



**Somos calidad,
somos USC**

Estrategias sostenibles para el control biológico de *Fusarium spp.*: Una revisión sistemática

Autor

Maria Camila Melo Barona

**Título por el que opta
Microbiólogo**

Director

Julián Alonso Rojas Barreto

**Grupo de Investigación
GIMIA**

**Línea de Investigación
Microbiología ambiental**

**Facultad de Ciencias Básicas
Microbiología
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2026**

IMPACTOS

Impactos asociados a la investigación del trabajo de grado según los criterios enlistados.

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO
Económico	Estrategias de control biológico que reducen pérdidas por <i>Fusarium spp.</i> en cultivos de banano, trigo, tomate y otros.	Agricultores, empresas agroindustriales, exportadores de cultivos.
Responsabilidad social	Capacitación a comunidades agrícolas en manejo sostenible y control biológico de patógenos.	Comunidades rurales, asociaciones de productores.
Científico	Generación de nuevo conocimiento sobre microorganismos antagonistas y nanopartículas aplicadas a <i>Fusarium spp.</i> ; publicaciones en revistas indexada.	Comunidad académica, investigadores en fitopatología y biotecnología.
Indicadores de Gestión	Protocolos de biocontrol implementables, guías de manejo integrado de <i>Fusarium spp.</i>	Instituciones agrícolas, autoridades regulatorias.
Tecnológico	Desarrollo de bioformulaciones y nanopartículas microbianas aplicables en campo.	Empresas biotecnológicas, laboratorios de control biológico.
Técnico	Procedimientos estandarizados de aislamiento, caracterización y aplicación de microorganismos antagonistas.	Estudiantes, técnicos de laboratorio, extensionistas agrícolas.
Ambiental	Reducción del uso de agroquímicos y menor contaminación de suelos y aguas.	Ecosistemas agrícolas, comunidad en general.
Social	Incremento de la seguridad alimentaria mediante cultivos saludables; integración de productores en programas de innovación.	Productores, consumidores locales.
Cultural	Valoración de prácticas agrícolas tradicionales combinadas con biotecnología moderna.	Comunidades agrícolas, universidades, programas de extensión rural.

Fuente: Elaboración propia.

Estrategias sostenibles para el control biológico de *Fusarium spp.*: Una revisión sistemática

Maria Camila Melo Barona¹ (maria.melo02@usc.edu.co)

¹Grupo de Investigación GIMIA, Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

El género *Fusarium spp.* es un grupo de hongos fitopatógenos típicamente asociados al marchitamiento vascular que afectan cultivos de interés comercial por lo cual se han reportado estrategias para su control. Con el fin de conocer los avances en el control de este fitopatógeno se realizó una revisión sistemática con metodología PRISMA la cual recopiló las diferentes estrategias reportadas para el control biológico frente a especies de *Fusarium spp.*, que afectan cultivos como banano, trigo, tomate, maíz, garbanzo, melón y pepino. La metodología consistió en un análisis comparativo de los mecanismos de acción reportados, incluyendo micoparasitismo, antibiosis, competencia biológica y promoción del crecimiento vegetal. Los resultados indicaron el uso de microorganismos antagonistas como *Trichoderma spp.*, *Bacillus spp.*, *Streptomyces spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Diaporthe spp.*, consorcios microbianos nativos, nanopartículas metálicas y bioformulaciones que estas estrategias permitieron reducir significativamente la incidencia de enfermedades por *Fusarium spp.*, mejorar la productividad de los cultivos y disminuir la dependencia de agroquímicos. Se destaca que la implementación de control biológico basado en microorganismos y nanopartículas representa una alternativa sostenible y económicamente viable para el control de *Fusarium spp.* con impactos ambientales positivos en la agricultura.

Palabras clave: *Fusarium spp.*, Marchitamiento vascular; microorganismos antagonistas; micoparasitismo; antibiosis.

Sustainable strategies for biological control of *Fusarium spp.*: a systematic review.

ABSTRACT

The genus *Fusarium spp.* is a group of phytopathogenic fungi typically associated with vascular wilting that affects commercially important crops, which is why strategies for its control have been reported. In order to learn about advances in the control of this phytopathogen, a systematic review was conducted using the PRISMA methodology, which compiled the different strategies reported for biological control of *Fusarium spp.* species that affect crops such as bananas, wheat, tomatoes, corn, chickpeas, melons, and cucumbers. The methodology consisted of a comparative analysis of the reported mechanisms of action, including mycoparasitism, antibiosis, biological competition, and plant growth promotion. The results indicated the use of antagonistic microorganisms such as *Trichoderma spp.*, *Bacillus spp.*, *Streptomyces spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Diaporthe spp.*, native microbial consortia, metal nanoparticles, and bioformulations. These strategies significantly reduced the incidence of *Fusarium spp.* diseases, improved crop productivity, and decreased dependence on agrochemicals. It should be noted that the implementation of biological control based on microorganisms and nanoparticles represents a sustainable and economically viable alternative for the control of *Fusarium spp.* with positive environmental impacts on agriculture.

Keywords: *Fusarium spp.*, vascular wilt; antagonistic microorganisms; mycoparasitism; antibiotic.

HIGHLIGHTS

- Los Microorganismos rizosféricos son una alternativa sostenible al control químico.
- Diversidad microbiana rizosférico presenta una actividad antifúngica frente a *Fusarium spp.*
- Los mecanismos de antagonismo microbiano incluyen micoparasitismo, antibiosis, competencia biológica y promoción del crecimiento vegetal.

1. INTRODUCCIÓN

El género *Fusarium spp.* agrupa un conjunto diverso de hongos fitopatógenos que representan una de las mayores amenazas para la agricultura mundial debido a su amplia distribución geográfica, su persistencia en el suelo, su capacidad para atacar múltiples especies vegetales de importancia económica y su habilidad para desarrollar formas de resistencia que dificultan su erradicación completa. Estos fitopatógenos, pertenecientes al reino *Fungi*, división *Ascomycota*, clase *Sordariomycetes*, orden *Hypocreales* y familia *Nectriaceae*, se caracterizan morfológicamente por la producción de macroconidias fusiformes, típicamente con forma de canoa o media luna, multicelulares, hialinas o ligeramente pigmentadas, con células apicales y basales características que permiten su identificación microscópica, microconidias unicelulares o bicelulares producidas en falsas cabezas o cadenas, y en algunas especies, clamidosporas de pared gruesa que funcionan como estructuras de resistencia permitiendo la supervivencia prolongada del hongo en condiciones adversas de temperatura, humedad o ausencia de hospedero susceptible (O'Donnell et al., 2013).

El ciclo de vida del género *Fusarium spp.* incluye fases de reproducción asexual mediante la producción masiva de conidios que se dispersan por agua de riego, lluvia, viento, herramientas agrícolas, maquinaria, calzado, animales y material vegetal infectado, así como fases de reproducción sexual en algunas especies que producen peritecios y ascosporas, aunque la fase teleomórfica es raramente observada en condiciones naturales y ha sido descrita únicamente para un número limitado de especies del género (Leslie & Summerell, 2006). Su desarrollo óptimo generalmente ocurre en rangos de temperatura entre 20 y 30 °C, con alta humedad relativa y suelos con drenaje deficiente, condiciones que favorecen la germinación de esporas y la penetración a través de raíces jóvenes o tejidos lesionados. Factores como el pH del suelo, la textura edáfica, el contenido de materia orgánica y la composición de la microbiota nativa influyen significativamente en la expresión de la enfermedad y en la dinámica poblacional del patógeno (Agrios, 2005).

Entre las especies de mayor relevancia fitopatológica y económica a nivel mundial destaca *Fusarium oxysporum*, el cual se especializa en un amplio rango de hospederos ejerciendo su efecto patógeno mediado por factores de virulencia específicos, proteínas efectoras secretadas que suprimen o evaden las respuestas de defensa del hospedero, y la capacidad de colonizar el sistema vascular de la planta produciendo marchitamientos vasculares que resultan de la obstrucción física de los vasos del xilema por el crecimiento micelial y compuestos fenólicos por parte de la planta en respuesta a la infección, y el desequilibrio hídrico severo que conduce al marchitamiento irreversible, clorosis foliar progresiva y finalmente la muerte de la planta afectada. Por otro lado, otras especies como *Fusarium graminearum* la cual es reconocida el principal agente causal de la fusariosis de la espiga en cereales, mientras que *Fusarium verticillioides* destaca por su asociación con maíz y su capacidad para producir fumonisinas. Por su parte, *Fusarium solani* comprende múltiples linajes filogenéticos responsables de pudriciones

radiculares en leguminosas, solanáceas y otros cultivos (Munkvold, 2003; Edel-Hermann & Lecomte, 2019; Leslie & Summerell, 2006).

Estas especies afectan cultivos elementales para la seguridad alimentaria global como el banano, el trigo, el tomate, el maíz, el garbanzo, el melón, el pepino, la fresa, el algodón, la soya, el café, el cacao y numerosas especies hortícolas, ornamentales y forestales, ocasionando enfermedades que se manifiestan en formas de pudriciones radiculares severas, deterioro del grano o fruto, necrosis de tejidos conductores, reducción de la capacidad fotosintética, disminución del vigor vegetativo y, en casos extremos, la muerte completa de la planta hospedadora, con consecuencias adversas para la productividad y rentabilidad de los sistemas agrícolas afectados (Luo et al., 2025; Pedrero-Méndez et al., 2025; Patel et al., 2024; Sarma et al., 2025).

Durante décadas la respuesta predominante frente a estas enfermedades fúngicas ha sido el uso intensivo, y en muchos casos indiscriminado, de fungicidas químicos de síntesis, combinados con prácticas de manejo agronómico tradicionales que incluyen la rotación de cultivos, el uso de variedades resistentes cuando están disponibles, la eliminación de residuos vegetales infectados, el control de la humedad del suelo y la aplicación de tratamientos de semillas, sin embargo, la eficacia de estos métodos convencionales ha mostrado un descenso progresivo y preocupante debido al surgimiento acelerado de cepas resistentes a los fungicidas más utilizados, la acumulación peligrosa de residuos tóxicos en suelos, aguas subterráneas y superficiales, cultivos y productos cosechados, el impacto ambiental derivado de su aplicación indiscriminada que incluye la contaminación de ecosistemas naturales, la reducción de la biodiversidad microbiana benéfica del suelo, la afectación de organismos no objetivo como polinizadores, enemigos naturales de plagas y fauna silvestre, así como la alteración de los ciclos biogeoquímicos necesarios para la salud de los agroecosistemas (Alsubaie et al., 2024; Nguyen et al., 2025; Omoruyi et al., 2023).

Lo anterior expuesto ha impulsado una transición urgente y necesaria hacia enfoques de manejo más sostenibles como el control biológico el cual se considera una metodología ecológica, viable y económicamente competitiva que responde a las demandas actuales de producción agrícola sustentable, seguridad alimentaria, conservación ambiental y desarrollo rural equitativo (López-Moya et al., 2025; Chavéz et al., 2022).

El control biológico tiene sus bases en la utilización estratégica de microorganismos antagonistas, organismos vivos o sus metabolitos derivados, capaces de suprimir el crecimiento, desarrollo, reproducción o actividad patogénica de microorganismos causantes de enfermedades mediante mecanismos naturales, evolutivamente desarrollados y ecológicamente integrados en los sistemas biológicos. En consecuencia, a lo antes expuesto diversos géneros microbianos han demostrado, a través de múltiples investigaciones su potencial contra especies del género *Fusarium spp.* como los hongos filamentosos del género *Trichoderma*, las bacterias Grampositivas del género *Bacillus spp.* las bacterias Gramnegativas del género *Pseudomonas spp.* las Actinobacterias del género *Streptomyces spp.* y los hongos endofíticos del género *Diaporthe spp.* cada uno de los cuales aporta características únicas, mecanismos de acción específicos y ventajas comparativas según el sistema de cultivo, las condiciones ambientales y el tipo de patógeno a controlar (Liu et al., 2026; Martínez-Medina et al., 2011; Xu et al., 2020; Wang et al., 2023).

Estas especies microbianas ejercen su acción biocontroladora a través de diferentes procesos biológicos complejos y frecuentemente sinérgicos, como el micoparasitismo directo sobre las estructuras del hongo patógeno mediante la producción de enzimas líticas que degradan las paredes celulares fúngicas, la producción y secreción de compuestos antimicrobianos de

naturaleza peptídica, que inhiben el crecimiento micelial y la germinación de esporas del patógeno, la competencia activa por nutrientes esenciales, espacio físico, oxígeno y nichos ecológicos en la rizosfera, filosfera y endosfera de las plantas, la producción de sideróforos de alta afinidad que secuestran el hierro disponible limitando su acceso al fitopatógeno, o la activación de mecanismos de defensa sistémicos, locales e inducibles en la planta hospedadora mediante la estimulación de rutas metabólicas relacionadas con la síntesis de compuestos fenólicos, fitoalexinas, proteínas relacionadas con la patogénesis, especies reactivas de oxígeno controladas y reforzamiento de barreras como la lignificación y la deposición de calosa (Jana et al., 2025; Patel et al., 2022; Erazo et al., 2021).

En este sentido, el presente trabajo tiene como propósito analizar y evaluar las estrategias del control biológico frente a especies del género *Fusarium spp.* que afectan cultivos agrícolas de alta relevancia, tomando como base los estudios científicos más recientes. Se busca así aportar un panorama actualizado que sirva de apoyo para el diseño de programas de manejo sostenible, contribuyendo a la innovación en la protección vegetal, la reducción del uso de agroquímicos y la promoción de una agricultura más saludable, competitiva y respetuosa con el ambiente.

