



El microbioma bacteriano: una estrategia sostenible para el manejo de la marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza tropical 4 en el cultivo de bananos

The bacterial microbiome: a sustainable strategy for the management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 in banana cultivation

Michel Leiva-Mora* 

Laboratorio de Biotecnología, Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Recibido: 8/2/2025

Aceptado: 10/09/2025

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no existir conflicto de intereses

CORRESPONDENCIA

Michel Leiva-Mora

m.leiva@uta.edu.ec



CF: cag301242448

RESUMEN

Contexto: La marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*), en especial la raza tropical 4 (TR4), constituye la amenaza más devastadora para la producción global de banano. La ineficacia de las prácticas de control convencionales ha impulsado la búsqueda de otras alternativas sostenibles. **Objetivo:** Sintetizar la investigación científica de los últimos cinco años (2020-2024) sobre el uso del microbioma bacteriano como estrategia de biocontrol contra *Foc*. **Métodos:** Se realizó una búsqueda y síntesis crítica de la literatura científica de los últimos cinco años (2020-2024) sobre el uso de bacterias antagonistas, consorcios microbianos y enfoques metagenómicos para el biocontrol de *Foc*. **Resultados:** El análisis de la literatura evidencia que los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* son los antagonistas más estudiados, ejerciendo su acción mediante mecanismos como la antibiosis, la competencia por hierro, el parasitismo directo y la resistencia sistémica inducida en la planta. Se destaca la eficacia de los consorcios microbianos frente a cepas individuales, gracias a efectos sinérgicos. Asimismo, se exploran los avances en la caracterización de bacterias endófitas y rizosféricas a través de enfoques metagenómicos. Si bien los resultados *in vitro* y en invernadero son altamente prometedores, la eficacia en campo sigue siendo un desafío debido a factores ambientales y la complejidad del suelo. **Conclusiones:** La modulación del microbioma representa el paradigma más robusto para el manejo integrado de la enfermedad, aunque su aplicación a escala comercial requiere de la optimización de formulaciones y métodos de aplicación que garanticen la estabilidad y persistencia de los inoculantes bacterianos.

Palabras clave: Control biológico, marchitez, microbioma, microorganismo, rizosfera

ABSTRACT

Context: Fusarium wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*), particularly Tropical Race 4 (TR4), represents the most devastating threat to global banana production. The inefficacy of conventional control practices has spurred the search for other sustainable alternatives. **Objective:** To synthesize the scientific research from the last five years (2020-2024) on the use of the bacterial microbiome as a biocontrol strategy against *Foc*. **Methods:** A critical search and synthesis of the scientific literature from the last five years (2020-2024) was conducted on the use of antagonistic bacteria, microbial consortia, and metagenomic approaches for the biocontrol of *Foc*. **Results:** Analysis of the literature demonstrates that the genera *Bacillus* and *Pseudomonas* are the most extensively studied antagonists, exerting their effects through mechanisms such as antibiosis, competition for iron, direct parasitism, and the induction of systemic resistance in the plant. The superior efficacy of microbial consortia over single strains is highlighted, owing to synergistic effects. Furthermore, advances in the characterization of endophytic and rhizosphere bacteria through metagenomic approaches are explored. While *in vitro* and greenhouse results are highly promising, field efficacy remains a challenge due to environmental factors and soil complexity. **Conclusions:** The microbiome modulation represents the most robust paradigm for the integrated management of the disease, although its commercial-scale application requires the optimization of formulations and delivery methods to ensure the stability and persistence of bacterial inoculants.

Keywords: Biocontrol, microbiome, microorganism, rhizosphere, wilt

INTRODUCCIÓN

El banano (*Musa* spp.) se erige como uno de los cultivos más cruciales a nivel global, constituyendo una fuente fundamental de seguridad alimentaria e ingresos para millones de personas en regiones tropicales y subtropicales. Sin embargo, la producción bananera se enfrenta a una amenaza fitosanitaria de proporciones pandémicas: la Marchitez por *Fusarium*, popularmente conocida como “Mal de Panamá” (Adhikary *et al.*, 2024).

Esta enfermedad, causada por el hongo fitopatógeno de suelo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*), ha marcado a fuego la historia de este cultivo. Su raza 1 (R1) fue responsable de la desaparición del cultivar ‘Gros Michel’ como base de la exportación mundial en el siglo XX, lo que forzó su reemplazo por el cultivar ‘Cavendish’, considerado resistente en aquel entonces. Esta solución, no obstante, ha demostrado ser temporal. La emergencia y rápida diseminación de la raza tropical 4 (TR4) de *Foc* representa en la actualidad el capítulo más crítico de esta crisis. A diferencia de sus predecesoras, TR4 tiene la capacidad de infectar y destruir plantaciones de ‘Cavendish’, así como una amplia gama de otras cultivares locales, poniendo en peligro la base genética de la produc-

ción comercial y de subsistencia (Martínez *et al.*, 2023).

La naturaleza de *Foc* TR4 complica enormemente su control. El fitopatógeno puede persistir en el suelo durante décadas ya que puede formar clamidosporas, quienes resisten condiciones adversas. Su dispersión, aunque inicialmente lenta, es muy eficiente, pudiendo ocurrir a través de agua de riego, maquinaria agrícola, material vegetal infectado o partículas de suelo adheridas. Frente a este desafío, las estrategias de manejo convencionales han mostrado una clara insuficiencia (Rodríguez-Yzquierdo *et al.*, 2023).

