UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Hongos filamentosos en el control de enfermedades agrícolas: mecanismos de acción y potencial agronómico

Por:

LIZBETH CASTILLO DELGADO

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Agosto 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Hongos filamentosos en el control de enfermedades agrícolas: mecanismos de acción y potencial agronómico

Por:

LIZBETH CASTILLO DELGADO

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Comité de asesoría:

Dr. Julio César Tafolla Arellano

Asesor Principal Interno

Dra. Itzel Carolina Núñez García

Asesora Principal Externa

Dra. Olga Miriam Rutiaga Quiñones

Coasesora

Dra. Silvia Patricia Acuña Álvarez

Coasesora

M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Agosto 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Hongos filamentosos en el control de enfermedades agrícolas: mecanismos de acción y potencial agronómico

Por:

LIZBETH CASTILLO DELGADO

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Jurado Examinador

Dr. Julio César Tafolla Arellano
Presidente

Dra. Itzel Carolina Núñez García
Vocal

Dra. Olga Miriam Rutiaga Quiñones
Vocal

Dra. Silvia Patricia Acuña Álvarez
Vocal suplente

M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Agosto 2026

DERECHO DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO.

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo, tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior, me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

A t e n t a m e n t e

Alma Terra Matter



Lizbeth Castillo Delgado

Autor principal

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, quien ha sido mi guía, fortaleza y refugio durante todo este camino.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por brindarme la formación académica, las herramientas y los conocimientos que hicieron posible mi desarrollo profesional.

A mis **padres** y **familia,** por su amor incondicional, apoyo constante y confianza en mí. Gracias por estar presentes en cada etapa de mi formación, por sus sacrificios, consejos y palabras de aliento que me motivaron a no rendirme. Este logro es también suyo, pues fueron mi guía y mi mayor inspiración para seguir adelante.

A mi asesor, el **Dr. Julio César Tafolla Arellano**, por abrirme las puertas de su laboratorio y brindarme la oportunidad de aprender y crecer profesionalmente. Gracias por su apoyo, dedicación, tiempo y confianza durante el desarrollo de este trabajo.

A la **Dra. Itzel Carolina Núñez García**, por su valiosa orientación, acompañamiento y apoyo constante. Gracias por su paciencia, disposición para resolver mis dudas y por compartir sus conocimientos, los cuales fueron fundamentales para la culminación de esta monografía.

A mis coasesoras, **l**a **Dra. Olga Miriam Rutiaga Quiñones** y la **Dra. Silvia Patricia Acuña Álvarez**, por sus valiosas observaciones, recomendaciones y aportaciones, que enriquecieron significativamente este trabajo.

A mis **amigos**, por estar presentes a lo largo de este proceso, por escucharme, animarme y brindarme su apoyo incondicional. Gracias por cada consejo, cada palabra de ánimo y cada momento compartido; su compañía fue fundamental para alcanzar esta meta.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, me acompañaron, apoyaron y creyeron en mí durante este proceso.

Muchas gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, Juana Delgado Sánchez y Cipriano Castillo Muñoz, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia. Gracias por motivarme a seguir adelante, por depositar siempre su confianza en mí y por apoyarme incondicionalmente en cada paso de mi vida y en cada una de mis locuras. Gracias por creer en mis sueños y acompañarme siempre con amor, paciencia y comprensión. Este logro es también suyo, porque sin su apoyo, sacrificios y enseñanzas no habría sido posible llegar hasta aquí. Los amo con todo mi ser.

A mis hermanos, Carlos y César, por ser mis mejores amigos y compañeros de vida. Gracias por compartir conmigo alegrías, enojos, risas y aprendizajes, y por estar siempre a mi lado cuando más los necesito. Su cariño, apoyo y compañía han sido fundamentales en mi vida. Los amo infinitamente.

A Margarita, la mejor amistad que la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro me pudo regalar. Gracias por acompañarme desde el inicio hasta el final de este trayecto, por compartir conmigo momentos inolvidables y por brindarme una amistad sincera que hizo más especial esta etapa de mi vida.

A mi compañera de cuarto, **Alejandra**, por convertirte en la hermana que nunca tuve. Gracias por tu amistad, por tu apoyo incondicional y por compartir conmigo experiencias, risas y momentos que hicieron más fácil estar lejos de casa.

Y a todas las amistades que formaron parte de este camino, gracias por estar presentes en los momentos difíciles, por sus palabras de aliento, por escucharme y por apoyarme cuando más lo necesité. Cada uno de ustedes dejó una huella especial en mi vida y contribuyó, de una u otra manera, a que hoy pudiera alcanzar esta meta.

Con todo mi amor, cariño y gratitud, dedico este logro a cada una de las personas que caminaron a mi lado y creyeron en mí.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS ..... **V**

DEDICATORIA ..... **VI**

ÍNDICE GENERAL ..... **VII**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **IX**

ÍNDICE DE CUADROS ..... **IX**

RESUMEN ..... **X**

INTRODUCCIÓN **1**

1.1 Objetivo General 2

II REVISIÓN DE LITERATURA **3**

2.1 Hongos filamentosos como agentes de control biológico **3**

2.2 Importancia ecológica en agroecosistemas **3**

2.3 Interacción hongo–planta–patógeno 4

3. Hongos filamentosos de interés en el control biológico agrícola **5**

3.1 Trichoderma harzianum *2*

3.2 Trichoderma virens *3*

3.3 Clonostachys rosea *4*

3.4 Purpureocillium lilacinum *5*

4. Mecanismos de acción en el control biológico **7**

4.1 Competencia por espacio y nutrientes 8

4.2 Micoparasitismo y producción de enzimas líticas 9

4.3 Antibiosis y metabolitos secundarios 9

4.4 Inducción de resistencia sistémica en plantas 10

5. Relación entre mecanismos de acción y eficacia agronómica 10

5.1 Diferencias entre resultados de laboratorio, invernadero y campo 10

5.2 Evidencia de eficacia en cultivos agrícolas 11

5.3 Factores que influyen en la variabilidad de los resultados 11

5.4 Importancia del enfoque agronómico en la evaluación del control biológico 12

6. Transferencia de hongos biocontroladores del laboratorio al campo 13

6.1 Importancia de la formulación y viabilidad del hongo 13

6.2 Método y momento de aplicación en los cultivos 13

7. Formulación y viabilidad 17

7.1 Tipos de formulaciones utilizadas en agricultura 17

7.2 Viabilidad, almacenamiento y vida útil 18

7.3 Limitaciones de las formulaciones tradicionales 18

7.4 Estrategias para mejorar la viabilidad del hongo 18

8. Condiciones edáficas y ambientales que afectan el desempeño de hongos biocontroladores 19

8.1 Tipo de suelo y contenido de materia orgánico 20

8.2 pH y humedad del suelo 20

8.3 Temperatura y condiciones climáticas 21

8.4 Interacciones con la microbiota del suelo 21

9. Método y momento de aplicación 22

9.1 Aplicación al suelo 23

9.2 Tratamiento de semillas 23

9.3 Aplicación foliar 23

9.4 Momento de aplicación y frecuencia 24

9.5 Integración con otras prácticas agrícolas 24

10. Retos actuales y perspectivas del uso de hongos filamentosos en la agricultura 24

10.1 Limitaciones técnicas y agronómicas 24

10.2 Retos para su adopción en campo 25

10.3 Consideraciones regulatorias 25

10.4 Perspectivas futuras del control biológico con hongos filamentosos 26

11. CONCLUSIONES 27

12. LITERATURA CITADA 28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interacción hongo-planta-patógeno 5

Figura 2. Características morfológicas de los hongos empleados como agentes de control biológico. 7

Figura 3. Principales mecanismos de acción de hongos filamentosos utilizados en control biológico. 8

Figura 4. Factores edáficos y ambientales que afectan el desempeño de hongos biocontroladores. 19

Figura 5. Principales métodos de aplicación de hongos biocontroladores en agricultura. 22

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales características, mecanismos de acción y aplicaciones de hongos filamentosos empleados en control biológico. 1

Cuadro 2. Factores que influyen en la transferencia de hongos biocontroladores del laboratorio al campo 18

Cuadro 3. Características generales de las principales formulaciones utilizadas para hongos biocontroladores. 21

RESUMEN

Las enfermedades agrícolas causadas por fitopatógenos representan una de las principales limitantes para la producción de cultivos, generando pérdidas significativas en rendimiento y calidad. Ante las restricciones asociadas al uso intensivo de fungicidas químicos, el control biológico ha surgido como una alternativa sostenible para el manejo de enfermedades. La presente monografía tuvo como objetivo analizar los avances científicos relacionados con los principales hongos filamentosos utilizados como agentes de control biológico, considerando sus mecanismos de acción y los factores biológicos, ambientales y agronómicos que influyen en su eficacia bajo diferentes condiciones de producción agrícola.