2. METODOLOGÍA

3.1 Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda bibliográfica empleando dos tipos de bases de datos (multidisciplinarias y especializadas), así como palabras claves en español e inglés (Figura 1). Se utilizaron diferentes combinaciones de las palabras claves con el uso de operadores booleanos para obtener la mayor cantidad de publicaciones. Para la selección de las publicaciones a analizar se definieron criterios de inclusión y exclusión (Figura 1).

El diseño de la estrategia de búsqueda para llevar a cabo esta investigación se basó en la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses*), la cual está diseñada para realizar una búsqueda sistemática de documentos científicos. Para sensibilidad, se identificaron palabras claves en español (*Fusarium spp.*, control biológico, microorganismos antagonistas, *Trichoderma spp.*, *Bacillus spp.*, nanopartículas, consorcios microbianos y agricultura sostenible) e inglés (*Fusarium spp.*, biological control, antagonistic microorganisms, *Trichoderma spp.*, *Bacillus spp.*, nanoparticles, microbial consortia, sustainable agriculture) con las que se establecieron 16 combinaciones usando operadores booleanos (Tabla 1); mientras que para especificidad se seleccionaron cuatro bases de datos bibliográficas: ScienceDirect, Scopus, PubMed y Web of Science.

Tabla 1. Combinaciones de las palabras claves con el uso de operadores booleanos.

No.	Combinaciones de las palabras claves para la búsqueda
Idioma: inglés	
1	<i>Fusarium spp.</i> AND Biological Control AND <i>Trichoderma spp.</i>
2	<i>Fusarium spp.</i> AND Biological Control AND <i>Bacillus spp.</i>
3	<i>Fusarium spp.</i> AND Antagonistic Microorganisms AND Sustainable Agriculture
4	<i>Fusarium spp.</i> AND (<i>Trichoderma spp.</i> OR <i>Bacillus spp.</i>) AND Microbial Consortia
5	<i>Fusarium spp.</i> AND Nanoparticles AND Biological Control
6	<i>Fusarium spp.</i> AND (Microbial Consortia OR Antagonistic Microorganisms) AND Sustainable Agriculture
7	<i>Fusarium spp.</i> AND Biological Control AND (<i>Trichoderma spp.</i> OR <i>Bacillus spp.</i>)
8	<i>Fusarium spp.</i> AND (Nanoparticles OR Microbial Consortia) AND Sustainable Agriculture
Idioma: Español	
9	<i>Fusarium spp.</i> AND Control Biológico AND <i>Trichoderma spp.</i>
10	<i>Fusarium spp.</i> AND Control Biológico AND <i>Bacillus spp.</i>
11	<i>Fusarium spp.</i> AND Microorganismos Antagonistas AND Agricultura Sostenible
12	<i>Fusarium spp.</i> AND (<i>Trichoderma spp.</i> OR <i>Bacillus spp.</i>) AND Consorcios Microbianos
13	<i>Fusarium spp.</i> AND Nanopartículas AND Control Biológico
14	<i>Fusarium spp.</i> AND (Consorcios Microbianos OR Microorganismos Antagonistas) AND Agricultura Sostenible
15	<i>Fusarium spp.</i> AND Control Biológico AND (<i>Trichoderma spp.</i> OR <i>Bacillus spp.</i>)
16	<i>Fusarium spp.</i> AND (Nanopartículas OR Consorcios microbianos) AND Agricultura Sostenible

3.2 Criterios de inclusión y de exclusión

Entre los criterios de inclusión que formaron parte de esta revisión sistemática están: artículos de texto completo en los idiomas español e inglés, publicados entre publicaciones entre 2010 y 2025, en los que el objetivo principal del estudio fue reportar la estrategias de control biológico de *Fusarium spp.* en cultivos agrícolas. (Figura 1).

Se excluyó material bibliográfico que no fue revisado por pares académicos, artículos escritos en idiomas distintos al español e inglés, artículos fuera del marco de tiempo seleccionado, material bibliográfico (Trabajos de opinión, editoriales, comentarios, resúmenes de congresos o conferencias sin texto completo disponible, capítulos de libro, tesis no publicadas en revistas arbitradas)(Figura 1).

3.3 Extracción y análisis de la literatura

Finalmente, las citas encontradas fueron importadas al software de gestión de referencias bibliográficas Mendeley y a la herramienta Microsoft Office Excel, eliminando la duplicación entre las cuatro bases de datos (Figura 1).

El análisis de la literatura abarcó: lectura de títulos y resúmenes en los que se prescindió de aquellos artículos que no cumplían con los criterios de inclusión; lectura de textos completos de los artículos resultantes, prescindiendo nuevamente de los que no cumplían con estos criterios, para dar como resultado los artículos finales incluidos en esta revisión sistemática.

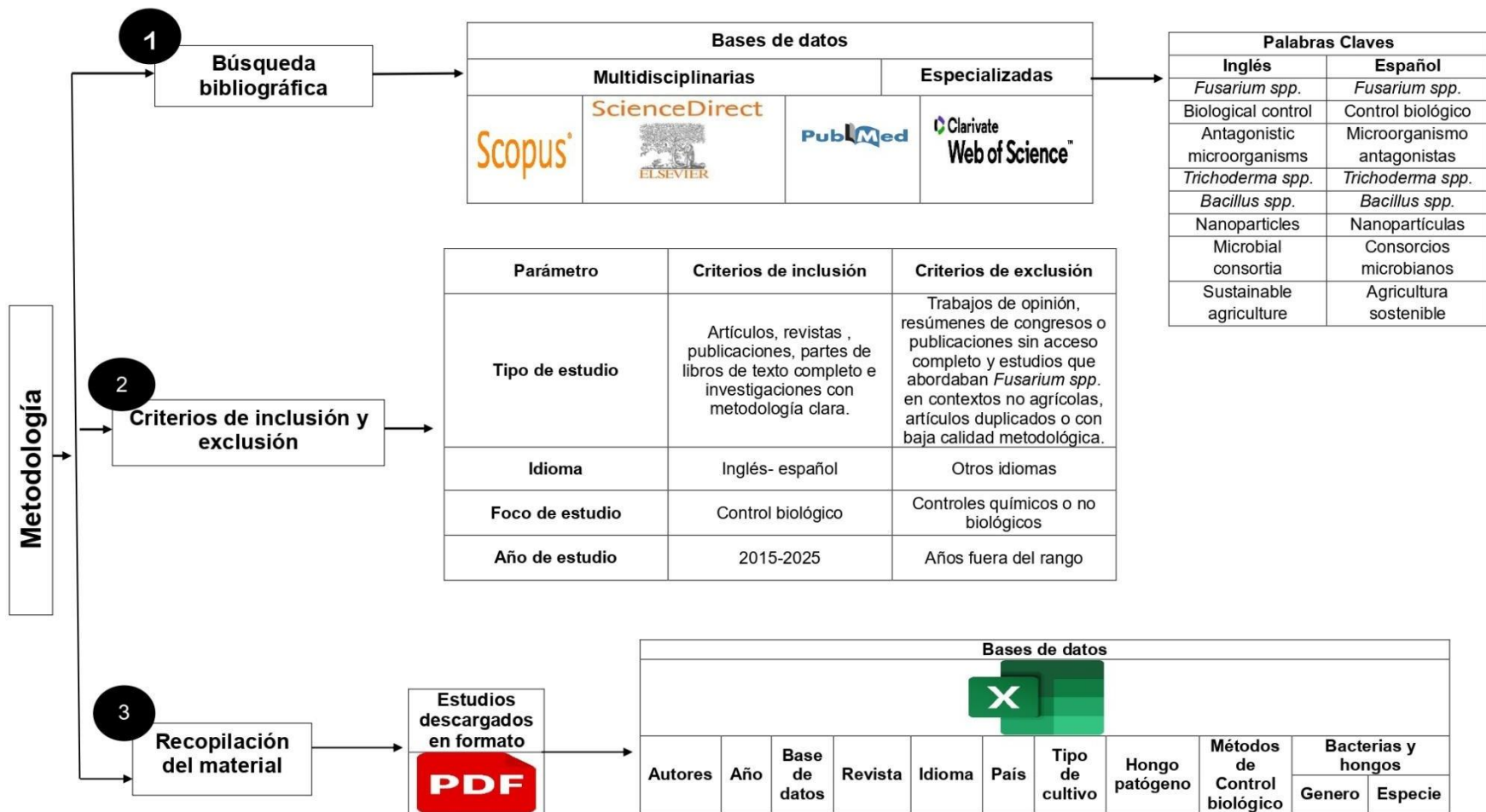


Figura 1. Esquema metodológico para la recopilación de artículos sobre control biológico de *Fusarium spp.*

Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS

La implementación de la estrategia de búsqueda arrojó un total de 400 registros iniciales provenientes de cuatro bases de datos: 81 en Scopus, 172 en Science Direct Web of Science y 54 en PubMed.

Luego de eliminar 113 artículos duplicados. Se examinaron en detalle 144 estudios (Figura 2, Tabla 2).

Finalmente, 80 artículos fueron seleccionados por cumplir con los criterios metodológicos, de relevancia, actualidad (años recientes) y alineación con los objetivos de la revisión. Estos estudios abarcan investigaciones publicadas entre 2010 y 2025, centradas en estrategias de control biológico de especies de *Fusarium spp.* en diversos cultivos agrícolas (maíz, trigo, cebada, arroz, tomate, entre otros).

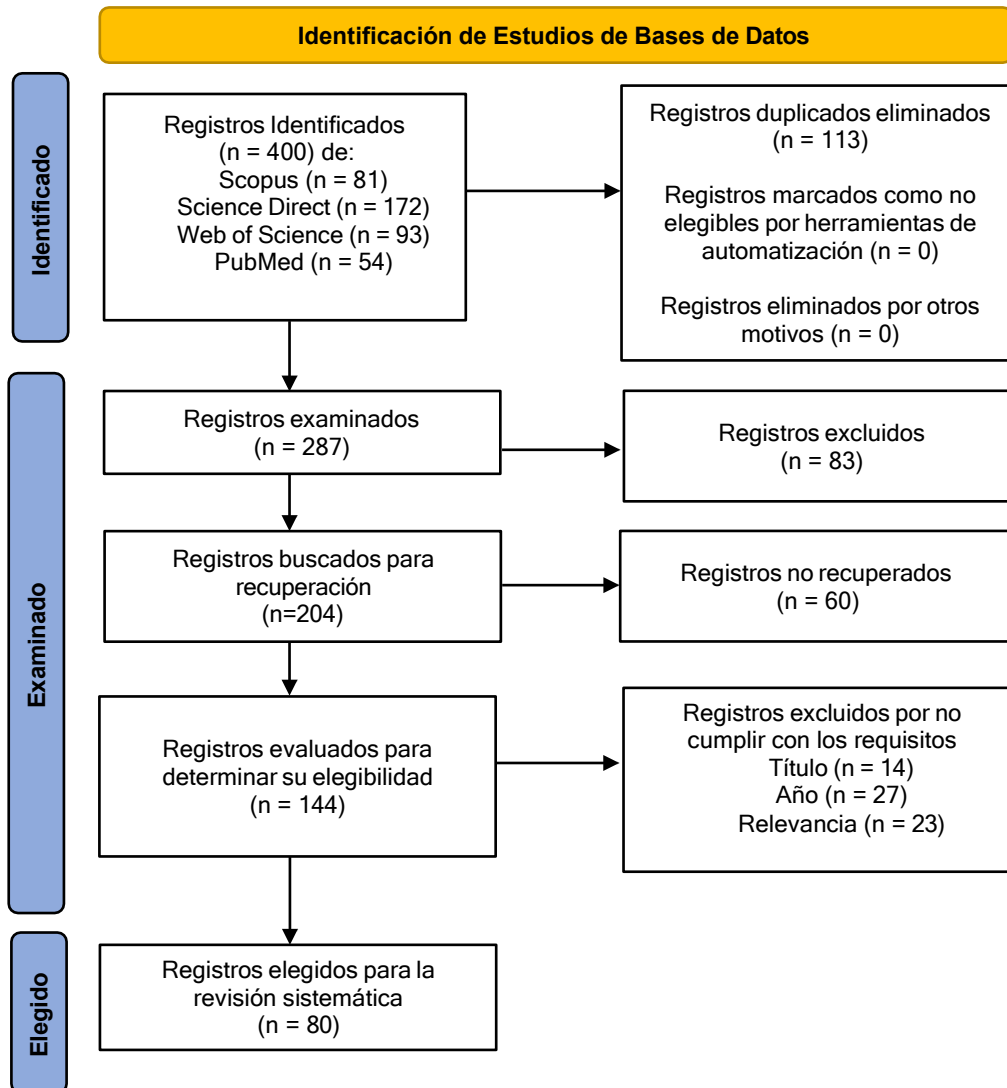


Figura 2. Diagrama de flujo prisma para selección de estudios.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Colección de datos, tras la lectura de los textos completos de los artículos seleccionados.