La fumigación química del suelo no solo resulta ineficaz para erradicar el fitopatógeno en profundidad, sino que conlleva impactos ambientales negativos y puede alterar la biología del suelo. Asimismo, la búsqueda de cultivares genéticamente resistentes, aunque es un pilar fundamental a largo plazo, es un proceso lento y complejo. Esta situación de vulnerabilidad ha impulsado de manera urgente la exploración de alternativas de control sostenibles, efectivas y ambientalmente responsables (Zhang *et al.*, 2023). En este contexto, el manejo del microbioma asociado a la planta ha emergido como uno de los paradigmas más prometedores para el control de enfermedades radiculares. La rizosfera y los tejidos endófitos al-

bergan una inmensa diversidad de microorganismos que interactúan constantemente con la planta y los fitopatógenos, influyendo directamente en su salud (Lv *et al.*, 2023). La hipótesis central que guía esta estrategia postula que es posible modular estas comunidades microbianas, ya sea mediante la introducción de inoculantes seleccionados o mediante prácticas de manejo, para suprimir o mitigar la infección por *Foc*. El biocontrol utilizando bacterias antagonistas específicas representa la vanguardia de esta aproximación, ofreciendo un mecanismo de defensa biológico y específico (Ravi *et al.*, 2022).

El objetivo de esta revisión es, por lo tanto, sintetizar y analizar críticamente el conocimiento científico generado en el último quinquenio (2020-2024) sobre la utilización del microbioma bacteriano como estrategia de biocontrol contra *Foc*. Esta revisión se centrará en examinar los avances en la identificación y caracterización de bacterias antagonistas (con énfasis en los géneros más promisorios), dilucidar los mecanismos antagonísticos involucrados (como antibiosis, competencia e inducción de resistencia sistémica), evaluar la superioridad de los consorcios microbianos frente a las cepas individuales y explorar el papel de las nuevas herramientas metagenómicas en la comprensión de estas interacciones tripartitas (planta-microbioma-fitopatógeno). Finalmente, se abordará la crítica brecha existente entre los resultados prometedores obtenidos en condiciones controladas (*in vitro* e invernadero) y la eficacia en campo, discutiendo los desafíos y las futuras direcciones necesarias para transitar desde una estrategia experimental hacia una aplicación comercial robusta en el marco del manejo integrado de la enfermedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

La estrategia de búsqueda bibliográfica se ejecutó en bases de datos científicas multidisciplinarias y especializadas, siendo las principales PubMed, Scopus, Web of Science y Google Académico. La ecuación de búsqueda se construyó combinando términos clave y sus sinónimos controlados por operadores booleanos (AND, OR). Los conceptos centrales incluyeron: “*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*” OR “*Foc* TR4” OR “Panama disease” para el fitopatógeno; y “biocontrol” OR “antagonistic bacteria” OR “microbiome” OR “*Bacillus*” OR “*Pseudomonas*” OR “microbial consortia” OR “siderophores” OR “ISR” para las

estrategias de control. Se aplicaron filtros por fecha y por idioma, restringiendo la búsqueda a artículos en inglés y español.

El proceso de selección de estudios se llevó a cabo en dos fases. Inicialmente, los títulos y resúmenes de todas las publicaciones recuperadas fueron examinados para evaluar su pertinencia frente a los criterios de inclusión predefinidos: estudios primarios o revisiones que investigaran el efecto de bacterias, consorcios microbianos o aproximaciones metagenómicas contra *Foc*. Se excluyeron artículos que solo mencionaban el fitopatógeno de manera tangencial, estudios exclusivamente químicos o genéticos no relacionados con el microbioma, y literatura no revisada por pares. En una segunda fase, los textos completos de los artículos preseleccionados fueron recuperados y analizados con mayor detalle para verificar que cumplieran con todos los criterios y para extraer la información relevante.

El análisis y síntesis de la información se realizó de manera narrativa y crítica. Los datos extraídos, que incluyeron el origen de las cepas bacterianas, los mecanismos de antagonismo investigados, la metodología experimental (*in vitro*, invernadero, campo) y los principales hallazgos, fueron organizados en tablas sintéticas para facilitar la comparación. El enfoque del análisis se centró en identificar tendencias, puntos de consenso en la literatura, mecanismos de acción predominantes y, crucialmente, las contradicciones o brechas de conocimiento existentes, con especial atención a la discrepancia entre los resultados obtenidos en condiciones controladas y los de campo. Este proceso permitió construir una visión integral y actualizada del estado del arte en esta área de investigación.

RESULTADOS

Amenaza global de *Foc* TR4 en el cultivo de banana

El banano (*Musa* spp.), y en particular el subgrupo Cavendish, constituye un pilar de la seguridad alimentaria y económica para más de 400 millones de personas en regiones tropicales y subtropicales, siendo fundamental para las economías de exportación de países de América Latina, el Caribe y Asia (Kema *et al.*, 2021). Sin embargo, el monocultivo, basado en la propagación clonal, ha provocado una mayor vul-

nerabilidad a esta enfermedad, enfrentando actualmente su amenaza más severa en décadas.

La marchitez por *Fusarium*, causada por el hongo de suelo *Foc*, entre sus razas, la Raza Tropical 4 (TR4), representa un peligro existencial para la industria bananera global (Munhoz *et al.*, 2024). A diferencia de razas anteriores, *Foc* TR4 tiene la capacidad de infectar y destruir no solo cultivos susceptibles como 'Gros Michel', sino también a todo el subgrupo Cavendish, que domina el comercio internacional, además de un amplio rango de otros cultivos (Malaka *et al.*, 2024).

La diseminación de *Foc* TR4 es implacable. Desde su identificación en el sudeste asiático, el microorganismo fitopatógeno se ha propagado a principales regiones productoras como Australia, Mozambique, Jordania, Colombia y Perú, con un riesgo inminente de establecerse en América Central y el Caribe (Pérez-Matos *et al.*, 2023). La capacidad de persistir en el suelo por décadas en forma de clamidosporas, hace que una vez un campo está contaminado, sea prácticamente imposible de erradicar (Nguyen *et al.*, 2019).

El impacto económico potencial que puede causar la marchitez por *Fusarium* RT4 es catastrófico. Se estima que la propagación global de *Foc* TR4 podría poner en riesgo hasta el 80% de la producción mundial de banano, con pérdidas proyectadas que superan los miles de millones de dólares anuales y un impacto devastador en los medios de vida de pequeños productores (Figuroa *et al.*, 2022). Esta situación no es solo una crisis fitosanitaria, sino también una grave amenaza para la seguridad alimentaria en países en desarrollo.