Se revisaron especies de importancia agrícola como *Trichoderma harzianum, Trichoderma virens*, *Clonostachys rosea* y *Purpureocillium lilacinum*, destacando su capacidad para controlar fitopatógenos mediante mecanismos como competencia por espacio y nutrientes, micoparasitismo, producción de enzimas líticas, antibiosis e inducción de resistencia sistémica en las plantas. Asimismo, se abordaron aspectos relacionados con la formulación, viabilidad, almacenamiento y métodos de aplicación de estos microorganismos, así como la influencia de factores edáficos, ambientales y de manejo sobre su desempeño en campo.

La revisión mostró que la eficacia de los hongos biocontroladores no solo depende de sus características biológicas, sino también de las condiciones del agroecosistema y de las estrategias agronómicas implementadas. Los hongos filamentosos constituyen herramientas prometedoras para el manejo sostenible de enfermedades agrícolas, ya que contribuyen a reducir la dependencia de agroquímicos y favorecen la salud del suelo. Sin embargo, aún existen desafíos relacionados con su formulación, estabilidad y adopción a gran escala, por lo que su investigación y desarrollo continúan siendo prioritarios para fortalecer una agricultura más sostenible.

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola enfrenta numerosos desafíos, pero pocos tienen un impacto tan constante como las enfermedades causadas por hongos, bacterias, virus y otros fitopatógenos. Cada año, estos organismos provocan pérdidas importantes en cultivos destinados a la alimentación humana, afectando tanto el rendimiento como la calidad de los productos cosechados. La FAO estima que las plagas y enfermedades pueden ocasionar pérdidas cercanas al 40 % de la producción agrícola mundial, comprometiendo la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de millones de productores (FAO, 2021).

El problema no se limita únicamente a la reducción de las cosechas. Las enfermedades agrícolas incrementan los costos de producción al realizar intervenciones constantes y dificultan mantener sistemas productivos rentables. A esto se suma un escenario cada vez más complejo debido al cambio climático, que ha favorecido la aparición de brotes más frecuentes y la dispersión de patógenos hacia regiones donde anteriormente no representaban una amenaza significativa (FAO, 2023).

Frente a este panorama, el control químico ha sido durante décadas la estrategia más utilizada para reducir las pérdidas ocasionadas por enfermedades agrícolas. Sin embargo, el uso continuo e intensivo de fungicidas ha generado nuevos problemas como la aparición de cepas resistentes de fitopatógenos, la alteración de comunidades microbianas benéficas y la contaminación de distintos componentes del ambiente (Villavicencio-Vásquez et al., 2025; L. Zhang et al., 2024).

Estas limitaciones han puesto en evidencia que los fungicidas químicos, aunque efectivos en muchos casos, difícilmente pueden considerarse una solución única para los sistemas agrícolas actuales. La necesidad de alternativas más sostenibles ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias de manejo basadas en procesos biológicos.

Entre estas alternativas, el control biológico ha adquirido un papel cada vez más relevante. Este enfoque utiliza organismos vivos o productos derivados de ellos para reducir las poblaciones de patógenos y disminuir los daños en los cultivos. Su interés radica en que permite aprovechar interacciones naturales presentes en los agroecosistemas, disminuyendo la dependencia de insumos químicos y favoreciendo prácticas agrícolas más sostenibles.

Los agentes de control biológico incluyen bacterias, hongos, actinomicetos y diversos microorganismos capaces de interferir en el desarrollo de organismos perjudiciales. Dentro de este grupo, los hongos filamentosos han despertado especial interés debido a la diversidad de mecanismos que utilizan para limitar el crecimiento de fitopatógenos y favorecer la salud de las plantas.

Los hongos filamentosos constituyen algunos de los agentes de control biológico más estudiados en la actualidad. Su capacidad para establecerse en el suelo, colonizar la rizósfera e interactuar con otros microorganismos les permite desempeñar funciones que van más allá de la inhibición de patógenos. Muchas especies participan en procesos de competencia por nutrientes, producción de metabolitos antimicrobianos, micoparasitismo e inducción de mecanismos de defensa en las plantas(Vinale et al., 2008; Woo et al., 2023).

Entre los géneros con mayor relevancia destacan *Trichoderma*, *Clonostachys* y *Purpureocillium*, cuyos efectos han sido documentados en distintos cultivos y sistemas de producción. El estudio de estos hongos resulta particularmente importante en un contexto donde la agricultura busca reducir su dependencia de fungicidas convencionales y avanzar hacia esquemas de manejo más sostenibles.

1.1 Objetivo General

Analizar los avances científicos relacionados con los principales hongos filamentosos utilizados como agentes de control biológico, considerando sus mecanismos de acción y los factores biológicos, ambientales y agronómicos que influyen en su eficacia bajo diferentes condiciones de producción agrícola.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Hongos filamentosos como agentes de control biológico

Los hongos filamentosos forman parte de los microorganismos más abundantes y funcionalmente importantes del suelo. Su crecimiento ocurre mediante hifas, estructuras microscópicas que se extienden a través del sustrato y que, en conjunto, forman el micelio. Esta red les permite explorar grandes volúmenes de suelo y acceder eficientemente a fuentes de nutrientes que otros microorganismos no pueden aprovechar con la misma facilidad (Gandía & Garrigues, 2024).

La capacidad de crecer de manera continua a través de la elongación apical de las hifas les confiere una notable habilidad para colonizar nuevos espacios e interactuar con organismos presentes en su entorno. A ello se suma una pared celular compuesta principalmente por quitina y glucanos, la cual les proporciona protección y resistencia frente a diferentes condiciones ambientales (Gandía & Garrigues, 2024).

Estas características explican por qué los hongos filamentosos participan activamente en numerosos procesos ecológicos dentro del suelo. Su presencia no solo está asociada con la degradación de residuos orgánicos, sino también con la dinámica de nutrientes y la estabilidad física de los agroecosistemas.

2.2 Importancia ecológica en agroecosistemas

El funcionamiento biológico del suelo depende de la actividad de las comunidades microbianas que lo habitan. Entre ellas, los hongos filamentosos desempeñan funciones que van desde la descomposición de restos vegetales hasta la transformación de compuestos complejos como celulosa, lignina y quitina. Estos procesos, contribuyen al reciclaje de nutrientes y al mantenimiento de la fertilidad del suelo (Alcántara-Contreras et al., 2018)

Muchas especies habitan la rizosfera, una zona donde las raíces, los microorganismos y el suelo mantienen una interacción constante. En este ambiente compiten, cooperan y establecen relaciones que influyen directamente en la disponibilidad de nutrientes, la estructura de las comunidades microbianas y la salud de las plantas (Berg et al., 2021). Esta capacidad de interactuar con otros organismos es la que ha despertado el interés por ciertos géneros como *Trichoderma, Clonostachys*

y *Purpureocillium*. Su presencia en el suelo puede modificar las poblaciones microbianas y limitar el desarrollo de organismos fitopatógenos, convirtiéndolos en herramientas valiosas para el control biológico.

2.3 Interacción hongo–planta–patógeno

Las interacciones entre hongos benéficos, plantas y patógenos ocurren de manera simultánea en la rizosfera y constituyen la base de muchos procesos de control biológico (Figura 1). Una vez establecidos cerca de las raíces, algunos hongos filamentosos pueden utilizar los exudados radicales como fuente de nutrientes, favoreciendo su colonización y permanencia en el suelo.