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
Luo, M. et al. (1)	2025	Science Direct	physiological and Molecular Plant Pathology	Inglés	China	Banano (<i>Musa spp.</i>)	<i>Fusarium sp. oxysporum f. sp. cubense</i>	Uso de hongo antagonista y promotor del crecimiento vegetal	<i>Trichoderma</i>	<i>azadirachtae</i>
Pedrero-Méndez A. et al. (2)	2025	Scopus	Microbiological Research	Inglés	España	Trigo	<i>F. graminearum</i>	Competencia y micoparasitismo	<i>Trichoderma</i>	<i>harzianum</i>
Patel D. et al. (3)	2024	Scopus	Plant Nano Biology	Inglés	India	Garbanzo	<i>F. oxysporum</i>	Nanopartículas magnéticas vegetales	NA	NA
Jana S. et al. (4)	2025	PubMed	Fungal Biology	Inglés	India	Tomate	<i>F. oxysporum</i>	Nanopartículas de plata micogénicas	NA	NA
Dong W. et al. (5)	2025	Web of Science	Physiol. & Mol. Plant Pathology	Inglés	China	Maíz	<i>F. verticillioides</i>	Antibiosis y genómica funcional	<i>Bacillus</i>	<i>velezensis</i>
Gangaraj R. et al. (6)	2024	Scopus	Physiol. & Mol. Plant Pathology	Inglés	India	Guayaba	<i>F. oxysporum F.spp. psidii</i>	Análisis transcriptómico	<i>Aspergillus</i>	<i>niger</i>
Alsubaie M. et al. (7)	2024	Scopus	J. King Saud Univ. – Science	Inglés	Arabia Saudita	Café	<i>Fusarium spp. sp.</i>	Antagonismo y bioformulación	<i>Diaporthe</i>	<i>caatingensis</i>

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
Nguyen T. et al. (8)	2025	Scopus	Biological Control	Inglés	Vietnam	Trigo	<i>F. graminearum</i>	Consorcio microbiano nativo	Diversos géneros	Diversos géneros
Liu H. et al. (9)	2026	PubMed	Pesticide Biochemistry and Physiology	Inglés	China	Tomate	<i>F. oxysporum</i>	Metabolitos antifúngicos	<i>Bacillus</i>	<i>velezensis</i>
GovinSajudo A. et al. (10)	2025	Scopus	Biological Control	Español/Inglés	Cuba	Trigo	<i>Fusarium spp. spp.</i>	Rizobacterias promotoras	<i>Bacillus spp</i>	NR
Xu J. et al. (11)	2025	Web of Science	Int. J. Food Microbiology	Inglés	China	Maní	<i>F. proliferatum</i>	Competencia biológica	<i>Aspergillus</i>	<i>flavus</i>
Ding Y. et al. (12)	2025	Scopus	Food Bioscience	Inglés	China	Sandía	<i>F. oxysporum f. sp. niveum</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	Producción de compuestos orgánicos volátiles (VOC) antifúngicos	<i>Klebsiella</i>	<i>aerogenes</i>
Knežević M. et al. (13)	2025	Scopus	Biological Control	Inglés	Serbia	Cebada	<i>F. poae</i>	Control dual (Fusarium sp. + insectos)	<i>Bacillus</i>	<i>velezensis</i>
Luo M. et al. (14)	2025	Elsevier	Physiol. & Mol. Plant Pathology	Inglés	China	Banano	<i>F. oxysporum f.sp. cubense</i>	Micoparasitismo y competencia	<i>Trichoderma</i>	<i>azadirachtae</i>
Yao L. et al. (15)	2025	PubMed	Physiol. & Mol. Plant Pathology	Inglés	China	<i>Astragalus mongholicus</i>	<i>F. oxysporum</i>	Endófitos promotores	Diversos géneros	Diversos géneros

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
Sarma M. et al. (16)	2025	Scopus	Biological Control	Inglés	India	Banano	<i>F. oxysporum</i>	Biocontrol + promoción Crecimiento	<i>Trichoderma</i>	<i>asperellum</i>
Martínez-Medina A. et al. (17)	2011	Scopus	Applied Soil Ecology	Inglés	España	Melón	<i>F. oxysporum</i>	Sinergia micorrizas + Trichoderma	<i>Trichoderma</i>	<i>harzianum</i>
Taiebikhah N. et al. (18)	2026	Web of Science	Physiol. & Mol. Plant Pathology	Inglés	Irán	Tomate	<i>F. oxysporum f.sp. radicis-lycopersici</i>	Hongos de vermicompost	Diversos géneros	Diversos géneros
Kim T. & Knudsen G. (19)	2013	Scopus	Applied Soil Ecology	Inglés	EE. UU.	Arveja	<i>F. solani</i> , <i>F.sp. pisi</i>	Micoparasitismo directo	<i>Trichoderma</i>	<i>harzianum</i>
Chetan K. et al. (20)	2024	Scopus	Rhizosphere	Inglés	India	Caña de azúcar	<i>F. oxysporum</i>	Rizobacterias promotoras	<i>Pseudomonas</i>	NR
López-Núñez R. et al. (21)	2025	Scopus	Carbohydrate Polymer Technol & Appl.	Inglés	Colombia	Banano	<i>F. oxysporum f.sp. cubense</i>	Quitosano + <i>P. chlamydosporia</i>	<i>Pochonia</i>	<i>chlamydosporia</i>
Levasseur M. et al. (22)	2025	Science Direct	Phytochemistry	Inglés	Francia	<i>Sextonia rubra</i>	<i>Trametes versicolor</i>	Metabolitos secundarios del endófito	<i>Fusarium sp. falciforme</i>	NR
Toghueo R. et al. (23)	2016	Science Direct	Biological Control	Inglés	Camerún	Frijol común	<i>Fusarium sp. solani</i>	Uso de <i>Trichoderma</i> endófito	<i>Trichoderma spp.</i>	NR
Taheri E. et al. (24)	2022	Science Direct	Biological Control	Inglés	Irán	Trigo	<i>Fusarium sp. graminearum</i>	Antagonismo bacteriano	<i>Paenibacillus</i>	<i>polymyxa</i>

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
Sharma S. et al. (25)	2024	Elsevier	Plant Stress	Inglés	India	Arroz-Trigo	<i>Fusarium sp. fujikuroi</i>	Monitoreo metagenómico y Qpc	NR	NR
Bahroun A. et al. (26)	2018	Science Direct	Applied Soil Ecology	Inglés	Túnez	Leguminosas	<i>Fusarium sp. solani</i>	Endófitos bacterianos	Diversas bacterias endófitas	Diversas bacterias endófitas
Xu W. et al. (27)	2020	Science Direct	Biological Control	Inglés	China	Sandía	<i>Fusarium sp. oxysporum f.sp. niveum</i>	Bacterias antagonistas	<i>Bacillus spp.</i>	NR
Petrucci A. et al. (28)	2025	Science Direct	Fungal Biology	Inglés	Italia	Cereales	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Regulación de toxinas (kp4l genes)	<i>Fusarium sp.</i>	<i>graminearum</i>
Nguyen P. et al. (29)	2018	Science Direct	Biological Control	Inglés	Francia	Maíz	<i>Fusarium sp. verticillioides</i>	Actinomicetos de enmiendas orgánicas	<i>Actinomyces spp.</i>	NR
Al Farraj D. et al. (30)	2023	Science Direct	Physiological and Molecular Plant Pathology	Inglés	Arabia Saudita	Mostaza (Brassica nigra)	<i>Fusarium sp. oxysporum</i>	Bacillus endófito (BS10)	<i>Bacillus</i>	<i>xiamenensis</i>
Ma J. et al. (31)	2022	Science Direct	Fitoterapia	Inglés	China	Kiwi	<i>Pseudomonas syringae pv. actinidiae</i>	Alcaloides fúngicos antibacterianos	<i>Fusarium sp.</i>	<i>tricinctum</i>
Spagnolotti F. et al. (32)	2021	Elsevier	Rhizosphere	Inglés	Argentina	Trigo	<i>Fusarium sp. pseudograminearum</i>	Micorriza arbuscular	<i>Rhizophagus</i>	<i>sintraradices</i>
Liu Y. et al. (33)	2021	Science Direct	Applied Soil Ecology	Inglés	China	Angelica sinensis	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Agente biocontrol recubierto	<i>Bacillus spp</i>	NR

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
								con attapulgita		
Strub C. et al. (34)	2021	Science Direct	Fungal Biology	Inglés	Francia	Maíz	<i>Fusarium sp. verticillioides</i>	Interacción con Streptomycetes	<i>Streptomyces spp.</i>	NR
Liu X. et al. (35)	2021	Science Direct	Applied Soil Ecology	Inglés	China	Pepino (invernadero)	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Análisis microbioma rizosférico	Diversos géneros de bacterias y hongos	Diversos géneros de bacterias y hongos
Xu S. et al. (35)	2021	Science Direct	Food Control	Inglés	China	Trigo	<i>Fusarium sp. graminearum</i>	Antagonismo y degradación de micotoxinas	<i>Bacillus</i>	<i>amyloliquefaciens</i>
Nong Q. et al. (36)	2025	Science Direct	Biological Control	Inglés	China	Banano	<i>Fusarium sp. oxysporum</i>	Endófito oscuro (DSE)	<i>Acidomelanina</i>	<i>saccharicola</i>
Liu J. et al. (37)	2023	Elsevier	LWT	Inglés	China	Melón (postcosecha)	<i>Fusarium sp. incarnatum</i>	<i>Bacillus</i> endófito antagonista	<i>Bacillus</i>	<i>amyloliquefaciens</i>
Moussaid F. et al. (38)	2025	SpringerLink	Journal of Natural Pesticide Research	Inglés	Marruecos	Residuos orgánicos	<i>Fusarium sp. oxysporum</i>	<i>Bacillus</i> antagonistas	<i>Bacillus spp.</i>	NR
Daroodi Z. et al. (39)	2023	Science Direct	Physiological and Molecular	Inglés	Irán	Trigo	<i>Fusarium sp. graminearum</i>	Inducción de resistencia (NO, metionina)	<i>Acrophialophora</i>	<i>jodhpurensis</i>

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
			Plant Pathology							
Bennett J. et al. (40)	2023	Science Direct	Crop Protection	Inglés	EE. UU.	Maíz	<i>Fusarium sp. verticillioides</i>	Cepas atoxigénicas nativas	<i>Fusarium sp.</i>	<i>verticillioides</i>
Santhosh C. et al. (41)	2025	Science Direct	Physiological and Molecular Plant Pathology	Inglés	India	Berenjena	<i>Fusarium sp. spp.</i>	<i>Bacillus</i> promotor y biocontrolador	<i>Bacillus</i>	<i>velezcensis</i>
Rathod K. et al. (42)	2023	Elsevier	Plant Stress	Inglés	India	Garbanzo	<i>Fusarium sp. oxysporum f.sp. ciceris</i>	<i>Bacillus</i> marino biocontrolador	<i>Bacillus</i>	<i>marino</i>
Zhang M. et al. (43)	2024	Science Direct	Microbiological Research	Inglés	China	Tomate	<i>Fusarium sp. oxysporum</i>	<i>Bacillus siamensis</i> como agente biocontrol	<i>Bacillus</i>	<i>siamensis</i>
Chavéz. Et al. (44)	2022	Scopus	Rhizosphere	Inglés	México	Maíz Amarillo Zamorano	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Promoción de crecimiento y biocontrol por <i>Pseudomonas</i> nativo	<i>Pseudomonas spp.</i>	NR
Patel R. et al. (45)	2022	Scopus	Biological Control	Inglés	India	Varios	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Biocontrol por PGPR	Diversos géneros de bacterias	Diversos géneros de bacterias

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
Wang R. et al. (46)	2023	Scopus	Biological Control	Inglés	China	Pepino	<i>Fusarium sp. oxysporum</i>	Biocontrol por <i>Trichoderma asperellum</i> FJ035	<i>Trichoderma</i>	<i>asperellum</i>
Fanai A. et al. (47)	2025	Scopus	Microbial Pathogenesis	Inglés	India	Jengibre	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Revisión sobre patogénesis y manejo	<i>Fusarium sp.</i>	NR
Zhang L. et al. (48)	2024	Scopus	mBio	Inglés	China	Trigo	<i>Fusarium sp. graminearum</i>	Estudio de infección asintomática por p18 de FgGMTV1	NA	NA
Erazo J. et al. (49)	2021	Scopus	Biological Control	Inglés	Ecuador	Cacahuete	<i>Fusarium sp. solani RC386</i>	Biocontrol por <i>Trichoderma harzianum</i> ITEM 3636	<i>Trichoderma</i>	<i>harzianum</i>
Bosco S. et al. (50)	2024	Scopus	Biological Control	Inglés	Italia	Arroz	<i>Fusarium sp. fujikuroi</i>	Cribado de endófitos bacterianos y fúngicos para tratamiento de semillas	Diversas bacterias endófitas	Diversas bacterias endófitas
Mateo E. et al. (51)	2023	Scopus	Int. J. Food Microbiology	Inglés	España	Varios	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Biocontrol mediante bacterias lácticas y	Bacterias ácido lácticas	Bacterias ácido lácticas

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
								efecto sobre micotoxinas		
Luo M. et al. (52)	2021	Scopus	Microbiological Research	Inglés	China	Pepino	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Biocontrol por <i>Talaromyces</i> DYM25	<i>Talaromyces</i>	<i>Talaromyces</i>
Kunfa G. et al. (53)	2025	Scopus	Industrial Crops and Products	Inglés	China	Panax notoginseng	<i>Fusarium sp. solani</i>	Biocontrol por <i>Bacillus subtilis</i> Pn1	<i>Bacillus</i>	<i>B. subtilis</i>
Cai F. et al. (54)	2024	Scopus	Biological Control	Inglés	China	Pepino	<i>Fusarium sp. oxysporum f. sp. cucumerinum</i>	Biocontrol por <i>Paenibacillus polymyxa</i> hg18	<i>Paenibacillus</i>	<i>polymyxa</i>
Yang H. et al. (55)	2024	Scopus	Horticultural Plant Journal	Inglés	China	Fresa	<i>Fusarium sp. wilt</i>	Regulación bidireccional con 5-aminolevulinic acid	NA	NA
Wang G. et al. (56)	2025	Scopus	Microbial Pathogenesis	Inglés	China	Trigo	<i>Fusarium sp. graminearum</i>	Priorización de cepas productoras de lipopeptidos	Diversos géneros de bacterias	Diversos géneros de bacterias
Zanon M. et al. (58)	2024	Scopus	Int. J. Food Microbiology	Inglés	Argentina	Cebada	<i>Fusarium sp. graminearum</i> y <i>F. poae</i>	Biocontrol en vitro, invernadero y campo por <i>Bacillus velezensis</i>	<i>Bacillus</i>	<i>velezensis</i>