Las estrategias de control convencionales han demostrado una eficacia limitada frente a este agente fitopatógeno. Los fungicidas químicos son en gran medida ineficaces debido a la naturaleza vascular de la enfermedad y a la ubicación del hongo en el suelo, presentando además riesgos ambientales y de residuos (Anderson y Aitken, 2021). Si bien el desarrollo de cultivos resistentes mediante mejoramiento genético es un camino promisorio a largo plazo, enfrenta desafíos de aceptación del mercado y requiere de tiempos de desarrollo extensos (Tripathi *et al.*, 2024).

Ante este escenario, la comunidad científica se ha volcado hacia la búsqueda de estrategias de mane-

jo sostenibles que puedan integrarse en un enfoque multidisciplinario. En este contexto, el control biológico, y específicamente la explotación del microbioma nativo de la rizósfera del banano, ha emergido como una de las alternativas más prometedoras y estudiadas en la última década (Prigiallo *et al.*, 2022). La hipótesis central que sustenta este enfoque se basa en el concepto de suelos supresivos a la marchitez causada por *Foc* TR4 (Zhang *et al.*, 2024). Recientemente, se ha demostrado que la rizósfera de plantas de banano sanas, incluso en áreas afectadas por *Foc* TR4, alberga un consorcio microbiano único con capacidad intrínseca para suprimir la enfermedad, modulando el microbiota del suelo hacia un estado que limita el establecimiento y la progresión del agente causal (Wong *et al.*, 2019).

Estudios metagenómicos pioneros de los últimos cinco años han comenzado a develar las complejas interacciones tripartitas entre la planta, el microbioma y el microorganismo (Ong *et al.*, 2024). Algunos han correlacionado la supresión de la marchitez con una mayor abundancia de bacterias específicas como *Pseudomonas* y *Bacillus*, así como con el enriquecimiento de genes funcionales relacionados con la biosíntesis de antibióticos en la rizósfera (Li *et al.*, 2022). Esta comprensión ha impulsado un cambio de paradigma: de la búsqueda de un solo microorganismo hacia la manipulación de la comunidad microbiana para crear un escudo biológico robusto, resiliente y funcional. La hipótesis de trabajo postula que la inoculación de consorcios bacterianos seleccionados, o la gestión de las prácticas agronómicas para favorecer a estos microbiomas beneficiosos, puede inducir un estado de supresión duradero en el suelo (Zhu *et al.*, 2023).

Mecanismos de biocontrol del microbioma bacteriano contra *F. oxysporum*

La capacidad de supresión del microbioma bacteriano contra *Foc* se fundamenta en una diversidad de mecanismos de acción sinérgicos, donde la antibiosis emerge como una de las estrategias más contundentes (Figuroa *et al.*, 2022). Estudios metagenómicos y de secuenciación masiva han revelado que suelos supresivos a *Foc* presentan un enriquecimiento significativo de genes bacterianos responsables de la biosíntesis de antibióticos de tipo no ribosómico, como las sintetasas de péptidos y poliquétidos (Kaushal *et al.*, 2020).

Entre los géneros más estudiados, *Bacillus* spp. destaca por su eficacia en la producción de una amplia gama de lipopéptidos antifúngicos (Boulahouat *et al.*, 2023). Cepas de *Bacillus velezensis* y *Bacillus amyloliquefaciens*, aisladas de la rizósfera de banano, han demostrado una potente actividad inhibitoria in vitro contra *Foc* TR4 mediante la síntesis de surfactinas, fengicinas e iturinas, que desestabilizan la membrana celular del microorganismo (He *et al.*, 2021). *Pseudomonas* spp. ejerce su acción antagónica a través de la síntesis de compuestos antifúngicos volátiles y solubles (Ravi *et al.*, 2022). En este sentido, se ha confirmado que cepas de *Pseudomonas fluorescens* y *Pseudomonas aeruginosa* producen fenacinas, 2,4-diacetilfloroglucinol y piocianina, metabolitos que no solo inhiben el crecimiento micelial de *Foc*, sino que también interfieren en la germinación de sus conidios (Biessy y Fillion, 2021; Lu *et al.*, 2024). La competencia por micronutrientes esenciales, particularmente el hierro, constituye un segundo pilar en la supresión mediada por el microbioma (Ong *et al.*, 2024). En condiciones de estrés férrico, bacterias rizosféricas como *Pseudomonas* y *Burkholderia* sintetizan y liberan sideróforos de alta afinidad, quedando el hierro disponible en la rizósfera y privando al microorganismo de este elemento crucial para su desarrollo y virulencia (Nakkeeran *et al.*, 2021). Esta competencia por hierro genera un ambiente desfavorable para *Foc*, limitando su capacidad para establecer infecciones exitosas. Estudios transcriptómicos han demostrado que, en presencia de estos sideróforos bacterianos, se produce una represión significativa de genes de *Foc* relacionados con la colonización radical y la síntesis de toxinas (Shen *et al.*, 2022).

El parasitismo directo o hiperparasitismo representa un mecanismo físico de control, donde bacterias quitinolíticas y glucanasas secretan enzimas que degradan activamente la pared celular de las hifas fúngicas (Hernández-Melchor *et al.*, 2023). Cepas de *Streptomyces* spp. y *Bacillus* spp. han mostrado una capacidad notable para lisar hifas de *Foc* mediante la producción de quitinasas y β -1,3-glucanasas (Kawicha *et al.*, 2023).

Además del antagonismo directo, el microbioma benéfico es capaz de potenciar las defensas intrínsecas de la planta de banano a través de la resistencia sistémica inducida (RSI). Este fenómeno, desencadenado

por la percepción de patrones microbianos, prepara a la planta para una respuesta de defensa más rápida y robusta ante el ataque de *Foc* (Nakkeeran *et al.*, 2021).