Esta proximidad les permite competir con microorganismos patógenos por espacio y recursos, además de producir compuestos capaces de inhibir su desarrollo. En otros casos, la interacción con la planta desencadena respuestas fisiológicas que fortalecen sus mecanismos de defensa frente a futuros ataques (Delgado Silva & Gutiérrez Montoya, 2022).

El resultado es una red compleja de relaciones donde la planta, los microorganismos benéficos y los fitopatógenos influyen continuamente unos sobre otros. Comprender estas interacciones es fundamental para explicar por qué ciertos hongos filamentosos han logrado consolidarse como algunos de los agentes de control biológico más importantes en la agricultura moderna.

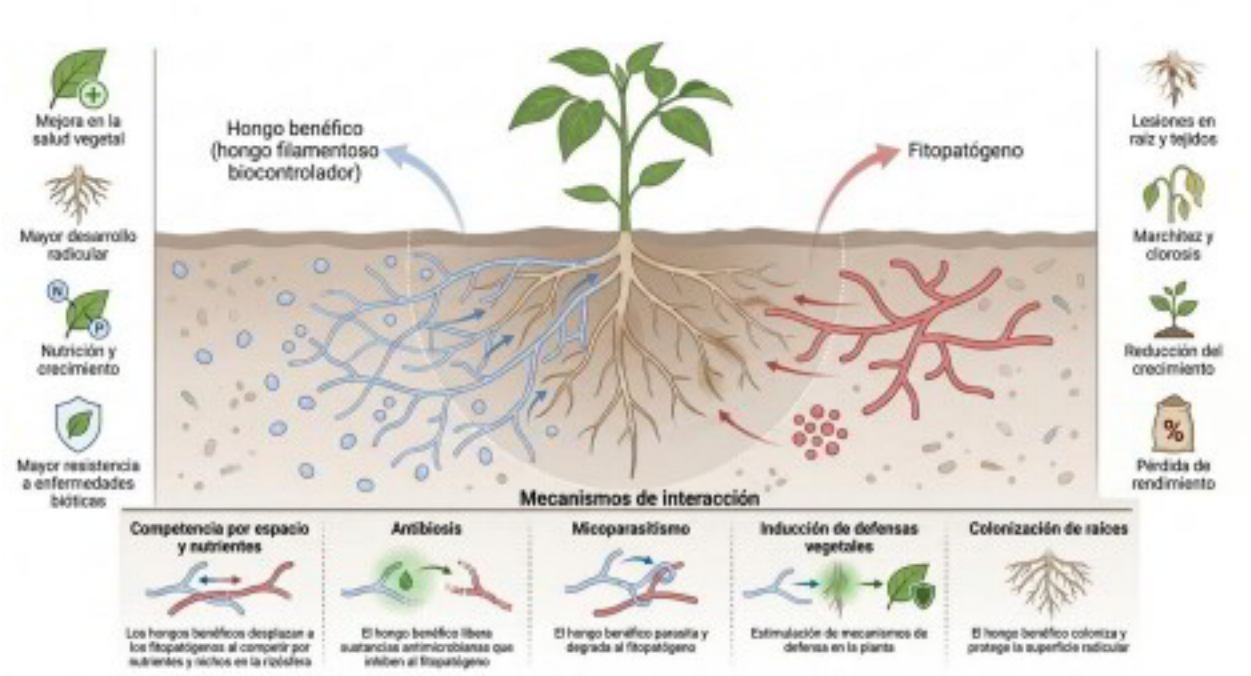


Figura 1. Interacción hongo-planta-patógeno

Asimismo, algunos hongos del suelo limitan el establecimiento de patógenos mediante distintos mecanismos ecológicos, como la competencia por espacio y nutrientes en la rizosfera, la producción de metabolitos antifúngicos y la secreción de enzimas hidrolíticas capaces de inhibir o degradar estructuras de los organismos patógenos. Estas interacciones forman parte de los procesos naturales de regulación microbiana que ocurren en los agroecosistemas (Gandía & Garrigues, 2024; García-Conde et al., 2024). La diversidad de mecanismos involucrados en estas interacciones ha despertado un creciente interés por ciertos hongos filamentosos con potencial para el control biológico.

3. Hongos filamentosos de interés en el control biológico agrícola

Diversas especies de hongos filamentosos han demostrado potencial como agentes de control biológico debido a su capacidad para limitar el desarrollo de fitopatógenos, promover el crecimiento vegetal y contribuir al equilibrio microbiológico del suelo. Entre los géneros más estudiados se encuentran *Trichoderma*, *Clonostachys* y *Purpureocillium*, los cuales presentan mecanismos de acción y diferentes aplicaciones agronómicas. El cuadro 1 resume las principales

características biológicas, mecanismos de acción y evidencias experimentales reportadas para las especies analizadas en esta monografía.

Cuadro 1. Principales características, mecanismos de acción y aplicaciones de hongos filamentosos empleados en control biológico.

Hongo modelo	Actividad biológica	Patógenos controlados	Cultivos reportados	Mecanismos de acción	Enzimas / metabolitos reportados	Principales efectos reportados	Referencia
Trichoderma harzianum	Antagonista simbionte	*Fusarium* spp. *Rhizoctonia solani, Botrytis cinérea*	Tomate, pepino, Maíz	Micoparasitismo Antibiosis, competencia, resistencia sistemática	Quitinasas, glucanasas, Peptaiboles harzianolida	Inhibición de patógenos y promoción del crecimiento vegetal	(Ding et al., 2026; Harman et al., 2004)
Trichoderma virens	Antagonista simbionte	*Pythium* spp, *Rhizoctonia* spp. *Sclerotium rolfsii*	Algodón Hortalizas	Antibiosis, Micoparasitismo, Inducción de resistencia	Gliotoxina, viridina, Enzimas líticas	Reducción de enfermedades en cultivos	(Howell, 2006; Mukherjee et al., 2013)
Clonostachys rosea	Antagonista	*Botrys Cinera*, *Fusarium* spp.	Fresa, cebada	Micoparasitismo, Antibiosis, competencia	Enzimas líticas, Metabolitos antifúngicos	Colonización y supresión de patógenos	(Salamone et al., 2018; Vinale et al., 2008)
Purpureocillium lilacinum	Antagonista promotor de crecimiento	Nematodos (*Meloidogyne* spp. *Tylenchulus semipenetran*)	Tomate, berenjena, cítricos	Parasitismo de huevos, producción de enzimas, promoción del crecimiento	Proteasas, quitinasas, metabolitos bioactivos	Reducción de poblaciones de nematodos y mejora del crecimiento	(Khan & Tanaka, 2023; Rigobelo et al., 2024)

3.1 Trichoderma harzianum

Trichoderma harzianum es uno de los hongos más utilizados en programas de control biológico debido a su rápida capacidad de crecimiento y colonización del suelo. Se encuentra de manera natural en la rizósfera de numerosas especies vegetales, donde interactúa activamente con otros microorganismos y con las raíces de las plantas. Su éxito como agente de biocontrol se relaciona con su capacidad para adaptarse a distintos ambientes, competir eficientemente por recursos y establecer asociaciones benéficas con el cultivo (Gato Cárdenas, 2010)

Microscópicamente, presenta conidióforos ramificados que terminan en fiálidas productoras de conidios de color verde, una característica distintiva del género. En cultivo desarrolla colonias de crecimiento rápido y abundante esporulación, lo que facilita su producción y formulación a escala comercial (Urbaneja et al., 2003)

El potencial de *T. harzianum* como agente de control biológico radica en la combinación de distintos mecanismos que le permiten limitar el desarrollo de fitopatógenos y favorecer la salud de las plantas. Entre ellos destacan el micoparasitismo, la producción de enzimas hidrolíticas y metabolitos antimicrobianos, la competencia por espacio y nutrientes, así como la capacidad de inducir respuestas de defensa en el hospedero (Ding et al., 2026; Harman et al., 2004).

La acción conjunta de estos procesos le permite actuar frente a una amplia variedad de hongos fitopatógenos e incluso afectar algunas etapas del ciclo de vida de nematodos presentes en el suelo. Debido a la importancia de estos mecanismos en el control biológico, serán abordados con mayor detalle en capítulos posteriores.