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
								RC218		
Hallasgo A. et al. (59)	2022	Scopus	Biological Control	Inglés	Alemania	Tomate	<i>Fusarium sp. wilt</i>	Coinoculación con <i>Serendipita herbamans</i> + micorrizas	<i>Serendipita</i>	<i>herbamns</i>
El-Beltagi H. et al. (60)	2025	Scopus	Kuwait Journal of Science	Inglés	Kuwait	Vicia faba	<i>Fusarium sp. solani</i> y <i>Rhizoctonia solani</i>	Biocontrol con glicoproteína y aceite esencial de jengibre	NA	NA
Pérez J. et al. (61)	2024	Scopus	Biotechnology Reports	Inglés	Argentina	Banano	<i>Fusarium sp. oxysporum f. sp. cubense</i>	Biocontrol con <i>Streptomyces</i> antártico	<i>Streptomyces</i>	NR
Risoli S. et al. (62)	2025	Scopus	Plant Stress	Inglés	Italia	Trigo	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Metabolómica y biocontrol en campo abierto	Diversos géneros de bacterias	Diversos géneros de bacterias
Kadaikunnan S. et al. (63)	2023	Scopus	Physiological and Molecular Plant Pathology	Inglés	India	Vigna radiata	<i>Fusarium sp. solani</i>	Biocontrol con <i>Streptomyces parvulus</i> VRR3	<i>Streptomyces</i>	<i>parvulus</i>
Pereira E. et al. (64)	2025	Scopus	Biological Control	Inglés	España	Tomate	<i>Fusarium sp. oxysporum f. sp. lycopersici</i>	Mejora de resistencia por <i>Diaporthe atlántica</i>	<i>Diaporthe</i>	<i>atlantica</i>

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
Lopez-Moya F. et al. (65)	2025	Scopus	Current Plant Biology	Inglés	España	Banano	<i>Fusarium sp. oxysporum f. sp. cubense TR4</i>	Inducción de SA y MeSA con quitosano	NA	NA
Abaya A. et al. (66)	2021	Scopus	Biological Control	Inglés	Irán	Trigo	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Biocontrol con <i>Simplicillium lamellicola</i>	<i>Simplicillium</i>	<i>lamellicola</i>
Wei J. et al. (67)	2023	Scopus	Biological Control	Inglés	China	Panax ginseng	<i>Fusarium sp. oxysporum</i>	Biocontrol por <i>Bacillus velezensis</i>	<i>Bacillus</i>	<i>velezensis</i>
Oulad Ziane S. et al. (68)	2023	Scopus	Biocatalysis and Agricultural Biotechnology	Inglés	Marruecos	Palma datilera	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Sinergia de hongos micorrízicos y PGPR	Diversos géneros de Hongos	Diversos géneros de Hongos
Tan L. et al. (69)	2022	Scopus	Applied Soil Ecology	Inglés	China	Varios	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Análisis de comunidades endófitas	Variado	Variado
Cabrera R. et al. (70)	2020	Scopus	Biological Control	Inglés	México	Maíz	<i>Fusarium sp. graminearum</i>	Biocontrol por <i>Amycolatopsis BX17</i>	<i>Amycolatopsis</i>	<i>Amycolatopsis spp.</i>
Faheem M. et al. (71)	2015	Scopus	Biological Control	Inglés	China	Sandía	<i>Fusarium sp. oxysporum f. sp. niveum</i>	Biocontrol por <i>Streptomyces goshikiensis</i> YCXU	<i>Streptomyces</i>	<i>goshikiensis</i>

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
Yi Y, et. Al. (72)	2024	Scopus	Int. J. Food Microbiology	Inglés	China	Trigo	<i>Fusarium sp. graminearum</i>	Biocontrol por <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> ZK-9 (lipopeptidos)	<i>Bacillus</i>	<i>amyloliquefaciens</i>
Omoruyi B. et al. (73)	2023	Scopus	Microbiology Spectrum	Inglés	Sudáfrica	Rooibos / Honeybush	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Biocontrol con extractos vegetales autóctonos	Diversos géneros de bacterias	Diversos géneros de bacterias
Ayele, T. M. et al. (74)	2021	Scopus	The Open Agriculture Journal	Inglés	Etiopía	Tomate	<i>Fusarium sp. oxysporum f. sp. lycopersici</i>	Antagonismo in vitro	<i>Trichoderma</i>	<i>viride</i>
Hugar, A. et al. (75)	2025	Science Direct	The Microbe	Inglés	India	Cajanus cajan	<i>Fusarium sp. oxysporum f. sp. udum</i>	Inducción de defensa + promoción de crecimiento	<i>Trichoderma</i>	<i>harzianum</i>
Kemp, N. D. et al. (76)	2020	Science Direct	Biological Control	Inglés	EE. UU.	Trigo	<i>Fusarium sp. graminearum</i>	Endofitismo sistémico, control biológico	<i>Sarocladium</i>	<i>zeae</i>
Masmoudi, F. et al. (77)	2023	Science Direct	International Journal of Food Microbiology	Inglés	Túnez	Trigo	<i>Fusarium sp. crown rot</i>	Nanopartículas de plata con lipopeptidos bacterianos	<i>Bacillus</i>	<i>velezensis</i>

Autores	Año	Base de datos	Revista	Idioma	País	Tipo de cultivo	Hongo patógeno	Métodos de Control Biológico	Bacterias y Hongos	
									Genero	Especie
Ren, C. et al (78)	2025	Science Direct	Microbiological Research	Inglés	China	Maíz	<i>Fusarium sp. verticillioides</i>	Competencia por hierro y mecanismos antagónicos	<i>Chaetomium</i>	<i>globosum</i>
Suron O. et al. (79)	2018	Science Direct	Biological Control	Inglés	Japón	Espárrago	<i>Fusarium sp. spp.</i>	Antagonismo por hongos endófitos oscuros	<i>Phialocephala</i>	<i>fortinii</i>
Zhang, H. et al. (80)	2025	Science Direct	Biological Control	Inglés	China	Calabaza de cera	<i>Fusarium sp. proliferatum</i>	Múltiples mecanismos de inducción de resistencia	<i>Bacillus spp.</i>	NR

NR=No Reporta.

NA=No Aplica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Especies de *Fusarium spp.* más frecuentemente estudiadas en los artículos incluidos.

Especie de <i>Fusarium</i>	No. Estudios	%
<i>oxysporum</i>	28	30.1
<i>Fusarium spp. (no especificado)</i>	15	16.1
<i>graminearum</i>	12	12.9
<i>solani</i>	7	7.5
<i>verticillioides</i>	6	6.5
<i>oxysporum f.sp. cubense</i>	5	5.4
<i>oxysporum f.sp. lycopersici</i>	3	3.2
<i>oxysporum f.sp. niveum</i>	3	3.2
<i>Oxysporum cucumerinum</i>	2	2.2
<i>fujikuroi</i>	2	2.2

La evaluación de la literatura científica evidenció que ciertas especies del género *Fusarium* concentran la mayor atención investigativa. *Fusarium oxysporum* fue la especie predominante en los estudios incluidos, lo cual puede atribuirse a su amplia distribución geográfica y a su impacto en diversos cultivos agrícolas. Asimismo, *F. solani* y *F. graminearum* mostraron una alta recurrencia, especialmente en investigaciones relacionadas con patogenicidad y estrategias de control biológico.

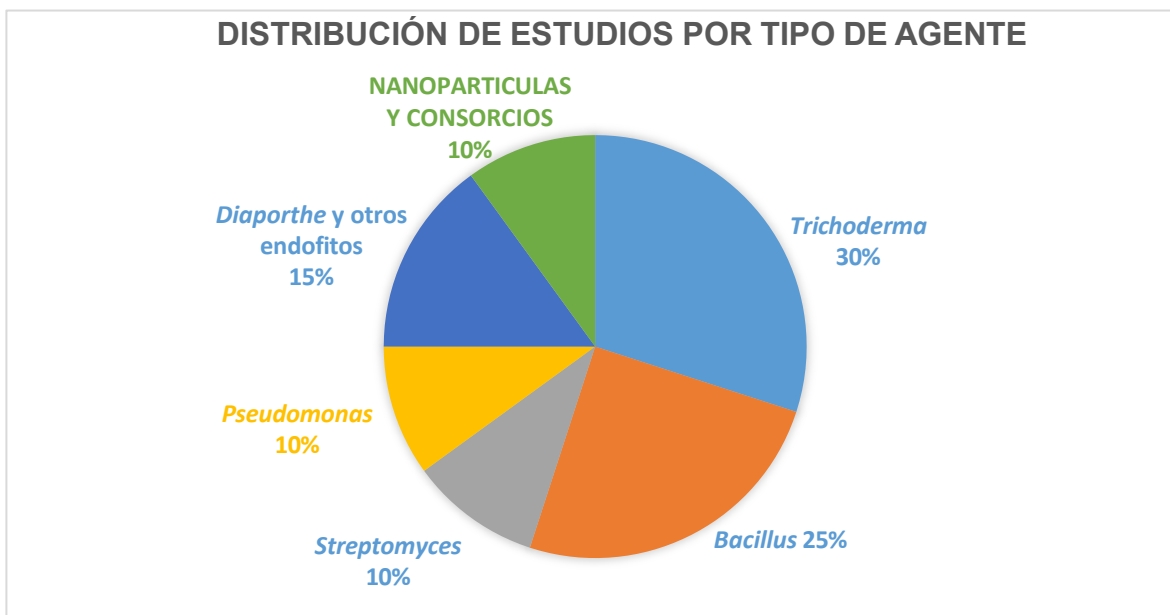


Figura 3. Diagrama de torta para la distribución de estudios por tipo de agente.

Fuente: Elaboración propia

Agentes de control biológico reportados frente a diversas especies de *Fusarium spp.*, Los datos muestran claramente que los hongos del género *Trichoderma spp.*, constituyen el grupo más

utilizado, seguidos de bacterias del género *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Actinobacterias* como *Streptomyces spp.*, y otros agentes mixtos, incluyendo consorcios.

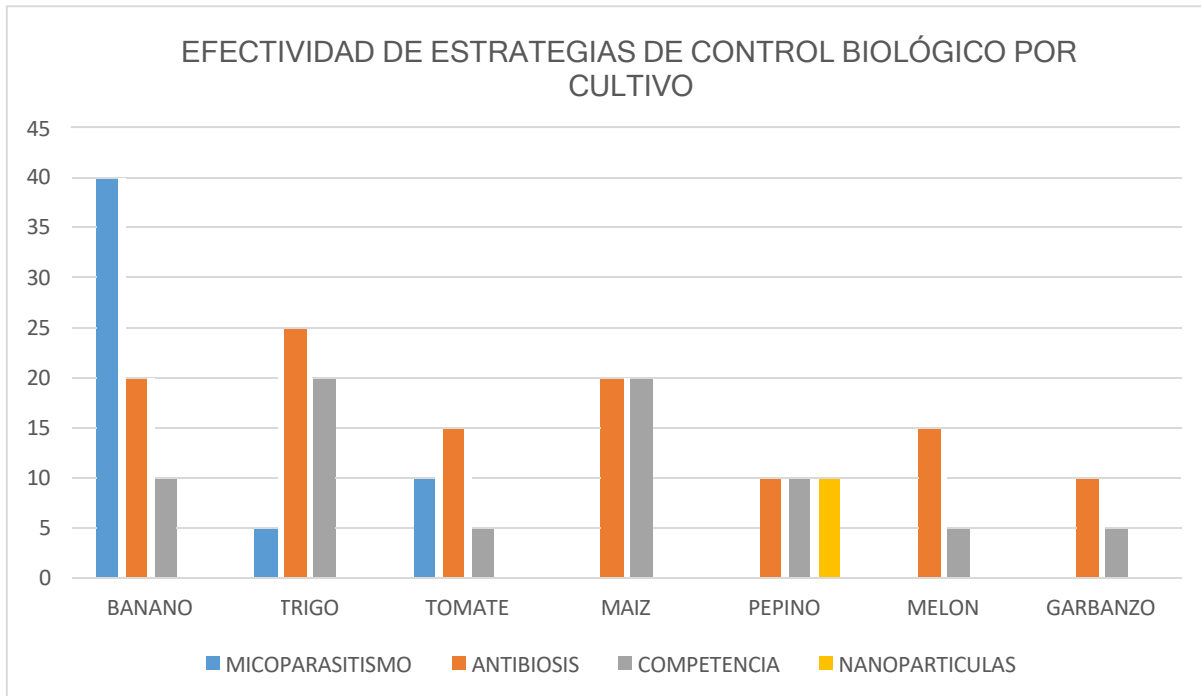


Figura 4. Diagrama de barras de la efectividad de estrategias de control biológico por cultivo.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se resume la efectividad de diferentes mecanismos de control biológico frente a *Fusarium spp.* en siete cultivos agrícolas más reportados: banano, trigo, tomate, maíz, pepino, melón y garbanzo. Los colores representan los mecanismos de acción: micoparasitismo, antibiosis, competencia y nanopartículas metálicas. Esta visualización permite identificar patrones de eficacia y destacar las estrategias más utilizadas según cada cultivo.