La RSI mediada por rizobacterias está frecuentemente asociada con la ruta de señalización del ácido jasmónico y el etileno (Cheng *et al.*, 2019). La inoculación de consorcios bacterianos en plántulas de banano ha resultado en una mayor expresión de genes marcadores de defensa, como los de Proteínas Relacionadas con la Patogénesis, y una significativa reducción en la severidad de la marchitez (Sun *et al.*, 2021).

La promoción del crecimiento vegetal es un beneficio colateral que, si bien no es un mecanismo de biocontrol directo, contribuye indirectamente a la tolerancia (Yang *et al.*, 2021). Bacterias como *Bacillus* y *Pseudomonas* solubilizan fosfatos, fijan nitrógeno y producen fitohormonas como el ácido indolacético, mejorando el vigor y la resiliencia de las plantas ante el estrés biótico (Napitupulu *et al.*, 2021).

Una de las tendencias más sólidas en la investigación reciente es la superioridad de los consorcios microbianos sobre las cepas aplicadas de forma individual (Minchev *et al.*, 2021). Se ha demostrado que mezclas de *B. velezensis* y *Trichoderma harzianum* presentan un efecto sinérgico al combinar múltiples mecanismos de acción (Zhu *et al.*, 2023).

La sinergia en los consorcios permite una ocupación de nichos más amplia en la rizósfera y una supresión más completa de *Foc* (Lv *et al.*, 2023). Mientras *Pseudomonas* puede dominar la competencia por hierro, *Bacillus* puede actuar como un eficiente inductor de resistencia, creando una barrera de defensa multifacética (Cervantes *et al.*, 2024).

Los enfoques metagenómicos han sido cruciales para descubrir taxones bacterianos no cultivables con potencial biocontrolador (Bubici *et al.*, 2019). Análisis de suelos supresivos han identificado una abundancia enriquecida de *Chitinophaga*, *Sphingomonas* y *Streptomyces*, cuyos perfiles genómicos predicen una alta capacidad para la síntesis de compuestos antifúngicos (Qi *et al.*, 2021; Dror *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022).

Las bacterias endófitas, que colonizan los tejidos internos de la planta sin causar daño, representan una frontera prometedora. Aislamientos de *Enterobacter* y *Klebsiella* obtenidos de raíces de banano resisten-

te han mostrado una potente actividad antifúngica *in vitro* y la capacidad de sistematizarse dentro de la planta (Beltran-Garcia *et al.*, 2021).

La caracterización funcional de cepas mediante genómica comparativa ha permitido identificar *clusters* de genes de biocontrol en genomas bacterianos. En este sentido, el genoma de *B. velezensis*, un potente antagonista de *Foc*, reveló la presencia de *clusters* génicos completos para la síntesis de surfactina, fengicina y bacilysina (Yang *et al.*, 2023).

La modulación del microbioma nativo por parte de los bioinoculantes es un mecanismo indirecto de gran relevancia (Berg *et al.*, 2021). La aplicación de consorcios seleccionados no solo introduce biocontroladores, sino que también modifica la estructura de la comunidad microbiana nativa, favoreciendo el desarrollo de taxones supresores y desplazando a aquellos que podrían ser compatibles con *Foc* (Leal-Medina *et al.*, 2024).

La producción de sustancias volátiles orgánicas (VOCs), por parte de bacterias del género *Bacillus*, ha ganado atención como un mecanismo de acción a distancia (Grahova *et al.*, 2023). Estos VOCs, como el 2,3-butanodiol, pueden inhibir el crecimiento de *Foc* e inducir respuestas de defensa en la planta, incluso sin un contacto físico directo entre la bacteria y el hongo (Prigigallo *et al.*, 2022).

A pesar del prometedora panorama, la eficacia de estos mecanismos en condiciones de campo es modulada por factores abióticos como el pH del suelo, la textura y el contenido de materia orgánica (Du *et al.*, 2022). Suelos con alta diversidad microbiana intrínseca suelen responder mejor a las inoculaciones, ya que proporcionan un ambiente ecológico más estable para el establecimiento de los biocontroladores (Ravi *et al.*, 2022).

La integración de los bioinoculantes con prácticas de manejo como la adición de materia orgánica (biofertilizantes) ha demostrado ser una estrategia exitosa (Hathurusinghe *et al.*, 2024). La materia orgánica actúa como un vehículo y sustrato energético para las bacterias, amplificando y prolongando en el tiempo la expresión de sus mecanismos de biocontrol (Tao *et al.*, 2023).

Los desafíos para la aplicación a gran escala incluyen la formulación de productos que mantengan la viabilidad celular y la estabilidad de los metabolitos activos (Bubici *et al.*, 2019). La investigación actual

se centra en el desarrollo de biopolímeros y microencapsulados que protejan a las bacterias de las condiciones ambientales adversas (Saber-Riseh *et al.*, 2021).

El microbioma bacteriano despliega un arsenal multifacético contra *Foc*, donde la antibiosis, la competencia, el parasitismo y la RSI actúan de forma sinérgica (Ayaz *et al.*, 2023). La tendencia futura se dirige al diseño racional de consorcios multifuncionales, seleccionados mediante herramientas meta-ómicas, para lograr una supresión robusta y duradera de la marchitez por *Fusarium* en sistemas de producción bananera.

Desafíos para la aplicación en campo

Los estudios *in vitro* constituyen la primera línea de evidencia para demostrar el potencial antagonístico de los consorcios bacterianos. En estas condiciones controladas, es común observar una potente inhibición del crecimiento micelial y una clara actividad de antibiosis contra microorganismos de la rizósfera (Florencio-Anastasio *et al.*, 2022). Estos ensayos permiten descartar cepas ineficaces y seleccionar las combinaciones más sinérgicas antes de pasar a experimentos más complejos.