El uso de *T. harzianum* se ha extendido a numerosos cultivos debido a su capacidad para reducir enfermedades y favorecer el desarrollo vegetal. Diversos estudios reportan resultados positivos en cultivos de tomate, maíz, pepino y soja, donde contribuye al control de patógenos del suelo y enfermedades foliares, además de mejorar variables relacionadas con el crecimiento y el rendimiento (Andrade Montalvo et al., 2012; Santana Baños et al., 2016).

Más allá de su efecto antagonista, este hongo puede estimular la germinación, promover el desarrollo radicular y mejorar la absorción de nutrientes. Estas características, sumadas a la posibilidad de aplicarlo mediante tratamiento de semillas o incorporación al suelo, han favorecido su adopción como una de las herramientas biológicas más utilizadas en programas de agricultura sostenible. En algunos sistemas agrícolas, incluso se han reportado niveles de control comparables a los obtenidos con fungicidas convencionales (Alvarado Aguayo et al., 2019).

La versatilidad de *T. harzianum* ha convertido a esta especie en un referente dentro del control biológico moderno. Sin embargo, otras especies del mismo género también presentan características de interés agronómico, como ocurre con *Trichoderma virens*, descrita a continuación.

3.2 Trichoderma virens

Trichoderma virens es una de las especies más estudiadas dentro del género *Trichoderma* debido a su capacidad para establecerse en la rizósfera y limitar el desarrollo de diversos fitopatógenos del suelo, entre ellos *Rhizoctonia solani*, *Sclerotium rolfsii* y especies del género *Pythium*. Su éxito como agente de control biológico se relaciona con una combinación de mecanismos antagonistas y una notable adaptación al entorno radicular (Mukherjee & Kenerley, 2010).

Una vez establecido en la rizósfera, este hongo puede colonizar las capas externas de la raíz e interactuar estrechamente con la planta hospedera. Durante este proceso expresa genes asociados con la producción de enzimas y proteínas implicadas en la colonización vegetal, lo que favorece su permanencia en el sistema suelo-planta y amplía su potencial de aplicación en distintos cultivos (Morán-Diez et al., 2015).

Una de las características más destacadas de *T. virens* es su capacidad para producir metabolitos secundarios con actividad antifúngica. Entre los compuestos más estudiados se encuentran las gliotoxinas, gliovirinas, viridinas y peptaiboles, moléculas que pueden interferir con procesos celulares esenciales de diversos hongos fitopatógenos (Howell, 2006; Vinale et al., 2008).

Estos metabolitos contribuyen significativamente a la actividad antagonista de la especie y explican, en gran medida, su eficacia frente a numerosos patógenos del suelo. Debido a la importancia de estos compuestos en el control biológico, su modo de acción será abordado con mayor detalle en capítulos posteriores.

Además de su actividad antagonista, *T. virens* puede influir positivamente en el desarrollo de las plantas. Diversos estudios han demostrado que la colonización de la rizósfera por esta especie favorece la formación de raíces laterales y el incremento de biomasa vegetal, efectos que han sido asociados con la producción de compuestos con actividad similar a las auxinas, como el ácido indol-3-acético (IAA) (Contreras-Cornejo et al., 2009).

Sin embargo, la promoción del crecimiento vegetal no parece depender de un único mecanismo. La interacción entre *T. virens* y la planta involucra una compleja red de señales químicas y respuestas fisiológicas que pueden mejorar la absorción de nutrientes, el desarrollo radicular y la capacidad de respuesta frente a condiciones de estrés (Contreras-Cornejo et al., 2024b).

Estas características convierten a *T. virens* en una especie de interés no solo para el control de enfermedades, sino también para el fortalecimiento del crecimiento y productividad de los cultivos agrícolas.

3.3 Clonostachys rosea

Clonostachys rosea es un hongo filamentoso perteneciente al filo Ascomycota que se encuentra ampliamente distribuido en suelos agrícolas y en la rizósfera de numerosas especies vegetales. Durante las últimas décadas ha despertado interés por su capacidad para limitar el desarrollo de diversos fitopatógenos, así como por su potencial para integrarse en programas de manejo sostenible de enfermedades (Sun et al., 2020)

Su éxito como agente de control biológico se relaciona con una combinación de estrategias que incluyen el micoparasitismo, la competencia por recursos y la producción de compuestos con actividad antifúngica. Además, puede establecer asociaciones favorables con las plantas y contribuir a reducir la incidencia de enfermedades en distintos sistemas agrícolas (Karlsson et al., 2015; Sun et al., 2020).

Una de las características más destacadas de *C. rosea* es su capacidad para desarrollarse sobre otros hongos y utilizarlos como fuente de nutrientes. Este fenómeno, conocido como micoparasitismo, constituye uno de los principales mecanismos asociados con su actividad antagonista frente a numerosos fitopatógenos.

Durante este proceso, el hongo puede reconocer y colonizar estructuras del patógeno, apoyándose en la producción de enzimas hidrolíticas capaces de degradar componentes de la pared celular. La importancia de este mecanismo en el control biológico será abordada con mayor detalle en capítulos posteriores.

Diversos estudios han documentado la eficacia de *Clonostachys rosea* frente a patógenos de importancia agrícola como *Botrytis cinerea* y *Rhizoctonia solani*. Su actividad antagonista contribuye a reducir la incidencia y severidad de enfermedades mediante la combinación de distintos mecanismos ecológicos y fisiológicos que limitan el establecimiento de los organismos patógenos.

Por ejemplo, Salamone et al., (2018) reportaron una reducción significativa del desarrollo de *Rhizoctonia solani* AG-3, agente causal de la costra negra de la papa, lo que evidencia el potencial de esta especie para su aplicación en programas de control biológico.

La capacidad de adaptarse a diferentes ambientes agrícolas y actuar frente a diversos fitopatógenos ha convertido a *C. rosea* en una alternativa prometedora dentro de las estrategias actuales de manejo sostenible de enfermedades vegetales.

3.4 Purpureocillium lilacinum

Purpureocillium lilacinum (anteriormente *Paecilomyces lilacinus*) es un hongo filamentoso ampliamente distribuido en suelos agrícolas y en la rizósfera de numerosas plantas. Su importancia agronómica radica principalmente en su capacidad para actuar como agente de control biológico contra nematodos fitopatógenos, especialmente especies del género *Meloidogyne*, responsables de importantes pérdidas económicas en diversos cultivos; (Khan & Tanaka, 2023; Prasad et al., 2015).

La adaptación de este hongo al ambiente edáfico y su capacidad para interactuar con organismos presentes en la rizósfera han favorecido su incorporación en programas de manejo integrado de plagas. Actualmente es considerado uno de los microorganismos más estudiados para el control biológico de nematodos en sistemas agrícolas.

La principal aplicación de *P. lilacinum* está relacionada con el control de nematodos fitopatógenos. Este hongo puede colonizar huevos y estadios juveniles, afectando su desarrollo y reduciendo la población de nematodos presentes en el suelo. Como consecuencia, disminuye la formación de agallas y los daños ocasionados en el sistema radicular de las plantas (Khan & Tanaka, 2023; Santos et al., 2023).

Diversos estudios han documentado reducciones significativas en la eclosión de huevos y aumentos en la mortalidad de juveniles de *Meloidogyne incognita*, lo que ha consolidado a esta especie como una de las alternativas biológicas más prometedoras para el manejo de nematodos en la agricultura (El-Marzoky et al., 2023).

Además de su acción directa sobre el patógeno, se ha observado que la presencia de *P. lilacinum* puede favorecer respuestas defensivas en la planta hospedera, contribuyendo a una mayor tolerancia frente al estrés ocasionado por la infección nematológica (Rigobelo et al., 2024).

Aunque su uso se ha enfocado principalmente en el control de nematodos, *P. lilacinum* también ha mostrado efectos positivos sobre el crecimiento vegetal. Se ha reportado que puede favorecer el desarrollo radicular, mejorar la disponibilidad de nutrientes y contribuir a una mayor eficiencia en la absorción de fósforo mediante mecanismos asociados a la actividad microbiana en la rizósfera (Baron et al., 2020).