Tabla 4. Microorganismos antagonistas y mecanismos de acción frente a *Fusarium spp.*

Microorganismo	Tipo	Mecanismo principal	Cultivo(s) donde se aplicó
<i>Trichoderma harzianum</i>	Hongo	Micoparasitismo, promoción de crecimiento	Banano, Tomate, Trigo
<i>Trichoderma asperellum</i>	Hongo	Micoparasitismo, antibiosis	Banano, Pepino
<i>Bacillus velezensis</i>	Bacteria	Antibiosis, competencia biológica	Trigo, Maíz, Tomate
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Bacteria	Producción de lipopeptidos, antibiosis	Trigo, Melón
<i>Pseudomonas spp.</i>	Bacteria	Competencia, promoción crecimiento	Maíz, Banano
<i>Streptomyces spp.</i>	Actinobacterias	Producción de antibióticos, bioformulación	Sandía, Pepino, garbanzo
<i>Diaporthe atlantica</i>	Hongo endófito	Inducción de resistencia	Tomate
<i>Acidomelania saccharicola</i>	Hongo endófito oscuro	Antagonismo	Banano
<i>Talaromyces spp.</i>	Hongo	Biocontrol directo	Pepino

4. DISCUSIÓN

A partir de los resultados mostrados en las tablas se puede evidenciar que una gran mayoría de investigaciones se inclinan en el control de *Fusarium oxysporum*, representando el 30,1% del total de investigaciones analizadas. Esta tendencia puede explicarse por la amplia distribución geográfica de la especie, su elevada variabilidad genética y su capacidad de infectar un amplio rango de hospedadores. La diversidad de formas especiales (*f. spp.*) asociadas a cultivos de importancia económica, como banano, tomate y cucurbitáceas, refuerza su relevancia agronómica y justifica el alto interés científico en su estudio.

Asimismo, la frecuencia considerable de investigaciones que reportan *Fusarium spp.* sin especificación taxonómica (16,1%) podría reflejar limitaciones en la identificación molecular o enfoques metodológicos basados únicamente en características morfológicas. Esta situación pone de manifiesto la importancia de fortalecer las herramientas de caracterización genética para mejorar la precisión en la identificación de especies, dado que la correcta determinación taxonómica es fundamental para diseñar estrategias de manejo efectivas.

Por otra parte, también se destaca la presencia de *F. graminearum* (12,9%) el cual está relacionado a los cultivos de cereales y además a la producción de micotoxinas, representando un riesgo significativo para la seguridad alimentaria y la salud pública. De igual manera, especies como *F. solani* (7,5%) y *F. verticillioides* (6,5%) muestran un porcentaje relevante, lo que evidencia la diversidad de especies del género involucradas en afectaciones a las plantas.

Microorganismos controladores de *Fusarium spp.*

Los microorganismos antagonistas más frecuentemente reportados incluyen especies de los géneros *Trichoderma spp.*, *Bacillus spp.*, *Streptomyces spp.*, *Pseudomonas spp.*, y *Diaporthe spp.* los cuales mostraron capacidades variadas, complementarias y frecuentemente sinérgicas de inhibición de especies de *Fusarium spp.* a través de mecanismos biológicos como micoparasitismo directo mediado por enzimas líticas que degradan componentes de la pared celular fúngica, antibiosis mediante la producción de metabolitos secundarios con actividad antifúngica o de amplio espectro, competencia biológica por recursos limitantes como nutrientes esenciales, espacio físico, oxígeno y micrositos de colonización en la rizosfera y filosfera. (Liu H. et al., 2026; Martínez-Medina et al., 2011; Xu W. et al., 2020; Patel et al., 2022).

Trichoderma es un hongo filamentoso que pertenece al grupo de los ascomicetos, en los que la mayoría de las especies no tienen un periodo sexual, simplemente producen esporas asexuales. El género *Trichoderma*, ampliamente distribuido en suelos agrícolas y en la rizosfera, se reconoce como uno de los principales agentes de control biológico frente a especies de *Fusarium spp.* especies como *T. harzianum.*, *T. asperellum.*, *T. atroviride.*, y *T. virens.* han demostrado alta eficacia en la supresión del patógeno. Su efectividad radica en un mecanismo de acción combinado. Por un lado, ejercen un control directo del fitopatógeno mediante micoparasitismo, producción de enzimas hidrolíticas, síntesis de metabolitos con actividad antifúngica y competencia por espacio y nutrientes. Por otro lado, interactúan con la planta estimulando sus mecanismos de defensa, lo que favorece la activación de respuestas fisiológicas asociadas a resistencia inducida sistémica. Este efecto permite que la planta responda de manera más eficiente ante infecciones posteriores. (Sarma et al., 2025; Wang R. et al., 2023; Luo et al., 2025). El micoparasitismo ejercido por *Trichoderma spp.*, constituye un proceso secuencial que inicia con el reconocimiento del fitopatógeno mediante señales químicas difusibles. Posteriormente, las hifas del antagonista crecen de forma dirigida hacia el hongo hospedador, se adhieren y se enrollan alrededor de sus estructuras, formando puntos de penetración especializados. La secreción localizada de enzimas hidrolíticas, como quitinasas y glucanasas, degrada la pared celular del patógeno, facilitando su penetración, colonización interna y posterior colapso metabólico. Este mecanismo explica su alta eficacia como agente de control biológico frente a especies fitopatógenas. (Harman et al., 2004; Druzhinina et al., 2011).

Las bacterias del género *Bacillus spp.*, se caracterizan por ser Grampositivas y su formación de endosporas altamente resistentes a condiciones adversas de temperatura. La presencia de endosporas le confiere al género de *Bacillus* su capacidad de diseminación y prevalencia en los ecosistemas, éstas se forman durante su segunda fase del ciclo de vida, el cual se encuentra conformado por una fase de crecimiento vegetativo y una fase de esporulación.

Constituyeron la segunda categoría más reportada de agentes de control biológico en la literatura analizada. Especies como *Bacillus velezensis*, *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. pumilus* y *B. megaterium* destacan por su capacidad de producir una amplia gama de metabolitos antimicrobianos que inhiben el crecimiento micelial, la germinación de esporas y la producción de micotoxinas en *Fusarium spp.* (Dong et al., 2025; Liu H. et al., 2026; Xu S. et al., 2021; Zanon et al., 2024).

Entre los compuestos más relevantes se encuentran los lipopéptidos cíclicos, particularmente las familias de surfactinas, iturinas y fengicinas, cuya acción se asocia con la alteración de la membrana celular fúngica, formación de poros transmembranales y actividad antifúngica directa, además de su participación en la inducción de resistencia sistémica en plantas (Ongena & Jacques, 2008; Caulier et al., 2019). Asimismo, diversas especies sintetizan antibióticos peptídicos, compuestos orgánicos volátiles y sideróforos como bacilibactina, los cuales limitan la

disponibilidad de hierro en la rizosfera y afectan procesos metabólicos esenciales del fitopatógeno. Adicionalmente, la formación de biofilms sobre superficies radiculares contribuye a la protección de la planta, al favorecer la competencia por nutrientes y sitios de colonización, y generar una barrera física que dificulta el establecimiento de *Fusarium* (Caulier et al., 2019)

Las Actinobacterias del género *Streptomyces*, son bacterias Grampositivas filamentosas con ciclo de vida complejo que incluye micelio vegetativo ramificado y micelio aéreo productor de cadenas de esporas, *Streptomyces* demostró también una actividad antifúngica consistente frente a diversas especies de *Fusarium spp.* Este grupo bacteriano, ampliamente distribuido en suelos agrícolas, es reconocido por su capacidad de producir una gran diversidad de metabolitos secundarios bioactivos. Entre ellos se incluyen antibióticos de naturaleza policetídica, macrólida, amino glucosídica y peptídica que interfieren con procesos esenciales del fitopatógeno, como la síntesis de pared celular, la función de membrana, la síntesis proteica y la replicación del ADN (Faheem et al., 2015; Kadaikunnan et al., 2023; Pérez et al., 2024).

Se destacan compuestos como actinomicina, estreptomycin, nistatina, anfotericina y polioxinas, con mecanismos de acción dirigidos a la inhibición de transcripción, síntesis de proteínas o formación de quitina. Además, *Streptomyces* produce enzimas líticas, sideróforos como desferioxaminas y compuestos volátiles que contribuyen al control directo del fitopatógeno y a la competencia por nutrientes en la rizosfera (Sousa & Olivares, 2016).

Su ubicuidad en suelos agrícolas, capacidad de colonización radicular y producción simultánea de múltiples compuestos bioactivos refuerzan su potencial como agente de control biológico en estrategias de manejo sostenible (Viaene et al., 2016).

Las bacterias del género *Pseudomonas*, se destacan por ser aeróbicas, Gramnegativas, quimio heterotróficas, móviles con forma de bacilo, particularmente *P. fluorescens*, *P. protegens*, *P. chlororaphis* y *P. putida*, mostraron una eficacia destacada en la supresión de enfermedades causadas por *Fusarium spp.* Su capacidad de colonización rizosférica, rápido crecimiento y alta competitividad por nutrientes favorecen su establecimiento en el suelo. Estas especies producen una amplia variedad de metabolitos antimicrobianos, entre ellos fenazinas, ácido fenilacético, 2,4-diacetilphloroglucinol, ácido cianhídrico y lipopéptidos cíclicos, los cuales interfieren con procesos respiratorios, integridad de membrana y otros mecanismos celulares esenciales del fitopatógeno (Haas & Défago, 2005; Mendes et al., 2011).

Asimismo, la producción de sideróforos como pioverdinas contribuye a la competencia por hierro en la rizosfera, limitando el crecimiento y la virulencia de hongos fitopatógenos (Raaijmakers et al., 2009). De manera complementaria, *Pseudomonas* puede inducir resistencia sistémica en plantas mediante la activación de rutas defensivas dependientes de ácido jasmónico y etileno, fortaleciendo la respuesta frente a infecciones posteriores (Pieterse et al., 2014). Su versatilidad metabólica y adaptación a distintos sistemas agrícolas refuerzan su papel dentro de estrategias de control biológico integrado (Lugtenberg & Kamilova, 2009).

Los hongos endofíticos del género *Diaporthe*, se caracterizan por producir estructuras reproductivas llamadas picnidios, donde se forman las esporas encargadas de la dispersión del patógeno. Muchas especies de *Diaporthe* presentan una fase asexual conocida como *Phomopsis* la cual produce conidios responsables de la dispersión e infección en plantas. *Diaporthe pertenecen* a la familia *Diaporthaceae* dentro del orden *Diaporthales*, incluyen especies que colonizan internamente tejidos vegetales de raíces, tallos, hojas, flores y frutos sin causar síntomas evidentes de enfermedad estableciendo asociaciones mutualísticas o comensalísticas con sus plantas hospedadoras. Estos hongos se han considerado recientemente, agentes prometedores de control biológico contra *Fusarium spp.* debido a su capacidad de conferir protección contra patógenos mediante múltiples mecanismos que incluyen competencia por espacio y nutrientes en nichos internos de la planta, producción de metabolitos bioactivos con

propiedades antifúngicas, antibacterianas y promotoras del crecimiento vegetal, inducción de respuestas defensivas locales y sistémicas en el hospedero, y posible exclusión competitiva de patógenos que intentan colonizar los mismos tejidos, especies como *Diaporthe atlantica* demostraron mejorar la resistencia de tomate contra *F. oxysporum f.sp. lycopersici* mediante mecanismos que incluyen la activación de genes defensivos, la síntesis incrementada de compuestos fenólicos y lignina en tejidos vasculares que limitan la colonización sistémica del patógeno, y la modulación de comunidades microbianas endofíticas creando ambientes internos menos favorables para el establecimiento del patógeno (Pereira et al., 2025; Hardoim et al., 2015).

Nuevas especies reportadas para el control biológico de *Fusarium spp.*

Otras nuevas especies han sido reportadas para el control biológico de *fusarium spp.* Entre ellos destaca *Phialocephala fortinii*, un hongo endófito oscuro (DSE) ampliamente distribuido en raíces de plantas en ecosistemas templados y caracterizado por su micelio pigmentado y septado, reportado en espárrago con actividad antagonista frente a *Fusarium spp.* cuyo mecanismo se asocia al endofitismo competitivo y posible modulación del microambiente radicular (Surono & Narisawa., 2018). La inclusión de este tipo de hongos sugiere un cambio en el enfoque clásico de control directo hacia interacciones más complejas planta-microorganismo-patógeno.

Asimismo, *Chaetomium globosum* un hongo filamentoso perteneciente al filo Ascomycota y comúnmente encontrado en suelos y residuos vegetales en descomposición, fue reportado como endófito sistémico con capacidad de controlar *Fusarium graminearum* en trigo, lo que indica que su acción no se limita a la rizosfera, sino que puede establecerse internamente en los tejidos vegetales, generando una barrera biológica persistente (Kemp et al., 2020). Este comportamiento representa una estrategia distinta al micoparasitismo convencional, priorizando la colonización preventiva del hospedero.

Por su parte, *Sarocladium zae*, identificado en maíz, es un hongo endófito capaz de colonizar los tejidos vegetales sin causar síntomas visibles, reporto actividad antagonista frente a *Fusarium graminearum* (Cabrera et al., 2020), Su efecto biocontrolador se atribuye a la producción de metabolitos secundarios con actividad antifúngica y a su capacidad de ocupar nichos internos en la planta, limitando el establecimiento del patógeno. A diferencia de los antagonistas exclusivamente rizosférico, este tipo de interacción endofítica permite una protección más directa dentro del hospedero, lo que podría contribuir a una reducción más efectiva de la colonización vascular por *Fusarium*.