La transición a los ensayos en invernadero frecuentemente confirma la eficacia de estos consorcios. Bajo condiciones semicontroladas, se ha documentado una significativa reducción de la incidencia de la enfermedad y una mejora en los parámetros de crecimiento de las plantas, como la altura y el peso seco. Estos resultados validan que los mecanismos de biocontrol observados *in vitro* pueden funcionar en un sistema planta-suelo (Izquierdo-García *et al.*, 2024).

A pesar del éxito en condiciones semicontroladas, la eficacia en campo abierto es notablemente variable y a menudo inferior. Este fenómeno, conocido como la brecha de eficacia, representa el principal cuello de botella para la comercialización de bioinoculantes. La complejidad del ambiente edáfico impone barreras que no están presentes en el laboratorio o el invernadero (Shafi *et al.*, 2023).

La competitividad y persistencia de las cepas introducidas se ve profundamente afectada por la comunidad microbiana nativa del suelo. Este microbioma residente, diverso y adaptado, compite ferozmente por los nichos y recursos disponibles, lo que puede

llevar a la exclusión competitiva de los inoculantes bacterianos antes de que puedan establecer una población suficiente para suprimir a *Foc* (Zhang *et al.*, 2024).

Entre los factores abióticos, las fluctuaciones en la humedad del suelo y la temperatura son críticos. Condiciones de sequía o estrés hídrico pueden limitar la movilidad bacteriana y la disponibilidad de nutrientes, mientras que las temperaturas extremas pueden afectar directamente la fisiología y la tasa de crecimiento de los consorcios introducidos, reduciendo su eficacia biocontroladora (Olivares *et al.*, 2021).

La química del suelo, particularmente el pH y la estructura, modula la actividad microbiana. Un pH fuera del rango óptimo para el consorcio puede inhibir su metabolismo y la producción de compuestos antifúngicos (Bubici *et al.*, 2019). Del mismo modo, suelos compactados pueden limitar la difusión de estas moléculas beneficiosas, aislando a las bacterias introducidas del microorganismo fitopatógeno diatoma (Rodríguez-Yzquierdo *et al.*, 2023).

Ante estos desafíos, el enfoque ha evolucionado desde la simple introducción de uno o dos microorganismos beneficiosos hacia la modulación del microbioma nativo. Las estrategias más robustas buscan enriquecer o estimular selectivamente a los taxones beneficiosos ya presentes en la rizósfera, creando un estado supresor de enfermedades más resiliente y adaptado a las condiciones locales (Bakker *et al.*, 2020).

La creación de consorcios diseñados a partir de cepas que no solo son antagonistas, sino también competidoras eficaces y capaces de inducir la RSI, representa una estrategia integral. Este enfoque multicomponente ataca a microorganismos desde varios frentes simultáneamente, aumentando la probabilidad de éxito en el campo (Martins *et al.*, 2023).

Para que estas estrategias sean comercialmente viables, es imperativo optimizar las formulaciones y los métodos de aplicación. De forma general, los avances en microencapsulación, el uso de protectores contra la desecación y aditivos que mejoran la adhesión a las semillas son cruciales para garantizar la estabilidad del producto durante el almacenamiento y la supervivencia de las bacterias en el momento de la inoculación (Saber-Riseh *et al.*, 2021).

Finalmente, mientras que los resultados preliminares *in vitro* y en invernadero son altamente prometedores, la aplicación a escala comercial exige superar la barrera del campo. El futuro del manejo integrado de enfermedades radica en la modulación inteligente del microbioma, respaldada por formulaciones de última generación que aseguren la entrega, estabilidad y persistencia de los inoculantes, cerrando finalmente la brecha entre el potencial y la práctica (Ayaz *et al.*, 2023).

CONCLUSIONES

La amenaza global de *Foc* TR4 para el cultivo de banano exige soluciones innovadoras y sostenibles. Si bien los resultados *in vitro* y de invernadero que demuestran el potencial de los consorcios bacterianos para suprimir el microorganismo a través de mecanismos sinérgicos como la antibiosis, la competencia y la RSI son altamente prometedores, su eficacia en campo sigue siendo un desafío crítico. Esta brecha entre el laboratorio y la aplicación real se debe a la complejidad del suelo, influenciada por factores abióticos (pH, textura, humedad) y bióticos (competencia con el microbioma nativo). Por lo tanto, la modulación del microbioma representa el paradigma más robusto para el manejo integrado de la enfermedad. Sin embargo, su aplicación a escala comercial requiere urgentemente de la optimización de formulaciones (*e.g.* microencapsulación) y métodos de aplicación que garanticen la estabilidad, persistencia y establecimiento exitoso de los inoculantes bacterianos en condiciones ambientales dinámicas y diversas.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la Investigación y Academia (CEDIA) por el apoyo financiero otorgado al presente trabajo de investigación, desarrollo e innovación a través del proyecto CEDIA I+D+i-XVII-2022-30 “Proyecto A.D.A.M. (App móvil, Diagnóstico, Aplicación de microorganismos, y Métodos de selección temprana para fitomejoramiento): Acciones integradas de biotecnología y arquitectura de nube para salvaguardar los bananos de la actual pandemia por *Fusarium* Raza 4 Tropical”. Igualmente agradecemos al CONSEJO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN y a la DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y

DESARROLLO DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO por el apoyo brindado.