Asimismo, su aplicación puede contribuir a la reducción de enfermedades y al fortalecimiento del vigor de las plantas, favoreciendo sistemas de producción más sostenibles y con menor dependencia de insumos químicos. Estos beneficios han sido observados en cultivos como maíz, frijol y soja, donde se han reportado mejoras en variables relacionadas con el crecimiento y el estado nutricional de las plantas (Baron et al., 2020; Rigobelo et al., 2024).

La combinación de actividad nematicida y efectos promotores del crecimiento convierte a *P. lilacinum* en una herramienta de interés para el desarrollo de estrategias de manejo integrado orientadas a una agricultura más sostenible.

Diversos estudios también han reportado efectos positivos de *P. lilacinum* en cultivos como maíz, frijol común y soya, donde incrementa la disponibilidad de nitrógeno y fosfato en el suelo. De igual manera, favorece la acumulación de pigmentos fotosintéticos, como clorofilas y carotenoides, asociados con un mejor estado fisiológico y nutricional de las plantas (Baron et al., 2020; Rigobelo et al., 2024)

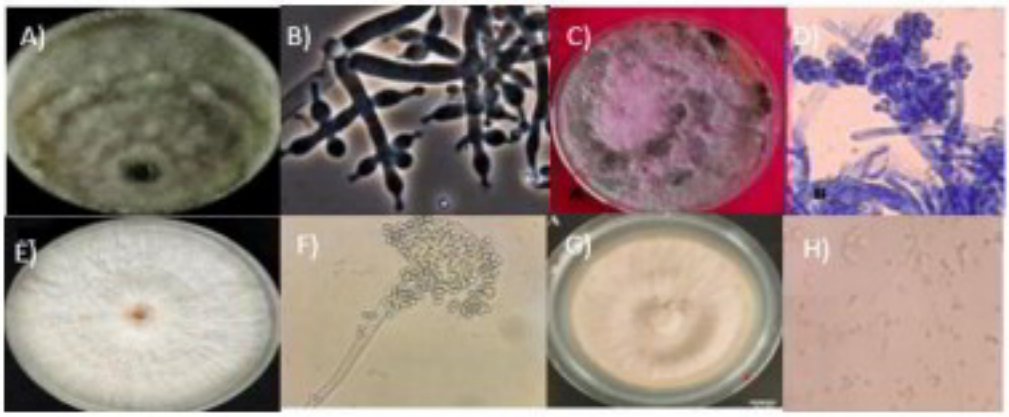


Figura 2. Características morfológicas de los hongos empleados como agentes de control biológico.

(A-B) *Trichoderma harzianum* colonia y conidios; (C-D) *Trichoderma virens* colonia y conidios; (E-F) *Clonostachys rosea* colonia y conidios; (G-H) *Purpureocillium lilacinum* colonia y conidios. Adaptado de Jang et al. (2018),(Sharma & Singh, 2014), Li et al., (2025) y Riaz et al., (2024)

4. Mecanismos de acción en el control biológico

Los hongos filamentosos utilizados en control biológico no dependen de un único mecanismo para limitar el desarrollo de los fitopatógenos. Por el contrario, suelen combinar distintas estrategias que actúan de manera simultánea en la rizósfera y sobre las superficies vegetales.

Esta capacidad de actuar en varios niveles explica gran parte de su eficacia en condiciones agrícolas.

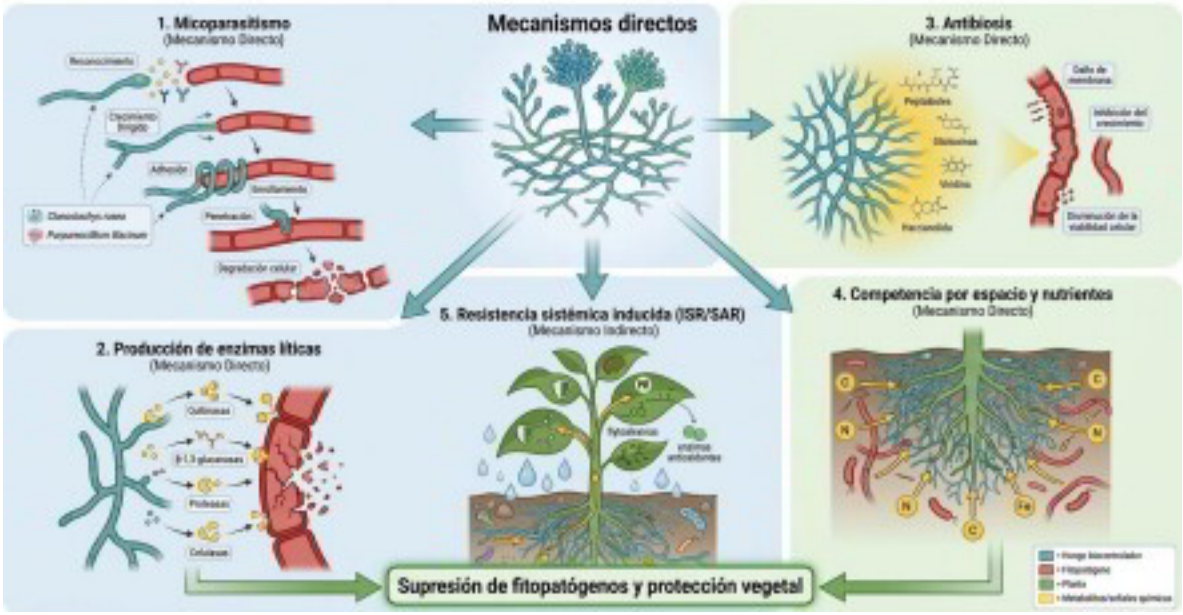


Figura 3. Principales mecanismos de acción de hongos filamentosos utilizados en control biológico.

4.1 Competencia por espacio y nutrientes

Una vez establecidos en el suelo, muchos hongos benéficos colonizan rápidamente la rizósfera y ocupan sitios que también podrían ser utilizados por microorganismos patógenos. En este ambiente, la disponibilidad de recursos suele ser limitada, por lo que la velocidad de crecimiento y la capacidad de adaptación representan ventajas importantes.

Especies de *Trichoderma*, por ejemplo, destacan por su rápido crecimiento y por su habilidad para aprovechar nutrientes disponibles antes de que los fitopatógenos logren establecerse. Como resultado, disminuye la disponibilidad de recursos esenciales para el desarrollo de organismos perjudiciales y se dificulta su proliferación (Berg et al., 2021; Harman et al., 2004).

*4.*2 Micoparasitismo y producción de enzimas líticas

Cuando el patógeno logra establecerse, algunos hongos antagonistas pueden interactuar directamente con él mediante un proceso conocido como micoparasitismo. Este mecanismo implica el reconocimiento del hospedero, el crecimiento dirigido de las hifas hacia sus estructuras y, finalmente, su colonización.

La penetración de las hifas del patógeno depende en gran medida de la producción de enzimas hidrolíticas como quitinasas, glucanasas y proteasas, capaces de degradar componentes de la pared celular fúngica (Druzhinina et al., 2011). Este mecanismo ha sido ampliamente documentado en especies como *Trichoderma harzianum* y *Clonostachys rosea*, las cuales utilizan estas enzimas para limitar el desarrollo de diversos hongos fitopatógenos.

Aunque suelen asociarse al micoparasitismo, estas enzimas también participan en procesos de competencia ecológica y colonización del suelo, favoreciendo el establecimiento de los microorganismos benéficos en el agroecosistema.

4.3 Antibiosis y metabolitos secundarios

La interacción entre microorganismos no siempre requiere contacto físico. Muchos hongos producen metabolitos secundarios capaces de inhibir el crecimiento de otros organismos presentes en su entorno. Este fenómeno, conocido como antibiosis, constituye una de las estrategias más importantes en el control biológico.