Finalmente, *Amycolatopsis spp.* (cepa BX17) representa un hallazgo relevante dentro de las Actinobacterias no tradicionales, mostrando actividad biocontroladora mediante producción de metabolitos antimicrobianos (Ren et al., 2025). A diferencia de *Streptomyces*, ampliamente estudiado, *Amycolatopsis* ha sido menos explorado en sistemas agrícolas, por lo que su inclusión en los estudios analizados evidencia una ampliación del espectro de Actinobacterias con potencial antifúngico.

Nanopartículas

Es importante resaltar como alternativa innovadora para el control de *Fusarium spp.*, el uso de nanopartículas las cuales son estructuras de escala nanométrica que suelen presentar morfología esférica o cuasi esférica, con dimensiones entre 1 y 100 nm. Su reducido tamaño y elevada relación superficie volumen facilitan su interacción con membranas celulares y otros componentes microbianos. Estas características les confieren actividad antimicrobiana, ya que pueden alterar la integridad de la membrana celular, generar estrés oxidativo y afectar procesos

metabólicos esenciales del microorganismo, lo que conduce a la inhibición del crecimiento o la muerte celular (Akpınar et al., 2021). A diferencia de los biocontroladores tradicionales, estas partículas se caracterizan por mecanismos de acción fisicoquímicos directos sobre las células fúngicas.

En el caso de *Fusarium spp.*, diferentes estudios han demostrado su potencial como estrategia de control. Patel et al, 2022, demostraron que las nanopartículas magnéticas sintetizadas mediante extractos vegetales, donde compuestos bioactivos de las plantas actúan como agentes reductores y estabilizantes durante su formación pueden generar alteraciones estructurales en el micelio de *F. oxysporum*, afectando la integridad de membrana y promoviendo estrés oxidativo; De manera similar, Jana S. et al., 2025 reportaron que las nanopartículas de plata sintetizadas por vía micogénicas inhiben el crecimiento del patógeno en tomate, atribuible a la liberación de iones Ag^+ y su interacción con proteínas, y material genético fúngico.

Por su parte, Masmoudi et al., 2023 desarrollaron nanopartículas de plata combinadas con lipopeptidos producidos por *Bacillus velezensis*, evidenciando un efecto antifúngico reforzado frente a *Fusarium spp.*, asociado a la pudrición de la corona en trigo. La literatura también señala que las propiedades de las nanopartículas como tamaño, forma y superficie influyen directamente en su interacción con microorganismos, lo que permite optimizar su desempeño antifúngico (Palencia et al., 2023).

5. CONCLUSIONES

A partir de la revisión sistemática se evidencia que *Trichoderma spp.* continúa siendo el agente de control biológico más reportado frente a *Fusarium spp.*, destacándose *Trichoderma harzianum* por su acción combinada de micoparasitismo, producción de enzimas hidrolíticas quitinasas y glucanasas e inducción de resistencia sistémica en la planta. Estas acciones explican su mayor consistencia en la reducción de marchitamientos vasculares causados por *Fusarium oxysporum* y otras especies fitopatógenas.

Paralelamente, la literatura reciente demuestra un interés creciente en microorganismos no tradicionales como *Phialocephala fortinii*, cuyo comportamiento endofítico y capacidad de colonización radicular sugieren un enfoque preventivo basado en la ocupación ecológica del nicho antes del establecimiento del patógeno. Este tipo de estrategias representa una alternativa prometedora, aunque aún requiere mayor validación en condiciones agronómicas.

Desde una perspectiva de implementación, la evidencia científica sugiere que el uso de nanopartículas de plata y formulaciones magnéticas de origen vegetal, como herramientas complementarias para el control de *Fusarium spp.*, Estos trabajos reportan efectos antifúngicos asociados a la alteración de la integridad de la membrana celular, generación de estrés oxidativo y disrupción metabólica del patógeno, lo que evidencia una tendencia emergente hacia estrategias híbridas que integran microbiología y nanotecnología agrícola.

6. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo.

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaya, A., Serajazari, M., & Hsiang, T. (2021). Control of *Fusarium sp.* head blight using the endophytic fungus, *Simplicillium lamellicola*, and its effect on the growth of *Triticum aestivum*. *Biological Control*, 160, 104684. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2021.104684>
- Al Farraj, D. A., & Elshikh, M. S. (2023). Biocontrol of *Fusarium* wilt disease by endophytic *Bacillus xiamenensis* BS10 isolated from the root nodules of *Brassica nigra* (mustard plant) and analysis of defence molecular biomarkers in the greenhouse and field trial. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 128, 102169. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102169>
- Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology*. Elsevier.
- Akpinar, I., Unal, M. y Sar, T. Posibles efectos antifúngicos de nanopartículas de plata (AgNP) de diferentes tamaños contra cepas fitopatógenas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (FORL). *SN Appl. Sci.* 3 , 506 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04524-5>
- Alsubaie, M., Al-Askar, A. A., Olyan Al-Otibi, F., Maniah, K., Alkathiri, A., & Taha Yassin, M. (2024). Exploring the efficacy of endophytic *Diaporthe caatingaensis* as a biocontrol agent targeting *Fusarium sp.* strains afflicting coffee plants in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University - Science*, 36(9), 103396. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2024.103396>
- Alsubaie, M., Al-Askar, A. A., Olyan Al-Otibi, F., Maniah, K., Alkathiri, A., & Taha Yassin, M. (2024). Exploring the efficacy of endophytic *Diaporthe caatingaensis* as a biocontrol agent targeting *Fusarium sp.* strains afflicting coffee plants in Saudi Arabia. *Journal of King Saud University - Science*, 36(9), 103396. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2024.103396>
- Bahroun, A., Jousset, A., Mhamdi, R., Mrabet, M., & Mhadhbi, H. (2018). Anti-fungal activity of bacterial endophytes associated with legumes against *Fusarium sp. solani*: Assessment of fungi soil suppressiveness and plant protection induction. *Applied Soil Ecology*, 124, 131-140. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2017.10.025>
- Bennett, J. S., Isakeit, T., Borrego, E. J., Odvody, G., Murray, S., & Kolomiets, M. v. (2023). Identification of naturally occurring atoxigenic strains of *Fusarium sp. verticillioides* and their potential as biocontrol agents of mycotoxins and ear rot pathogens of maize. *Crop Protection*, 167, 106197. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2023.106197>
- Bennett, J. S., Isakeit, T., Borrego, E. J., Odvody, G., Murray, S., & Kolomiets, M. v. (2023). Identification of naturally occurring atoxigenic strains of *Fusarium sp. verticillioides* and their potential as biocontrol agents of mycotoxins and ear rot pathogens of maize. *Crop Protection*, 167, 106197. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2023.106197>
- Bosco, S., Prencipe, S., Mezzalama, M., & Spadaro, D. (2024). Screening and characterization of bacterial and fungal endophytes as potential biocontrol agents for rice seed dressing against *Fusarium sp. fujikuroi*. *Biological Control*, 196, 105580. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2024.105580>
- Cabrera, R., García-López, H., Aguirre-von-Wobeser, E., Orozco-Avitia, J. A., & Gutiérrez-Saldaña, A. H. (2020). *Amycolatopsis* BX17: An actinobacterial strain isolated from soil of a traditional milpa agroecosystem with potential biocontrol against *Fusarium sp. graminearum*. *Biological Control*, 147, 104285. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2020.104285>
- Cai, F., Yang, C., Ma, T., osei, R., Jin, M., Zhang, C., & Wang, Y. (2024). An endophytic *Paenibacillus polymyxa* hg18 and its biocontrol potential against *Fusarium sp. oxysporum* f. sp. *cucumerinum*. *Biological Control*, 188, 105380. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2023.105380>
- Caulier, S., Nannan, C., Gillis, A., Licciardi, F., Bragard, C., & Mahillon, J. (2019). Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the *Bacillus subtilis* group. *Frontiers in microbiology*, 10, 302.

- Chavéz-Díaz, I. F., Cruz-Cárdenas, C. I., Sandoval-Cancino, G., Calvillo-Aguilar, F. F., Ruíz-Ramírez, S., Blanco-Camarillo, M., Rojas-Anaya, E., Ramírez-Vega, H., Arteaga-Garibay, R. I., & Zelaya-Molina, L. X. (2022). Seedling growth promotion and potential biocontrol against phytopathogenic *Fusarium sp.* by native rhizospheric *Pseudomonas spp.* strains from Amarillo Zamorano maize landrace. *Rhizosphere*, 24, 100601. <https://doi.org/10.1016/J.RHISPH.2022.100601>
- Chetan, K. K., Varma, P. K., Chandrasekhar, V., Kumar, P. A., & Vasanthi, V. (2024). Plant, bacteria and fungi crosstalk: Direct and indirect biocontrol mechanisms of sugarcane rhizoplane *Pseudomonas* species against *Fusarium sp.* wilt. *Rhizosphere*, 31, 100952. <https://doi.org/10.1016/J.RHISPH.2024.100952>
- Corné M.J. Pieterse, Christos Zamioudis, Roeland L. Berendsen, David M. Weller, Saskia C.M. Van Wees, Peter A.H.M. Bakker. 2014. Induced Systemic Resistance by Beneficial Microbes. *Annual Review Phytopathology*. 52:347-375. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340>
- Crous, P. W., Osieck, E. R., Jurjević, Ž., Boers, J., Van Iperen, A. L., Starink-Willemse, M., ... & Maggs-Kölling, G. (2021). Fungal Planet description sheets: 1284-1382. *Persoonia: Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, 47, 178. doi: 10.3767/persoonia.2021.46.11
- Daroodi, Z., & Taheri, P. (2023). Function of the endophytic fungus *Acrophialophora jodhpurensis*, methionine, and nitric oxide in wheat resistance induction against *Fusarium sp. graminearum* via interplay of reactive oxygen species and iron. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 128, 102132. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2023.102132>
- Ding, Y., Pan, H., Wang, Y., Zheng, L., & Zhang, H. (2025). Biocontrol mechanism of strain DB02 against watermelon wilt and damping-off diseases caused by *Fusarium sp. oxysporum f. sp. niveum* and *Rhizoctonia solani*. *Food Bioscience*, 71, 107282. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2025.107282>
- Dong, W., Shi, Y., Li, X., Qu, S., Wang, F., Sheng, C., Ren, Y., Zhou, L., & Hu, W. (2025). Genomic and antifungal analysis of *Bacillus velezensis* CX-H3: a promising biocontrol agent for maize *Fusarium sp.* root rot. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 138, 102708. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2025.102708>
- Druzhinina, I. S., Seidl-Seiboth, V., Herrera-Estrella, A., Horwitz, B. A., Kenerley, C. M., Monte, E., ... & Kubicek, C. P. (2011). *Trichoderma*: the genomics of opportunistic success. *Nature reviews microbiology*, 9(10), 749-759.
- Edel-Hermann, V., & Lecomte, C. (2019). Current status of *Fusarium oxysporum formae speciales* and races. *Phytopathology*, 109(4), 512-530. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-18-0320-RVW>
- El-Beltagi, H. S., Osman, A., Sitohy, M., Almutairi, H. H., Eldesouky, E., Abbas, E., Ismail, A. M., Elshafie, H. S., & Camele, I. (2025). Biocontrol effect of ginger glycoprotein and essential oil against *Vicia faba* damping off caused by *Fusarium sp. solani* and *Rhizoctonia solani*. *Kuwait Journal of Science*, 52(3), 100437. <https://doi.org/10.1016/J.KJS.2025.100437>
- Erazo, J. G., Palacios, S. A., Pastor, N., Giordano, F. D., Rovera, M., Reynoso, M. M., Venisse, J. S., & Torres, A. M. (2021). Biocontrol mechanisms of *Trichoderma harzianum* ITEM 3636 against peanut brown root rot caused by *Fusarium sp. solani* RC 386. *Biological Control*, 164, 104774. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2021.104774>
- Faheem, M., Raza, W., Zhong, W., Nan, Z., Shen, Q., & Xu, Y. (2015). Evaluation of the biocontrol potential of *Streptomyces goshikiensis* YCXU against *Fusarium sp. oxysporum f. sp. niveum*. *Biological Control*, 81, 101-110. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2014.11.012>
- Fanai, A., Bohia, B., Lalremruati, F., Lalhriatpuii, N., Lalrokimi, Lalmuanpuii, R., Singh, P. K., & Zothanpuia. (2025). *Fusarium sp. spp.* induce diseases in ginger: nature of pathogen, pathogenesis and management. *Microbial Pathogenesis*, 205, 107597. <https://doi.org/10.1016/J.MICPATH.2025.107597>