BIBLIOGRAFÍA

- ADHIKARY, S., RAHMAN, M., KUNDU, M., HOSEN, M. A. E. and HOSSAIN, M. M. 2024. *Fusarium* wilt of banana: challenges and resilience. *OnLine Journal of Biological Sciences*, 24 (4): 678-694.
- ANDERSON, J. and AITKEN, E. 2021. Effect of in Planta Treatment of 'Cavendish' Banana with Herbicides and Fungicides on the Colonisation and Sporulation by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Subtropical Race 4. *Journal of Fungi*, 7 (3): 184.
- AYAZ, M., LI, C. H., ALI, Q., ZHAO, W., CHI, Y. K., SHAFIQ, M. and HUANG, W. K. 2023. Bacterial and fungal biocontrol agents for plant disease protection: Journey from lab to field, current status, challenges, and global perspectives. *Molecules*, 28 (18): 6735.
- BAKKER, P. A., BERENDSEN, R. L., VAN PELT, J. A., VISMANS, G., YU, K., LI, E. and PIETERSE, C. M. 2020. The soil-borne identity and microbiome-assisted agriculture: looking back to the future. *Molecular Plant*, 13 (10): 1394-1401.
- BELTRAN-GARCIA, M. J., MARTINEZ-RODRIGUEZ, A., OLMOS-ARRIAGA, I., VALDEZ-SALAS, B., CHAVEZ-CASTRILLON, Y. Y., DI MASCIO, P. and WHITE, J. F. 2021. Probiotic endophytes for more sustainable banana production. *Microorganisms*, 9 (9): 1805.
- BERG, G., KUSSTATSCHER, P., ABDELFAH, A., CERNAVA, T. and SMALLA, K. 2021. Microbiome modulation—toward a better understanding of plant microbiome response to microbial inoculants. *Frontiers in Microbiology*, 12: 650610.
- Biessy, A. and Filion, M. 2021. Phloroglucinol derivatives in plant-beneficial *Pseudomonas* spp.: biosynthesis, regulation, and functions. *Metabolites*, 11 (3): 182.
- BOULAHOUAT, S., CHERIF-SILINI, H., SILINI, A., BOUKET, A. C., LUPTAKOVA, L., ALENEZI, F. N. and BELBAHRI, L. 2023. Biocontrol efficiency of rhizospheric *Bacillus* against the plant pathogen *Fusarium oxysporum*: A promising approach for sustainable agriculture. *Microbiology Research*, 14 (3): 892-908.
- BUBICI, G., KAUSHAL, M., PRIGIGALLO, M. I., GÓMEZ-LAMA CABANÁS, C. and MERCADO-BLANCO, J. 2019. Biological control agents against *Fusarium* wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, 10: 616.
- CERVANTES, M. A. G., ORTIZ, P. J. V. y VELÁZQUEZ, S. F. 2024. Sobresalientes Potencialidades de las Bacterias del Género *Bacillus* para el Biocontrol de Fitopatógenos y para Biorremediación. *Biotechnología y Sustentabilidad*, 9 (1): 36-55.
- CHENG, C., LIU, F., SUN, X., TIAN, N., MENSAH, R. A., LI, D. and LAI, Z. 2019. Identification of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 (*Foc* TR4) responsive miRNAs in banana root. *Scientific Reports*, 9 (1): 13682.
- DROR, B., AMUTUHAIRE, H., FRENKEL, O., JURKEVITCH, E. and CYTRYN, E. 2022. Identification of bacterial populations and functional mechanisms potentially involved in biochar-facilitated antagonism of the soilborne pathogen *Fusarium oxysporum*. *Phytobiomes Journal*, 6 (2): 139-150.
- DU, C., YANG, D., YE, Y., PAN, L., ZHANG, J., JIANG, S. and FU, G. 2022. Construction of a compound microbial agent for biocontrol against *Fusarium* wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, 13: 1066807.
- FIGUEROA, M. A. G. and HAGONOS JR, A. S. 2022. Antifungal Effects of Different Commercial Products Against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* TR4 Causing *Fusarium* Wilt of Banana. *American Journal of Environment and Climate*, 1 (2): 01-08.
- FLORENCIO-ANASTASIO, J. G., GARCÍA-ÁVILA, C. D. J., ALARCÓN, A., FERRERA-CERRATO, R., QUEZADA-SALINAS, A., ALMA-RAZ-SUÁREZ, J. J. and HERNÁNDEZ-RAMOS, L. 2022. Effectiveness of antagonistic bacteria, commercial fungicides, and fourth generation quaternary ammonium salts, against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race "1 or 2". *European Journal of Plant Pathology*, 163 (3): 719-731.
- GRAHOVAC, J., PAJČIN, I. and VLAJKOV, V. 2023. *Bacillus* VOCs in the context of biological control. *Antibiotics*, 12 (3): 581.
- HATHURUSINGHE, S. H. K., AZIZOGLU, U. and SHIN, J. H. 2024. Holistic Approaches to Plant