Entre los compuestos más estudiados se encuentran peptaiboles, gliotoxinas, gliovirinas y otros metabolitos producidos por especies del género *Trichoderma*. Estas moléculas pueden alterar la integridad de membranas celulares, interferir con procesos metabólicos esenciales o afectar la actividad enzimática de los patógenos (Vinale et al., 2008).

Además de su efecto inhibitorio, la producción de metabolitos secundarios favorece la adaptación de los hongos benéficos a ambientes altamente competitivos, contribuyendo a su permanencia en la rizósfera.

4.4 Inducción de resistencia sistémica en plantas

No todos los mecanismos de control biológico actúan directamente sobre el patógeno. Algunos hongos son capaces de interactuar con las raíces y activar respuestas defensivas en la planta antes de que ocurra una infección.

Este proceso, conocido como inducción de resistencia sistémica, implica la activación de rutas de señalización que conducen a la producción de proteínas relacionadas con la defensa, fitoalexinas y enzimas antioxidantes. Como consecuencia, la planta desarrolla una mayor capacidad para responder frente a hongos, bacterias, nematodos e incluso condiciones de estrés ambiental (Contreras-Cornejo et al., 2009; Harman et al., 2004).

Además de fortalecer las defensas vegetales, estas interacciones pueden favorecer el crecimiento radicular y mejorar la absorción de nutrientes, efectos que han sido ampliamente documentados en especies como *Trichoderma virens* y *T. harzianum* (Contreras-Cornejo et al., 2024b).

En conjunto, estos mecanismos no actúan de manera aislada. La combinación de competencia, micoparasitismo, producción de metabolitos y activación de defensas vegetales permite que los hongos filamentosos ejerzan un control más eficiente sobre los fitopatógenos y contribuyan a la salud del sistema suelo-planta.

5. Relación entre mecanismos de acción y eficacia agronómica

5.1 Diferencias entre resultados de laboratorio, invernadero y campo

Los mecanismos de control biológico descritos en el capítulo anterior suelen demostrarse inicialmente bajo condiciones de laboratorio, donde es posible trabajar con sistemas simplificados y controlar la mayoría de las variables. En este escenario, procesos como el micoparasitismo, la antibiosis o la producción de enzimas líticas suelen observarse con claridad, y los agentes biológicos muestran altos niveles de inhibición frente a los patógenos (Andrade-Hoyos et al., 2023; Berg et al., 2021).

Cuando la evaluación se realiza en condiciones de invernadero, el sistema se vuelve más complejo. La planta entra en escena y aparecen nuevas interacciones relacionadas con la

colonización de la rizósfera, la promoción del crecimiento vegetal y la respuesta de la planta frente al estrés. Aunque estas condiciones se aproximan más a la realidad agrícola, todavía permanecen bajo cierto grado de control.

La situación cambia en campo. Aquí intervienen simultáneamente factores climáticos, propiedades del suelo, disponibilidad de nutrientes, microbiota nativa y prácticas de manejo. Como resultado, la eficacia observada en laboratorio no siempre se reproduce con la misma intensidad bajo condiciones reales de producción (Alcántara-Contreras et al., 2018; FAO, 2023). Precisamente por ello, uno de los principales desafíos del control biológico consiste en trasladar de manera consistente los resultados experimentales al entorno agrícola.

5.2 Evidencia de eficacia en cultivos agrícolas

A pesar de esta complejidad, numerosos estudios han demostrado que los hongos filamentosos pueden desempeñar un papel importante en el manejo de enfermedades agrícolas. Especies del género *Trichoderma* han mostrado resultados favorables en cultivos como tomate, pepino, maíz y mora, donde contribuyen a reducir la incidencia de enfermedades y, en algunos casos, promueven el crecimiento vegetal (Alvarado Aguayo et al., 2019; Andrade Montalvo et al., 2012; Santana Baños et al., 2016).

Otros hongos presentan aplicaciones más específicas. *Purpureocillium lilacinum* ha sido ampliamente utilizado para el control de nematodos del género *Meloidogyne*, mientras que *Clonostachys rosea* ha mostrado potencial frente a patógenos como *Rhizoctonia solani* y *Botrytis cinérea* (Khan & Tanaka, 2023; Salamone et al., 2018).

En conjunto, estas experiencias demuestran que la eficacia de un agente biológico no solo depende de sus mecanismos de acción, sino también de su capacidad para establecerse en el agroecosistema y mantener una interacción estable con la planta y el entorno.

5.3 Factores que influyen en la variabilidad de los resultados

La respuesta de un mismo microorganismo puede variar considerablemente entre regiones, cultivos e incluso entre parcelas de una misma zona agrícola. Temperatura, humedad, pH,

textura del suelo y disponibilidad de nutrientes influyen directamente en la supervivencia y actividad de los hongos utilizados como biocontroladores (Berg et al., 2021; FAO, 2023).

A esto se suma la microbiota nativa del suelo. Los agentes introducidos deben integrarse a comunidades microbianas ya establecidas, donde enfrentan procesos de competencia, adaptación e incluso antagonismo. En algunos casos logran colonizar exitosamente la rizósfera; en otros, su establecimiento resulta limitado (Zhang et al., 2024).

Las prácticas de manejo también tienen un papel importante. Aspectos como la formulación utilizada, la dosis aplicada, el momento de aplicación o el uso simultáneo de fungicidas pueden modificar significativamente los resultados obtenidos. Por ello, la variabilidad observada en campo suele ser consecuencia de la interacción entre factores biológicos, ambientales y agronómicos más que de las características propias del microorganismo.

5.4 Importancia del enfoque agronómico en la evaluación del control biológico

La eficacia de un agente de control biológico no puede evaluarse únicamente por su capacidad para inhibir un patógeno en condiciones controladas. Su verdadero desempeño depende de cómo interactúa con el cultivo, el suelo, la microbiota y las condiciones ambientales presentes en cada sistema productivo.

Desde esta perspectiva, el control biológico debe entenderse como una herramienta integrada dentro del manejo agronómico y no como una solución aislada. La selección de la formulación adecuada, el momento de aplicación, las condiciones del suelo y su compatibilidad con otras prácticas de manejo son factores que determinan el éxito o fracaso de la estrategia.

En consecuencia, evaluar estos microorganismos desde un enfoque agronómico permite comprender mejor su comportamiento en campo y favorece el desarrollo de programas de manejo más eficientes, sostenibles y adaptados a las condiciones reales de producción.

6. Transferencia de hongos biocontroladores del laboratorio al campo

6.1 Importancia de la formulación y viabilidad del hongo

La eficacia de un hongo biocontrolador no depende únicamente de sus mecanismos de acción. Antes de interactuar con el patógeno, debe conservar su viabilidad durante el almacenamiento, el transporte y la aplicación. Por esta razón, la formulación constituye uno de los aspectos más importantes para su uso en condiciones agrícolas.

Las formulaciones buscan proteger las estructuras fúngicas y facilitar su manejo en campo. Entre las más utilizadas se encuentran los polvos mojables, gránulos, suspensiones líquidas y sistemas encapsulados, cada uno con ventajas particulares en términos de estabilidad y aplicación (Gato Cárdenas, 2010).

Sin embargo, mantener la viabilidad no garantiza por sí sola el éxito del biocontrol. Una vez aplicado, el microorganismo debe establecerse en el suelo o la rizósfera y adaptarse a las condiciones del agroecosistema. Como se resume en el cuadro 2, factores ambientales, edáficos y agronómicos pueden influir directamente en su supervivencia y desempeño en campo.

6.2 Método y momento de aplicación en los cultivos

Incluso un biocontrolador viable puede presentar resultados inconsistentes si se aplica de forma inadecuada. El método de aplicación determina el sitio donde el microorganismo se establece y, en consecuencia, las posibilidades de que exprese sus mecanismos de acción.

Las estrategias más utilizadas incluyen el tratamiento de semillas, la aplicación al suelo y las aplicaciones foliares. El tratamiento de semillas favorece una colonización temprana de la rizósfera, mientras que la aplicación al suelo facilita la interacción con las raíces y la microbiota asociada. Por su parte, las aplicaciones foliares suelen emplearse para el manejo preventivo de enfermedades aéreas, aunque su persistencia puede verse afectada por factores como la radiación solar o las precipitaciones (Harman et al., 2004).