- Gangaraj, R., Nishmitha, K., Gupta, N. C., Akhtar, J., Shanmugaraj, C., & Kamil, D. (2024). Comparative transcriptome analysis of *Aspergillus niger* revealed its biocontrol mechanisms in response to the guava wilt pathogen *Fusarium sp. oxysporum f. sp. psidii*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 134, 102419. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2024.102419>
- García-Bastidas, F., Ordóñez, N., Konkol, J., Al-Qasim, M., Naser, Z., Abdelwali, M., & Kema, G. H. J. (2014). First report of *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* tropical race 4 associated with Panama disease of banana outside Southeast Asia. *Plant Disease*, 98(5), 694-694. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-13-0954-PDN>
- Gordon, T. R., & Martyn, R. D. (1997). The evolutionary biology of *Fusarium oxysporum*. *Annual review of phytopathology*, 35(1), 111-128. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.35.1.111>
- Govin-Sanjudo, A., Rojas Badia, M. M., Jacquard, C., & Esmaeel, Q. (2025). Exploring *Fusarium sp.* Biocontrol, drought Tolerance, and plant growth promotion by *Bacillus* strains from Cuban wheat varieties. *Biological Control*, 205, 105776. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2025.105776>
- Haas, D., Défago, G. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nat Rev Microbiol* 3, 307-319 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrmicro1129>
- Hallasgo, A. M., Hauser, C., Steinkellner, S., & Hage-Ahmed, K. (2022). Single and coinoculation of *Serendipita herbamans* with arbuscular mycorrhizal fungi reduces *Fusarium sp.* wilt in tomato and slows disease progression in the long-term. *Biological Control*, 168, 104876. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2022.104876>
- Harman, G., Howell, C., Viterbo, A. et al. *Trichoderma* species – opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nat Rev Microbiol* 2, 43-56 (2004). <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- Hugar, A., & Nayaka, S. (2025). *Trichoderma harzianum* isolate AKH-5 enhances defense response in *Cajanus cajan* (L.) millsp. against *Fusarium sp. oxysporum f. sp. udum* and promotes plant growth. *The Microbe*, 8, 100454. <https://doi.org/10.1016/J.MICROB.2025.100454>
- Jana, S., Das, D., Bhattacharyya, S., & Raha, S. (2025). Mycogenic synthesis of silver nanoparticles using endophytic fungi and their characterization, biological activities, including in-silico studies with special reference to *Fusarium sp.* wilt of tomato. *Fungal Biology*, 129(5), 101610. <https://doi.org/10.1016/J.FUNBIO.2025.101610>
- Jiménez-Díaz, R. M., Castillo, P., del Mar Jiménez-Gasco, M., Landa, B. B., & Navas-Cortés, J. A. (2015). *Fusarium* wilt of chickpeas: Biology, ecology and
- Kadaikunnan, S., Alharbi, N. S., Khaled, J. M., & Alobaidi, A. S. (2023). Biocontrol property of *Streptomyces parvulus* VRR3 in green gram plant (*Vigna radiata* L.) against *Fusarium sp. solani* in greenhouse. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 128, 102128. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2023.102128>
- Kemp, N. D., Vaughan, M. M., McCormick, S. P., Brown, J. A., & Bakker, M. G. (2020). *Sarocladium zeae* is a systemic endophyte of wheat and an effective biocontrol agent against *Fusarium sp.* head blight. *Biological Control*, 149, 104329. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2020.104329>
- Kim, T. G., & Knudsen, G. R. (2013). Relationship between the biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* and the phytopathogenic fungus *Fusarium sp. solani f.sp. pisi*. *Applied Soil Ecology*, 68, 57-60. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2013.03.009>
- Knežević, M., Dervišević, M., Jovković, M., Jevđenić, G., Maksimović, J., & Buntić, A. (2025). Versatile role of *Bacillus velezensis*: Biocontrol of *Fusarium sp. poae* and wireworms and barley plant growth promotion. *Biological Control*, 206, 105789. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2025.105789>
- Kunfa, G., Meng, C., Tingting, L., Xiaomin, L., Gui, L., & Diqiu, L. (2025). Biocontrol effects and underlying mechanism of *Bacillus subtilis* Pn1 on *Panax notoginseng* root rot caused by

- Fusarium sp. solani*. Industrial Crops and Products, 229, 120963. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2025.120963>
- Leslie JF, Summerell BA (2006) The *Fusarium* laboratory manual. Blackwell Publishing, Oxford
- Levasseur, M., Trac, A., Clavereau, I., Zannini, F., Estevez, Y., Amusant, N., Gelhaye, É., Pollet, N., Houël, E., Touboul, D., & Eparvier, V. (2025). Reverse chemical ecology to study the defense of the plant host *Sextonia rubra* and the chemical mediators of its endophyte *Fusarium sp. falciforme* against phytopathogen *Trametes versicolor*. *Phytochemistry*, 238, 114577. <https://doi.org/10.1016/J.PHYTOCHEM.2025.114577>
- Li, C., Wang, L., Chai, S., Xu, Y., Wang, C., Liu, Y., Lei, J., Jin, X., Cheng, X., Yang, Y., Yang, X., & Zhang, W. (2022). Screening of *Bacillus subtilis* HAAS01 and Its Biocontrol Effect on *Fusarium sp.* wilt in Sweet Potato. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 91(8), 1779-1793. <https://doi.org/10.32604/PHYTON.2022.020192>
- Li, N., Kim, K. T., Schlaghaufer, C., & Kang, S. (2024). Multifaceted effects of volatile organic compounds released by *Fusarium sp. oxysporum* on *Trichoderma* biocontrol agents. *Biological Control*, 191, 105473. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2024.105473>
- Li, Q., Hu, Y., Zhang, X., Xu, L., & Xu, Z. (2025). *Bacillus*-loaded biochar as a dual strategy for *Fusarium sp.* wilt control and soil health improvement in Peanut cultivation. *Applied Soil Ecology*, 213, 106325. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2025.106325>
- Li, Y., Wang, G., Rao, T., Chen, Y., Tan, X., & Li, E. (2024). A potential biocontrol and growth-promoting agent *Streptomyces luteovorticillatus* B4 for managing cabbage *Fusarium sp.* wilt and cucumber *Alternaria* leaf blight. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 134, 102440. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2024.102440>
- Liu, H., Huang, H., Wang, Y., An, M., Bai, J., Zhou, J., Lan, H., Qi, A., Song, B., & Wu, Y. (2026). Multifactorial synergistic strategies mediate the biocontrol of *Fusarium sp. oxysporum*-induced root rot by *Bacillus velezensis* SYL-3. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 216, 106745. <https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2025.106745>
- Liu, J., Qin, D., Huang, W., Wang, X., Li, Y., & Zhang, R. (2023). Biocontrol ability and action mechanism of *Bacillus amyloliquefaciens* Baf1 against *Fusarium sp. incarnatum* causing fruit rot in postharvest muskmelon (cv. Yugu) fruit. *LWT*, 181, 114714. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.114714>
- Liu, X., & Zhang, Y. (2021). Exploring the communities of bacteria, fungi and ammonia oxidizers in rhizosphere of *Fusarium sp.*-diseased greenhouse cucumber. *Applied Soil Ecology*, 161, 103832. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2020.103832>
- Liu, Y., Tian, Y., Yue, L., Constantine, U., Zhao, X., Zhou, Q., Wang, Y., Zhang, Y., Chen, G., Dun, Z., Cui, Z., & Wang, R. (2021). Effectively controlling *Fusarium sp.* root rot disease of *Angelica sinensis* and enhancing soil fertility with a novel attapulgitite-coated biocontrol agent. *Applied Soil Ecology*, 168, 104121. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2021.104121>
- Liu, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Kou, Z., Wang, X., Wang, Y., Su, X., Zhang, J., Liu, L., Yan, F., & Tian, Y. (2024). Biocontrol effects of three antagonistic bacteria strains against *Codonopsis pilosula* wilt disease caused by *Fusarium sp. oxysporum*. *Biological Control*, 190, 105446. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2024.105446>
- Logrieco, A., Rizzo, A., Ferracane, R., & Ritieni, A. (2002). Occurrence of beauvericin and enniatins in wheat affected by *Fusarium avenaceum* head blight. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(1), 82-85. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.1.82-85.2002>
- Lopez-Moya, F., Zorrilla-Fontanesi, Y., Lozano-Soria, A., Ganado, N. F. de L., Moreno-González, C. M., Hernández, A., Torres, A., Gonzalez-Silvera, D., Gunsé, B., Lopez-Jimenez, J. A., & Lopez-Llorca, L. v. (2025). Chitosan induces salicylic acid and methyl salicylate in banana plants and reduces colonisation by *Fusarium sp. oxysporum f. sp. cubense* TR4. *Current Plant Biology*, 42, 100457. <https://doi.org/10.1016/J.CPB.2025.100457>
- López-Núñez, R., Ramírez-Gil, J. G., Morales-Osorio, J. G., & Restrepo-Díaz, H. (2025). *Chitosan-based strategies combined with Pochonia chlamydosporia to control Fusarium*

- oxysporum f. sp. cubense* in banana plants. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 7, 100407. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100407>
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. Annual review of microbiology, 63(1), 541-556. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>
- Luo, M., Chen, Y., He, J., Tang, X., Wu, X., & Xu, C. (2021). Identification of a new *Talaromyces* strain DYM25 isolated from the Yap Trench as a biocontrol agent against *Fusarium sp.* wilt of cucumber. Microbiological Research, 251, 126841. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2021.126841>
- Luo, M., Huang, Q. R., Jia, M. X., Zeng, J. Y., Dong, E. R., & Dong, Z. Y. (2025). *Trichoderma azadirachtae* Ta3302: A novel biocontrol agent for banana *Fusarium sp.* wilt and a promoter of plant growth. Physiological and Molecular Plant Pathology, 140, 102976. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2025.102976>
- Ma, J. T., Du, J. X., Zhang, Y., Liu, J. K., Feng, T., & He, J. (2022). Natural imidazole alkaloids as antibacterial agents against *Pseudomonas syringae* pv. actinidiae isolated from kiwi endophytic fungus *Fusarium sp.* tricinctum. Fitoterapia, 156, 105070. <https://doi.org/10.1016/J.FITOTE.2021.105070>
- Ma, L. J., Geiser, D. M., Proctor, R. H., Rooney, A. P., O'Donnell, K., Trail, F., ... & Kazan, K. (2013). *Fusarium* pathogenomics. Annual review of microbiology, 67, 399-416. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-092412-155650>
- Martínez-Medina, A., Roldán, A., & Pascual, J. A. (2011). Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma harzianum* under conventional and low input fertilization field condition in melon crops: Growth response and *Fusarium sp.* wilt biocontrol. Applied Soil Ecology, 47(2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2010.11.010>
- Masmoudi, F., Pothuvattil, N. S., Tounsi, S., Saadaoui, I., & Trigui, M. (2023). Synthesis of silver nanoparticles using *Bacillus velezensis* M3-7 lipopeptides: Enhanced antifungal activity and potential use as a biocontrol agent against *Fusarium sp.* crown rot disease of wheat seedlings. International Journal of Food Microbiology, 407, 110420. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2023.110420>
- Mateo, E. M., Tarazona, A., Aznar, R., & Mateo, F. (2023). Exploring the impact of lactic acid bacteria on the biocontrol of toxigenic *Fusarium sp. spp.* and their main mycotoxins. International Journal of Food Microbiology, 387, 110054. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2022.110054>
- Mendes, R., Kruijt, M., De Bruijn, I., Dekkers, E., Van Der Voort, M., Schneider, J. H., & Raaijmakers, J. M. (2011). Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. Science, 332(6033), 1097-1100.
- Moussaid, F. Z., Lahlali, R., Ezrari, S., Radouane, N., & Housseini, A. I. (2025). Isolation, characterization and antifungal activity of *Bacillus* antagonistic bacteria from decomposing solid organic waste against *Alternaria alternata* and *Fusarium sp. oxysporum*. Journal of Natural Pesticide Research, 12, 100124. <https://doi.org/10.1016/J.NAPERRE.2025.100124>
- Munkvold, G. P. (2003). Cultural and genetic approaches to managing mycotoxins in maize. Annual review of phytopathology, 41(1), 99-116. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.41.052002.095510>
- Munkvold, G. P., & Desjardins, A. E. (1997). Fumonisin in maize: can we reduce their occurrence? Plant disease, 81(6), 556-565. <https://doi.org/10.1094/PDIS.1997.81.6.556>
- Nong, Q., Zhang, Y., Long, Y., Chen, Y., Qin, L., Lin, S., Zeng, F., & Xie, L. (2025). *Acidomelania saccharicola sp. nov.*, a new species of dark septate endophytes in Helotiales, with potential of controlling *Fusarium* wilt of banana. Biological Control, 206, 105781. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105781>
- Nguyen, P. A., Strub, C., Durand, N., Alter, P., Fontana, A., & Schorr-Galindo, S. (2018). Biocontrol of *Fusarium sp. verticillioides* using organic amendments and their