- Stress Alleviation: A Comprehensive Review of the Role of Organic Compounds and Beneficial Bacteria in Promoting Growth and Health. *Plants*, 13 (5): 695.
- HE, P., LI, S., XU, S., FAN, H., WANG, Y., ZHOU, W. and ZHENG, S. J. 2021. Monitoring tritrophic biocontrol interactions between *Bacillus* spp., *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, tropical race 4, and banana plants *in vivo* based on fluorescent transformation system. *Frontiers in Microbiology*, 12: 754918.
- HERNÁNDEZ-MELCHOR, D. J., GUERRERO-CHÁVEZ, A. C., FERRERA-RODRÍGUEZ, M. R., FERRERA-CERRATO, R., LARSEN, J. and ALARCÓN, A. 2023. Cellulase and chitinase activities and antagonism against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1 of six *Trichoderma* strains isolated from Mexican maize cropping. *Biotechnology Letters*, 45 (3): 387-400.
- IZQUIERDO-GARCÍA, L. F., CARMONA-GUTIÉRREZ, S. L., MORENO-VELANDIA, C. A., VILLARREAL-NAVARRETE, A. D. P., BURBANO-DAVID, D. M., QUIROGA-MATEUS, R. Y. and BETANCOURT-VÁSQUEZ, M. 2024. Microbial-Based Biofungicides Mitigate the Damage Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Race 1 and Improve the Physiological Performance in Banana. *Journal of Fungi*, 10 (6): 419.
- KAUSHAL, M., MAHUKU, G. and SWENNEN, R. 2020. Metagenomic insights of the root colonizing microbiome associated with symptomatic and non-symptomatic bananas in *Fusarium* wilt infected fields. *Plants*, 9 (2): 263.
- KAWICHA, P., NITAYAROS, J., SAMAN, P., THAPORN, S., THANYASIRIWAT, T., SOMTRAKOON, K., SANGDEE, K. and SANGDEE, A. 2023. Evaluation of soil *Streptomyces* spp. for the biological control of *Fusarium* wilt disease and growth promotion in tomato and banana. *Plant Pathology Journal*, 39 (1): 108.
- KEMA, G. H., DRENTH, A., DITA, M., JANSEN, K., VELLEMA, S. and STOORVOGEL, J. J. 2021. *Fusarium* wilt of banana, a recurring threat to global banana production. *Frontiers in Plant Science*, 11: 628888.
- LEAL-MEDINA, C., LOPATIN, J., CONTRERAS, A., GONZÁLEZ, M. E. and GALLEGUILLOS, M. 2024. Post-fire *Pinus radiata* invasion in a threatened biodiversity hotspot forest: A multi-scale remote sensing assessment. *Forest Ecology and Management*, 561: 121861.
- LI, S., MA, J., LI, S., CHEN, F., SONG, C., ZHANG, H., JIANG, M. and SHEN, N. 2022. Comparative transcriptome analysis unravels the response mechanisms of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* to a biocontrol agent, *Pseudomonas aeruginosa* Gxun-2. *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (23): 15432.
- LIU, J., HUANG, Y., LIU, R., LIANG, Y., ZHANG, H., SHEN, N., Yang, D. and JIANG, M. 2024. Antimicrobial mechanisms and antifungal activity of compounds generated by banana rhizosphere *Pseudomonas aeruginosa* Gxun-2 against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Frontiers in Microbiology*, 15: 1456847.
- IV, N., TAO, C., OU, Y., WANG, J., DENG, X., LIU, H. and SHEN, Q. 2023. Root-associated antagonistic *Pseudomonas* spp. contribute to soil suppressiveness against banana *Fusarium* wilt disease of banana. *Microbiology Spectrum*, 11 (2): e03525-22.
- MALAKA, S. M., THURANIRA, D. M., MWANGI, M., NCHORE, S. B., LUBABALI, H. A., KURIA, S., ASAVA, K. K., OMARI, D. O., GICHURU, E. K. ALWORAH, O. A. and GATHAMBIRI, C. W. 2024. Race 1 of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*: the threat of banana cultivation in Central and Eastern Kenya. *CABI Agriculture and Bioscience*, 5 (1): 112.
- MARTÍNEZ, G., OLIVARES, B. O., REY, J. C., ROJAS, J., CARDENAS, J., MUENTES, C. and DAWSON, C. 2023. The advance of *Fusarium* wilt tropical race 4 in Musaceae of Latin America and the Caribbean: Current situation. *Pathogens*, 12 (2): 277.
- MARTINS, S. J., PASCHE, J., SILVA, H. A. O., SELTEN, G., SAVASTANO, N., ABREU, L. M. and CERNAVA, T. 2023. The use of synthetic microbial communities to improve plant health. *Phytopathology*, 113 (8): 1369-1379.
- MINCHEV, Z., KOSTENKO, O., SOLER, R. and POZO, M. J. 2021. Microbial Consortia for Effective Biocontrol of Root and Foliar Diseases in Tomato. *Frontier in Plant Science*, 12: 756368.
- MUNHOZ, T., VARGAS, J., TEIXEIRA, L., STAVER, C. and DITA, M. 2024. *Fusarium* Tropi-