El momento de aplicación también resulta determinante. En general, los mejores resultados se obtienen cuando los hongos se aplican antes del establecimiento del patógeno o durante

las primeras etapas de desarrollo del cultivo. Esto les permite colonizar el ambiente y competir por recursos antes de que aparezca la enfermedad (Andrade Montalvo et al., 2012).

La frecuencia de aplicación y su compatibilidad con otras prácticas de manejo también influyen en la persistencia del microorganismo. Por ello, el éxito del control biológico depende no solo de las características del hongo, sino también de la estrategia agronómica empleada para su implementación.

Los principales factores que condicionan la transferencia exitosa de hongos biocontroladores desde condiciones controladas hacia sistemas agrícolas reales se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Factores que influyen en la transferencia de hongos biocontroladores del laboratorio al campo

Factor	Efecto sobre el hongo	Consecuencia agronómica	Ejemplo	Referencia
Temperatura	Afecta la germinación de esporas, crecimiento micelial y producción de metabolitos	Disminución de la eficacia bajo temperaturas extremas	Menor actividad antagonista de *Trichoderma* spp. fuera de su rango óptimo	(Berg et al., 2021)
Humedad	Influye en la supervivencia y colonización del microorganismo	Baja persistencia en ambientes secos	Reducción del establecimiento en aplicaciones foliares	(FAO, 2023)
Radiación ultravioleta	Reduce la viabilidad de las esporas	Menor persistencia sobre superficies vegetales	Disminución de eficacia tras aplicaciones foliares	(FAO, 2023)
pH y tipo de suelo	Modifican el crecimiento y actividad metabólica	Variabilidad en la colonización de la rizósfera	Diferente desempeño según textura y fertilidad del suelo	(Berg et al., 2021)
Microbiota del suelo	Genera competencia y antagonismo microbiano	Dificultad de establecimiento del biocontrolador	Interferencia con microorganismos nativos	(X. Zhang et al., 2024)
Formulación	Protege estructuras fúngicas y mejora estabilidad	Mayor supervivencia y vida útil	Polvos mojables, gránulos y encapsulados	(Gato Cárdenas, 2010)
Método de aplicación	Determina el sitio y eficacia de colonización	Mayor o menor control dependiendo del patógeno	Tratamiento de semillas o aplicación foliar	(Harman et al., 2004)

Momento de aplicación	Influye en el establecimiento temprano del microorganismo	Mejor prevención de enfermedades	Aplicación preventiva antes de la infección	(Andrade Montalvo et al., 2012)
Uso de agroquímicos	Puede afectar la viabilidad microbiana	Reducción del efecto biocontrolador	Incompatibilidad con fungicidas químicos	(L. Zhang et al., 2024)

7. Formulación y viabilidad

7.1 Tipos de formulaciones utilizadas en agricultura

El éxito de un agente de control biológico no depende únicamente de las características del microorganismo. La forma en que se formula también determina su estabilidad, manejo y desempeño después de la aplicación.

Actualmente, los hongos utilizados como biocontroladores pueden comercializarse en formulaciones líquidas, sólidas o encapsuladas. Las formulaciones líquidas destacan por su facilidad de aplicación y bajo costo de producción, mientras que las sólidas suelen ofrecer ventajas durante el almacenamiento y transporte debido a su mayor estabilidad. Más recientemente, las formulaciones encapsuladas han despertado interés por su capacidad para proteger las estructuras fúngicas y favorecer una liberación gradual del microorganismo en el ambiente agrícola (Villavicencio-Vásquez et al., 2025).

La selección de una formulación depende de las características del microorganismo, las condiciones de almacenamiento y el sistema de aplicación. Las principales ventajas y limitaciones de cada alternativa se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Características generales de las principales formulaciones utilizadas para hongos biocontroladores.

Tipo de formulación	Ventajas	Limitaciones	Referencias
Líquida	Fácil aplicación y bajo costo	Menor estabilidad durante el almacenamiento	(Martinez et al., 2023; Villavicencio-Vásquez et al., 2025)
Sólida	Mayor estabilidad y vida útil	Posible pérdida de viabilidad durante el procesamiento	(Villavicencio-Vásquez et al., 2025)
Encapsulada	Protección y liberación controlada	Mayor complejidad y costo de producción	(Fadiji et al., 2024; Martinez et al., 2023)

7.2 Viabilidad, almacenamiento y vida útil

Una formulación eficiente debe mantener al microorganismo viable desde su producción hasta su aplicación en campo. Durante este periodo, factores como el tiempo de almacenamiento y las condiciones de conservación pueden afectar la supervivencia de las esporas y reducir la calidad del producto (Villavicencio-Vásquez et al., 2025).

En general, las formulaciones secas presentan una mayor estabilidad debido a su bajo contenido de humedad, aunque algunos procesos de secado pueden provocar pérdidas de viabilidad. Las formulaciones líquidas, por su parte, pueden experimentar cambios en propiedades físicas y químicas que afectan la concentración y estabilidad del microorganismo a lo largo del tiempo (Martinez et al., 2023).

Por esta razón, la vida útil constituye uno de los principales criterios de calidad en los productos biológicos destinados al sector agrícola.

7.3 Limitaciones de las formulaciones tradicionales

A pesar de los avances logrados durante las últimas décadas, muchas formulaciones comerciales siguen enfrentando problemas relacionados con la estabilidad y persistencia de los microorganismos. La pérdida de viabilidad durante el almacenamiento, la sensibilidad a factores ambientales y la reducción de la actividad biológica después de la aplicación continúan siendo desafíos importantes (Fadiji et al., 2024).

A estas limitaciones se suman aspectos económicos y tecnológicos asociados con la producción a gran escala, los cuales pueden restringir la disponibilidad y adopción de ciertos productos biológicos. Como resultado, la eficacia observada en condiciones controladas no siempre se mantiene bajo escenarios agrícolas reales.

7.4 Estrategias para mejorar la viabilidad del hongo

La búsqueda de formulaciones más estables ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a proteger las estructuras fúngicas y prolongar su actividad biológica. Entre ellas, la microencapsulación se ha consolidado como una de las estrategias más prometedoras, ya

que permite reducir el impacto de factores ambientales adversos y mejorar la supervivencia del microorganismo durante el almacenamiento y la aplicación (Martinez et al., 2023).

El empleo de matrices poliméricas, biopolímeros y sistemas de liberación controlada también ha mostrado resultados favorables, favoreciendo una mayor persistencia de los agentes biológicos en el ambiente agrícola. Estas tecnologías representan una de las principales líneas de innovación para el desarrollo de bioinsumos más eficientes y competitivos.

8. Condiciones edáficas y ambientales que afectan el desempeño de hongos biocontroladores

La eficacia de los hongos biocontroladores en condiciones agrícolas depende no solo de sus mecanismos de acción, sino también de las características físicas, químicas y biológicas del ambiente donde se desarrollan. Factores como el tipo de suelo, la disponibilidad de materia orgánica, el pH, la humedad, la temperatura y la microbiota nativa influyen directamente en su capacidad para establecerse en la rizósfera y ejercer control sobre los fitopatógenos.

