garruña Hernández, R., Reyes Ramírez, A., & Tun Suárez, J. M. (2023). Induced systemic resistance in plants by *Bacillus* spp. *Plants*, 12(11), 2069. <https://doi.org/10.3390/plants12112069>
- Stamenković Stojanović, S., Karabegović, I., Danilović, B., Mančić, S., & Lazić, M. (2023). High cell density cultivation of *Bacillus subtilis* NCIM 2063: Modeling, optimization and a scale-up procedure. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 88(11), 1103–1117. <https://doi.org/10.2298/JSC230407036S>
- Sun, B., Zou, K., Zhao, Y., Tang, Y., Zhang, F., Chen, W., & Zheng, Y. (2023). Fermentation optimization for alkaline protease production by *Bacillus subtilis* BS-QR-052. *Bioresource Technology Reports*, 23(4), 101–112. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1301065>
- Sun, Y., Huang, B., Cheng, P., Li, C., Chen, Y., Li, Y., Zheng, L., Xing, J., Dong, Z., & Yu, G. (2022). Endophytic *Bacillus subtilis* TR21 improves banana plant resistance to *Fusarium oxysporum* and promotes root growth by upregulating jasmonate and brassinosteroid pathways. *Phytopathology*, 112(2), 219–231. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-21-0159-R>
- Valera Montero, L., González Delgadillo, L., Amador Rodríguez, K., Perales Segovia, C., & Flores Benítez, S. (2021). Optimización de medios nutritivos en biorreactores tipo airlift para la producción de *Bacillus subtilis*. *Revista Agro Productividad*, 4(1), 45–56. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i9.2123>
- Vera, L. (2026). Estudio analiza la eficacia de fungicidas frente a la Sigatoka negra en Ecuador. *Portal de Tecnología INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Ecuador)*. <https://tecnologia.iniap.gob.ec/2026/03/02/estudio-analiza-la-eficacia-de-fungicidas-frente-a-la-sigatoka-negra-en-ecuador/>
- Villegas Alpízar, M., & Araya Villalobos, R. (2021). Trabajos publicados en la revista Agronomía Mesoamericana 1990-2021. *Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Agronomía Mesoamericana*, 125 pp. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/issue/archive>

- Xiao, J., Guo, X., Qiao, X., Zhang, X., Chen, X., & Zhang, D. (2021). Activity of fengycin and iturin A against phytopathogenic fungi. *Frontiers in Microbiology*, 12, 682437. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.682437>
- Yaraguppi, D., Bagewadi, Z., Patil, N., & Mantri, N. (2023). Iturin: A promising cyclic lipopeptide. *Revista Biomolecules*, 13(10), 4567–4578. <https://doi.org/10.3390/biom13101515>
- Yu, X., Chen, K., Zhou, C., Wang, Q., Chu, J., Yao, Z., Liu, Y., & Sun, Y. (2025). Bioreactor design optimization using CFD for cost-effective ACPase production in *Bacillus subtilis*. *Revista Fermentation*, 11(7. 386), 1–15. <https://doi.org/10.3390/fermentation11070386>
- Zhu, L., Huang, J., Lu, X., & Zhou, C. (2022). Development of plant systemic resistance by beneficial rhizobacteria. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.952397>



Revista Multidisciplinaria Arbitrada  
de Investigación Científica  
ISSN: 2588 - 0659

CER-MQRinvestigar-UIO-V\_10\_2\_ART\_435  
Quito (Ecuador), 2026-06-18

#### CERTIFICATION

MQR® editorial certifies, that this article:

***Bacillus subtilis* as a biological control strategy against *Pseudocercospora fijiensis* in banana: scope and perspectives.**

***Bacillus subtilis* como estrategia de control biológico contra *Pseudocercospora fijiensis* en banano: alcances y perspectivas.**

**REVIEW** - "Aceptada para su publicación después de superar un proceso de doble revisión ciega externa"

Fechas de recepción: 02-MAY-2026 aceptación: 18-JUN-2026 publicación: 20-JUN-2026

#### Authors:

Vargas-Mendoza, María Mercedes  
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO  
Facultad de Posgrados  
Maestría en Biotecnología

Milagro – Ecuador



[mvargasm22@unemi.edu.ec](mailto:mvargasm22@unemi.edu.ec)



<https://orcid.org/0009-0003-2272-3867>

García-Bajaña, Brayan Hernán  
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO  
Facultad de Posgrados  
Maestría en Biotecnología  
Milagro – Ecuador



[bgarciab6@unemi.edu.ec](mailto:bgarciab6@unemi.edu.ec)



<https://orcid.org/0009-0007-0643-5303>

Sevilla-Carrasco, Jaime David  
UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO  
Facultad de Posgrados  
Maestría en Biotecnología  
Milagro – Ecuador



[jsevillac@unemi.edu.ec](mailto:jsevillac@unemi.edu.ec)



<https://orcid.org/0000-0001-5257-299X>

#### Published:

Vol. 10 Núm. 2 (2026): Revista Científica MQRinvestigar: pag. 01-22

DOI: <https://doi.org/10.56048/MQR.2026.e435>

Indexado en Latindex 2.0 ISSN-L 2588-0659



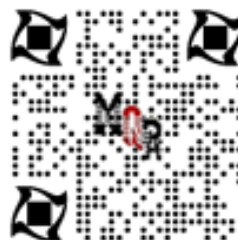
<http://www.investigarmqr.com/>

Cordially yours,  
MQRinvestigar - Director



Firmado electrónicamente por:

MARCO ANTONIO  
QUINTANILLA  
ROMERO



Núñez de Vela E256 - Quito/Ecuador - CP: 170135 - WhatsApp +593 99 83 96 831 [www.investigarmqr.com](http://www.investigarmqr.com) - [mqr@investigarmqr.com](mailto:mqr@investigarmqr.com)

# UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

*¡Evolución académica!*

@UNEMIEcuador