- cal Race 4 in Latin America and the Caribbean: status and global research advances towards disease management. *Frontiers in Plant Science*, 15: 1397617.
- NAKKEERAN, S., RAJAMANICKAM, S., SARAVANAN, R., VANTHANA, M. and SOORIANATHASUNDARAM, K. 2021. Bacterial endophytome-mediated resistance in banana for the management of *Fusarium wilt*. 3 *Biotech*, 11 (6): 267.
- NAPITUPULU, T. P., RAMADHANI, I., KANTI, A. and SUDIANA, I. M. 2021. Diversity, phosphate solubilizing, and IAA production of culturable fungi associated with healthy and wilt banana. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 54 (19-20): 2306-2332.
- NGUYEN, T. V., TRAN-NGUYEN, L. T. T., WRIGHT, C. L., TREVORROW, P. and GRICE, K. 2019. Evaluation of the efficacy of commercial disinfectants against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 1 and tropical race 4 propagules. *Plant Disease*, 103 (4): 721-728.
- OLIVARES, B. O., REY, J. C., LOBO, D., NAVAS-CORTÉS, J. A., GÓMEZ, J. A. and LANDA, B. B. 2021. *Fusarium* wilt of bananas: A review of agro-environmental factors in the Venezuelan production system affecting its development. *Agronomy*, 11 (5): 986.
- ONG, J. X., SUHAIMI, N. S. M. and SAIDI, N. B. 2024. The Microbiome of Banana and Its Role in Managing *Fusarium* Wilt Disease. En: Wong, Mui-Yun. (Ed.). *Advances in Tropical Crop Protection*. Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 105-120.
- PÉREZ-MATOS, A. E., GONZÁLEZ, X. C., RESTO, T. O., GONZÁLEZ, G. C. and GONZÁLEZ, N. A. 2023. *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 (*Foc* TR4): Latent Risk for Banana and Plantains Crops in Puerto Rico. *Current Agriculture Research Journal*, 11 (3): 761-80.
- PRIGIGALLO, M. I., GÓMEZ-LAMA CABANÁS, C., MERCADO-BLANCO, J. and BUBICI, G. 2022. Designing a synthetic microbial community devoted to biological control: The case study of *Fusarium* wilt of banana. *Frontiers in Microbiology*, 13: 967885.
- QI, Y., OSSOWICKI, A., YERGEAU, É., VIGANI, G., GEISSEN, V. and GARBEVA, P. 2022. Plastic mulch film residues in agriculture: impact on soil suppressiveness, plant growth, and microbial communities. *FEMS Microbiology Ecology*, 98 (2): fiac017.
- RAVI, S., SEVUGAPPERUMAL, N., NALLUSAMY, S., SHANMUGAM, H., MATHIYAZHAGAN, K., RANGASAMY, A., AKKANNA S. K. and VARAGUR GANESAN, M. 2022. Differential bacterial endophytome in *Foc* resistant banana cultivar displays enhanced antagonistic activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (*Foc*). *Environmental Microbiology*, 24 (6): 2701-2715.
- RODRÍGUEZ-YZQUIERDO, G., OLIVARES, B. O., GONZÁLEZ-ULLOA, A., LEÓN-PACHECO, R., GÓMEZ-CORREA, J. C., YACOMELLO-HERNÁNDEZ, M., CARRASCAL-PÉREZ, F., FLOREZ-CORDERO, E., SOTO-SUÁREZ, M. and BETANCOURT-VÁSQUEZ, M. 2023. Soil predisposing factors to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 on banana crops of La Guajira, Colombia. *Agronomy*, 13 (10): 2588.
- SABERI-RISEH, R., MORADI-POUR, M., MOHAMMADINEJAD, R. and THAKUR, V. K. 2021. Biopolymers for biological control of plant pathogens: Advances in microencapsulation of beneficial microorganisms. *Polymers*, 13 (12): 1938.
- SHAFI, Z., ILYAS, T., SHAHID, M., VISHWAKARMA, S. K., MALVIYA, D., YADAV, B. and SINGH, H. V. 2023. Microbial management of *Fusarium* wilt in banana: a comprehensive overview. En: Singh, U. B., Kumar, R. And Singh, H. B. (Eds.). *Detection, Diagnosis and Management of Soil-Borne Phytopathogens*, Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 413-435.
- SHEN, N., LI, S., LI, S., ZHANG, H. and JIANG, M. 2022. The siderophore-producing bacterium, *Bacillus siamensis* Gxun-6, has an antifungal activity against *Fusarium oxysporum* and promotes the growth of banana. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 32 (1): 34.
- SUN, K., XIE, X. G., LU, F., ZHANG, F. M., ZHANG, W., HE, W. and DAI, C. C. 2021. Peanut preinoculation with a root endophyte induces plant resistance to soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* via activation of salicylic acid-dependent signaling. *Plant and Soil*, 460 (1): 297-312.
- TAO, C., WANG, Z., LIU, S., LV, N., DENG, X., XIONG, W. and KOWALCHUK, G. A. 2023. Additive fungal interactions drive biocontrol of

- Fusarium* wilt disease. *New Phytologist*, 238 (3): 1198-1214.
- TRIPATHI, L., NTUI, V. O. and TRIPATHI, J. N. 2024. Application of CRISPR/Cas-based gene-editing for developing better banana. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12: 1395772.
- WONG, C. K. F., SAIDI, N. B., VADAMALAI, G., TEH, C. Y. and ZULPERI, D. 2019. Effect of bioformulations on the biocontrol efficacy, microbial viability and storage stability of a consortium of biocontrol agents against *Fusarium* wilt of banana. *Journal of Applied Microbiology*, 127 (2): 544-555.
- YANG, D., WANG, L., WANG, T., ZHANG, Y., ZHANG, S. and LUO, Y. 2021. Plant growth-promoting rhizobacteria HN6 induced the change and reorganization of *Fusarium* microflora in the rhizosphere of banana seedlings to construct a healthy banana microflora. *Frontiers in Microbiology*, 12: 685408.
- YANG, F., JIANG, H., MA, K., WANG, X., LIANG, S., CAI, Y. and SHI, X. 2023. Genome sequencing and analysis of *Bacillus velezensis* VJH504 reveal biocontrol mechanism against cucumber *Fusarium* wilt. *Frontiers in Microbiology*, 14: 1279695.
- ZHANG, W., BAI, T., JAMIL, A., FAN, H., LI, X., ZHENG, S. J. and XU, S. 2024. The interaction between *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4 and soil properties in banana plantations in Southwest China. *Plant and Soil*, 505 (1): 779-793.
- ZHANG, W., CHANG, Y., ZHONG, W., ZHANG, A. and LIN, Y. 2023. Antifungal mechanisms of polymeric quaternary ammonium salts against conidia of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, race 4. *European Journal of Plant Pathology*, 165 (2): 317-331.
- ZHANG, Y., LIU, S., MOSTERT, D., YU, H., ZHUO, M., LI, G. and MA, L. J. 2024. Virulence of banana wilt-causing fungal pathogen *Fusarium oxysporum* tropical race 4 is mediated by nitric oxide biosynthesis and accessory genes. *Nature Microbiology*, 9 (9): 2232-2243.
- ZHANG, Z., ZHANG, Q., CUI, H., LI, Y., XU, N., LU, T. and QIAN, H. 2022. Composition identification and functional verification of bacterial community in disease suppressive soils by machine learning. *Environmental Microbiology*, 24 (8): 3405-3419.
- ZHU, Z., WU, G., DENG, R., HU, X., TAN, H., CHEN, Y. and LI, J. 2023. Spatiotemporal biocontrol and rhizosphere microbiome analysis of *Fusarium* wilt of banana. *Communications Biology*, 6 (1): 27.

CITAR COMO:

LEIVA-MORA, M. 2025. El microbioma bacteriano: una estrategia sostenible para el manejo de la marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* raza tropical 4 en el cultivo de bananos. *Centro Agrícola*, 52 (2025) e2461



Artículo de **libre Acceso** bajo los términos de una *Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional*. Se permite, sin restricciones el uso, distribución, traducción y reproducción del documento, siempre que la obra sea debidamente citada.