- actinomycete isolates. *Biological Control*, 118, 55-66. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2017.12.006>
- Nguyen, T. B. H., Pensec, F., Mounier, J., Coton, M., Henri-Sanvoisin, A., Mouzaoui, M., & Picot, A. (2025). A workflow for sourcing and characterizing wheat field microorganisms for the biocontrol of *Fusarium sp.* head blight. *Biological Control*, 209, 105856. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2025.105856>
- Omoruyi, B. E., Volschenk, H., Gelderblom, W. C. A., & Lilly, M. (2023). Biocontrol of *Fusarium sp.* Species Utilizing Indigenous Rooibos and Honeybush Extracts. *Microbiology Spectrum*, 11(3). <https://doi.org/10.1128/SPECTRUM.02742-22>
- Ongena, M., & Jacques, P. (2008). *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends in microbiology*, 16(3), 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.12.009>
- Osei-Obeng, P., Kiirika, L. M., & Nyende, A. B. (2024). Antifungal activity of citral against *Fusarium sp.* wilt in tomatoes and induction of the upregulation of glucanase, chitinase, and thaumatin-like protein plant defense genes. *Journal of Natural Pesticide Research*, 100097. <https://doi.org/10.1016/J.NAPER.2024.100097>
- Oulad Ziane, S., el Alaoui Talibi, Z., Ibensouda koraichi, S., Douira, A., Amir, S., Meddich, A., & el Modafar, C. (2023). Synergistic effects of arbuscular mycorrhizal fungi associated to plant growth-promoting rhizobacteria in suppression of soil-borne *Fusarium sp.* wilt of date palm. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 51, 102753. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2023.102753>
- Palencia, M., Rengifo, J. M., & Lerma, T. A. (2022). Modulation of the Bioactivity of Inorganic Nanomaterials by Controlling Nanobiointerface. In *Handbook of Green and Sustainable Nanotechnology: Fundamentals, Developments and Applications* (pp. 1-23). Cham: Springer International Publishing.
- Patel, D., Rathod, K., Parekh, K., & Thakker, J. N. (2024). NanoBioProtectors: Role of plants derived magnetic nanoparticles as a potent biocontrol agent against *Fusarium sp. oxysporum* ciceris. *Plant Nano Biology*, 9, 100086. <https://doi.org/10.1016/J.PLANA.2024.100086>
- Patel, R., Mehta, K., Prajapati, J., Shukla, A., Parmar, P., Goswami, D., & Saraf, M. (2022). An anecdote of mechanics for *Fusarium sp.* biocontrol by plant growth promoting microbes. *Biological Control*, 174, 105012. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2022.105012>
- Pedrero-Méndez, A., Cesarini, M., Mendoza-Salido, D., Petrucci, A., Sarrocco, S., Monte, E., & Hermosa, R. (2025). *Trichoderma* strain-dependent direct and indirect biocontrol of *Fusarium sp.* head blight caused by *Fusarium sp. graminearum* in wheat. *Microbiological Research*, 296, 128153. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2025.128153>
- Pereira, E. C., de Aldana, B. R. V., Arellano, J. B., Fernández, I., & Zabalgoageazcoa, I. (2025). *Diaporthe atlantica* improves tomato resistance against the vascular pathogen *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici*. *Biological Control*, 105852. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105852>
- Pérez, J. V., Serrano, L., Viteri, R., Sosa, D., Romero, C. A., & Diez, N. (2024). *Antarctic Streptomyces*: Promising biocontrol agents for combating *Fusarium sp. oxysporum f. sp. cubense*. *Biotechnology Reports*, 43, e00852. <https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2024.E00852>
- Petrucci, A., Vicente, I., Cesarini, M., Susca, A., Sarrocco, S., & Vannacci, G. (2025). *Fusarium sp. graminearum* regulates kp4l genes, encoding killer toxins, during competitive interaction with other plant pathogenic *Fusarium sp.* species. *Fungal Biology*, 129(4), 101569. <https://doi.org/10.1016/J.FUNBIO.2025.101569>
- Ploetz, R. C. (2015). *Fusarium* wilt of banana. *Phytopathology*, 105(12), 1512-1521. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW>

- Raaijmakers, J.M., Paulitz, T.C., Steinberg, C. et al. The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant Soil* 321, 341-361 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9568-6>
- Rathod, K., Rana, S., Dhandhukia, P., & Thakker, J. N. (2023). Marine *Bacillus* as a potent biocontrol agent against *Fusarium sp. oxysporum f.sp. ciceris*. *Plant Stress*, 10, 100289. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2023.100289>
- Ren, C., Li, S., Li, P., Wang, Y., Yuan, H., Zhao, Q., Li, H., Li, F., & Han, Y. (2025). Pathogen-activated *Chaetomium globosum* G3 enhances iron competition and other antagonistic mechanisms to suppress maize seedling blight causal agent *Fusarium sp. verticillioides*. *Microbiological Research*, 298, 128237. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2025.128237>
- Risoli, S., García-Pérez, P., Quaratiello, G., Cotrozzi, L., Sarrocco, S., Pellegrini, E., Nali, C., Lorenzini, G., & Lucini, L. (2025). Metabolomic insights on the response of winter wheat cultivars to *Fusarium sp.* head blight infection and inoculation with a biocontrol strain in open field. *Plant Stress*, 16, 100807. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2025.100807>
- Santhosh, C. R., Mahadevakumar, S., Chandranayaka, S., & Satish, S. (2025). Biocontrol of *Fusarium sp. spp.* and plant growth promoting efficacy of *Bacillus velezensis* strain SS_BR06 isolated from eggplant (*Solanum melongena L.*). *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 136, 102595. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2025.102595>
- Sarma, M., Zorrilla-Fontanesi, Y., Uma, S., Vanderschuren, H., Swennen, R., & de Coninck, B. (2025). Suppression of *Fusarium sp.* wilt in banana and growth promotion by the beneficial fungus *Trichoderma asperellum* TRC900 is cultivar dependent. *Biological Control*, 210, 105878. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2025.105878>
- Sharma, S., Yadav, G. K., Shakouka, M. A., Yadav, M. K., Subbaiyan, G. K., Saharan, M. S., Gupta, A. K., & Bashyal, B. M. (2024). Assessing the long-term survival of bakanae pathogen *Fusarium sp. fujikuroi* in rice-wheat cropping system in Northern - India using advanced metagenomic and qPCR techniques. *Plant Stress*, 14, 100690. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2024.100690>
- Sousa, J.A.J., Olivares, F.L. Plant growth promotion by *streptomycetes*: ecophysiology, mechanisms and applications. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 3, 24 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0073-5>
- Spagnoletti, F. N., Carmona, M., Balestrasse, K., Chiochio, V., Giacometti, R., & Lavado, R. S. (2021). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus intraradices* reduces the root rot caused by *Fusarium sp. Pseudomona graminearum* in wheat. *Rhizosphere*, 19, 100369. <https://doi.org/10.1016/J.RHISPH.2021.100369>
- Strub, C., Dieye, C. A. T., Nguyen, P. A., Constancias, F., Durand, N., Guendouz, S., Pratlong, M., Fontana, A., & Schorr-Galindo, S. (2021). Transcriptomes of the interaction between *Fusarium sp. verticillioides* and a *Streptomyces* strain reveal the fungal defense strategy under the pressure of a potential biocontrol agent. *Fungal Biology*, 125(2), 78-88. <https://doi.org/10.1016/J.FUNBIO.2019.11.007>
- Surono, & Narisawa, K. (2018). The inhibitory role of dark septate endophytic fungus *Phialocephala fortinii* against *Fusarium sp.* disease on the *Asparagus officinalis* growth in organic source conditions. *Biological Control*, 121, 159-167. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2018.02.017>
- Taheri, E., Tarighi, S., & Taheri, P. (2022). Characterization of root endophytic *Paenibacillus polymyxa* isolates with biocontrol activity against *Xanthomonas translucens* and *Fusarium sp. graminearum*. *Biological Control*, 174, 105031. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2022.105031>
- Taiebikhah, N., Mirtalebi, M., & Gharin, R. (2026). Antagonistic potential of arugula vermicompost-derived fungi for controlling tomato crown and root rot caused by *Fusarium sp. oxysporum f. sp. radicis-lycopersici*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 141, 102982. <https://doi.org/10.1016/J.PMPP.2025.102982>

- Tan, L., Xiao, Y., Zeng, W. ai, Gu, S., Zhai, Z., Wu, S., Li, P., Feng, K., Deng, Y., & Hu, Q. (2022). Network analysis reveals the root endophytic fungi associated with *Fusarium* sp. root rot invasion. *Applied Soil Ecology*, 178, 104567. <https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2022.104567>
- Tsegaye Mekuria Ayele, G. D. Gebremariam & S. Patharajan. (2021). *Isolation, Identification and In Vitro Test for the Biocontrol Potential of Trichoderma viride on Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici*. *The Open Agriculture Journal*, 15, 10-20. <https://doi.org/10.2174/1874331502115010010>
- Toghueo, R. M. K., Eke, P., Zabalgoceazcoa, Í., de Aldana, B. R. V., Nana, L. W., & Boyom, F. F. (2016). Biocontrol and growth enhancement potential of two endophytic *Trichoderma* spp. from *Terminalia catappa* against the causative agent of Common Bean Root Rot (*Fusarium* sp. *solani*). *Biological Control*, 96, 8-20. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2016.01.008>
- Viaene, T., Langendries, S., Beirinckx, S., Maes, M., & Goormachtig, S. (2016). *Streptomyces* as a plant's best friend *FEMS microbiology ecology*, 92(8), fiw119. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw119>
- Vitullo, D., De Curtis, F., Palmieri, D., & Lima, G. (2014). Milkwort (*Polygala myrtifolia* L.) decline is caused by *Fusarium oxysporum* and *F. solani* in Southern Italy. *European journal of plant pathology*, 140(4), 883-886. <https://doi.org/10.1007/s10658-014-0514-6>
- Wang, G., Wang, Y., Hu, J., Zhang, X., Chen, D., Liu, X., Mohamed, S. R., Lee, Y. W., Yang, C., Shi, J., & Xu, J. (2025). Strain prioritization for lipopeptide-producing bacteria with antagonistic effects against *Fusarium* sp. *graminearum*. *Microbial Pathogenesis*, 206, 107758. <https://doi.org/10.1016/J.MICPATH.2025.107758>
- Wang, R., Yu, X., Yin, Y., Norvienyeku, J., Asad Ali Khan, R., Zhang, M., Ren, S., Chen, J., & Liu, T. (2023). Biocontrol of cucumber *Fusarium* sp. wilt by *Trichoderma asperellum* FJ035 dependent on antagonism and spatiotemporal competition with *Fusarium* sp. *oxysporum*. *Biological Control*, 186, 105334. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2023.105334>
- Wei, J., Zhao, J., Suo, M., Wu, H., Zhao, M., & Yang, H. (2023). *Biocontrol mechanisms of Bacillus velezensis against Fusarium oxysporum from Panax ginseng*. *Biological Control*, 182, 105222. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105222>
- Xu, J., Zhang, Y., Ren, J., & Kong, Q. (2025). An atoxigenic *Aspergillus flavus* PA67 from Shandong province exhibits potential in biocontrol against toxigenic *Aspergillus flavus*, *Sclerotium rolfsii*, and *Fusarium* sp. *proliferatum*. *International Journal of Food Microbiology*, 426, 110918. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2024.110918>
- Xu, S., Wang, Y., Hu, J., Chen, X., Qiu, Y., Shi, J., Wang, G., & Xu, J. (2021). Isolation and characterization of *Bacillus amyloliquefaciens* MQ01, a bifunctional biocontrol bacterium with antagonistic activity against *Fusarium* sp. *graminearum* and biodegradation capacity of zearalenone. *Food Control*, 130, 108259. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.108259>
- Xu, W., Wang, K., Wang, H., Liu, Z., Shi, Y., Gao, Z., & Wang, Z. (2020). Evaluation of the biocontrol potential of *Bacillus* sp. WB against *Fusarium* sp. *oxysporum* f. sp. *niveum*. *Biological Control*, 147, 104288. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2020.104288>
- Yang, H., Zhang, J., Zhang, H., Cao, R., Tang, D., & Wang, L. (2024). 5-Aminolevulinic acid against strawberry *Fusarium* sp. wilt: Bidirectional regulation of biocontrol agents and pathogens. *Horticultural Plant Journal*, 10(6), 1349-1361. <https://doi.org/10.1016/J.HPJ.20213.02.014>
- Yao, L., Ji, C., Wang, Z., Liu, Y., Li, W., Wang, M., ... & He, X. (2025). Enhancing *Astragalus mongholicus* performance through endophytic fungi Improvement for *Fusarium* wilt resistance. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 136, 102532.
- Yi, Y., Luan, P., Fan, M., Wu, X., Sun, Z., Shang, Z., Yang, Y., & Li, C. (2024). Antifungal efficacy of *Bacillus amyloliquefaciens* ZK-9 against *Fusarium* sp. *graminearum* and analysis of the

- potential mechanism of its lipopeptides. *International Journal of Food Microbiology*, 422, 110821. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2024.110821>
- Yi, Z., Yue, Y., Kan, J., Wang, Z., Awad, S., Ibrahim, A. A., & Du, M. (2024). Biocontrol of *Fusarium sp. oxysporum*-infested *Gastrodia elata* Bl. by *Lactobacillus curvatus* 2768-VOCs and mechanism of inhibition. *Food Bioscience*, 62, 105174. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2024.105174>
- Zanon, M. S. A., Cavaglieri, L. R., Palazzini, J. M., Chulze, S. N., & Chiotta, M. L. (2024). *Bacillus velezensis* RC218 and emerging biocontrol agents against *Fusarium sp. graminearum* and *Fusarium sp. poae* in barley: in vitro, greenhouse and field conditions. *International Journal of Food Microbiology*, 413, 110580. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2024.110580>
- Zhang, H., Qi, L., Wang, S., Zhang, M., Liu, Z., Zhang, Y., Yan, Q., Li, C., Li, J., & Zhang, F. (2025). *Bacillus* Bsu02 and Bha48 increase wax gourd resistance to *Fusarium sp. proliferatum* via multiple mechanisms. *Biological Control*, 210, 105902. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2025.105902>
- Zhang, L., Li, P., Wang, Y., Wang, S., & Guo, L. (2024). p18 encoded by FgGMTV1 is responsible for asymptomatic infection in *Fusarium sp. graminearum*. *MBio*, 16(1). <https://doi.org/10.1128/MBIO.03066-24>
- Zhang, M., Li, X., Pan, Y., Qi, D., Zhou, D., Chen, Y., Feng, J., Wei, Y., Zhao, Y., Li, K., Wang, W., Zhang, L., & Xie, J. (2024). Biocontrol mechanism of *Bacillus siamensis sp. QN2MO-1* against tomato *Fusarium sp. wilt* disease during fruit postharvest and planting. *Microbiological Research*, 283, 127694. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2024.127694>