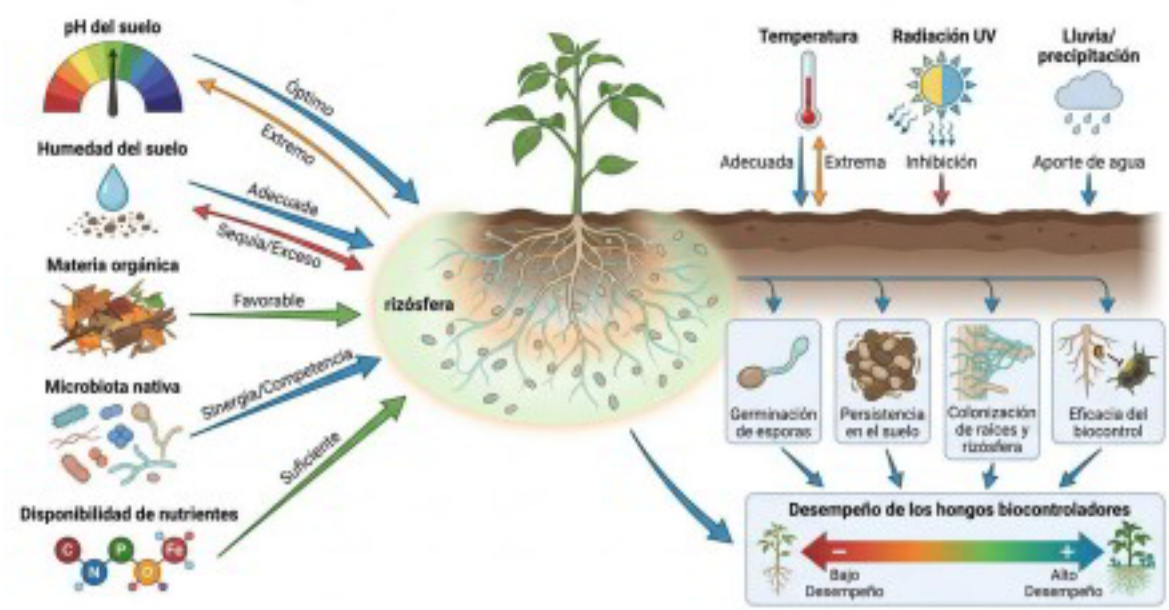


Figura 4. Factores edáficos y ambientales que afectan el desempeño de hongos biocontroladores.

Como se observa en la Figura 3, las condiciones del suelo y del ambiente influyen en procesos esenciales como la germinación de esporas, la persistencia del microorganismo, la colonización de raíces y, en consecuencia, la eficacia del control biológico. La interacción entre estos factores determina el éxito de los hongos biocontroladores una vez aplicados en campo.

8.1 Tipo de suelo y contenido de materia orgánico

Una vez que el hongo llega al campo, su capacidad para establecerse depende en gran medida de las características del suelo. La textura, la aireación y la retención de humedad influyen directamente en el crecimiento del micelio y en la colonización de la rizósfera, donde ocurren gran parte de las interacciones descritas en capítulos anteriores (Kredics et al., 2024; Shahriar et al., 2022).

La materia orgánica tiene un papel particularmente importante porque funciona como fuente de carbono y energía para numerosos microorganismos del suelo. Los suelos con mayor contenido de residuos orgánicos suelen presentar una actividad biológica más intensa y condiciones más favorables para el establecimiento de hongos biocontroladores. Por el contrario, los suelos degradados o con baja materia orgánica pueden limitar su persistencia y reducir su capacidad para competir con otros microorganismos presentes en el agroecosistema (Gašparović Pinto et al., 2024).

Por esta razón, la respuesta de un mismo agente biológico puede variar considerablemente entre distintos tipos de suelo, incluso cuando se utilizan las mismas dosis y métodos de aplicación.

8.2 pH y humedad del suelo

Además de la composición del suelo, factores como el pH y la humedad condicionan directamente el desarrollo de los hongos. El pH influye en la germinación de esporas, el crecimiento micelial y la disponibilidad de nutrientes, mientras que la humedad regula procesos esenciales relacionados con la expansión del micelio y la colonización del entorno radicular (Abeyratne y Deshappriya, 2018).

Aunque muchas especies presentan una amplia capacidad de adaptación, las condiciones ligeramente ácidas y con disponibilidad adecuada de agua suelen favorecer una mayor actividad biológica. Cuando la humedad es insuficiente, el establecimiento del microorganismo se vuelve más lento; en condiciones excesivas también pueden generarse desequilibrios que afectan su desempeño (Purwanto et al., 2022).

8.3 Temperatura y condiciones climáticas

La temperatura representa uno de los factores ambientales más determinantes para el funcionamiento de los hongos biocontroladores. Procesos como la germinación, el crecimiento micelial, la producción de enzimas y la síntesis de metabolitos secundarios dependen directamente de las condiciones térmicas del entorno (Yao et al., 2023).

Las temperaturas extremas pueden reducir la supervivencia del microorganismo y limitar la expresión de mecanismos como el micoparasitismo o la competencia por recursos. A esto se suman otros factores climáticos, como periodos prolongados de sequía o lluvias intensas, que modifican las condiciones del suelo y afectan la estabilidad de las poblaciones microbianas (Kredics et al., 2024).

Por ello, la eficacia observada en laboratorio no siempre se reproduce en campo, donde las condiciones ambientales cambian continuamente y obligan a los microorganismos a adaptarse a escenarios mucho más complejos.

8.4 Interacciones con la microbiota del suelo

Los hongos utilizados en control biológico no actúan de forma aislada. Una vez introducidos al suelo, pasan a formar parte de una comunidad microbiana diversa donde interactúan con bacterias, hongos y otros organismos presentes en la rizósfera (Shahriar et al., 2022).

Estas interacciones pueden favorecer o limitar su establecimiento. En algunos casos predominan relaciones de competencia por espacio y nutrientes; en otros, pueden generarse asociaciones que contribuyen a mejorar la disponibilidad de recursos y la estabilidad ecológica del suelo. Como resultado, la microbiota nativa influye directamente en la persistencia y eficacia de los agentes biológicos (Guzmán-Guzmán et al., 2023).

También se ha observado que ciertos hongos biocontroladores modifican la composición microbiana de la rizósfera, favoreciendo microorganismos asociados con la salud vegetal y el reciclaje de nutrientes. Este efecto contribuye al funcionamiento integral del agroecosistema y refuerza los beneficios del control biológico más allá de la simple supresión de patógenos (Contreras-Cornejo et al., 2024a).

En consecuencia, el desempeño de los hongos biocontroladores depende no solo de sus propias características, sino también de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo donde se desarrollan.

9. Método y momento de aplicación

La eficacia de los hongos biocontroladores no depende únicamente de sus mecanismos de acción o de la calidad de la formulación. Una vez aplicados en campo, factores como el método de aplicación, el momento de uso y su integración con otras prácticas de manejo influyen directamente en su establecimiento y desempeño. Las principales estrategias empleadas en agricultura se resumen en la Figura 5.



Figura 5. Principales métodos de aplicación de hongos biocontroladores en agricultura.

Principales métodos de aplicación de hongos biocontroladores en agricultura. Los hongos pueden aplicarse mediante tratamiento de semillas, incorporación al suelo o aplicaciones foliares. La eficacia de cada estrategia depende del momento de aplicación, las condiciones ambientales y la capacidad del microorganismo para establecerse en el sistema suelo-planta.

9.1 Aplicación al suelo

La aplicación al suelo es una de las estrategias más utilizadas para hongos como *Trichoderma harzianum*, *T. virens*, *Clonostachys rosea* y *Purpureocillium lilacinum*. Su objetivo es favorecer el establecimiento del microorganismo en la rizósfera, donde puede interactuar con las raíces y con la comunidad microbiana del suelo.

La incorporación directa al sustrato, el uso de suspensiones líquidas o la inoculación en la zona radicular son algunas de las alternativas más empleadas. Su éxito depende en gran medida de las condiciones del suelo descritas en el capítulo anterior, especialmente la disponibilidad de materia orgánica, la humedad y la actividad microbiana presente en la rizósfera (Harman et al., 2004; Woo et al., 2023).

9.2 Tratamiento de semillas

Otra estrategia ampliamente utilizada consiste en aplicar el microorganismo directamente sobre la semilla antes de la siembra. Esto permite que la colonización comience desde las primeras etapas del desarrollo vegetal y favorece el establecimiento temprano del hongo en el sistema suelo-planta.

Además de contribuir a la protección frente a patógenos del suelo, este método puede favorecer la germinación y el vigor inicial de las plántulas. Diversos estudios han reportado resultados positivos con *Trichoderma harzianum*, particularmente en etapas tempranas del cultivo (Mukhopadhyay & Kumar, 2020; Tyśkiewicz et al., 2022).

9.3 Aplicación foliar

Cuando el objetivo es el manejo de enfermedades aéreas, la aplicación foliar constituye una alternativa frecuente. En este caso, las suspensiones del hongo se distribuyen sobre la superficie de las hojas para favorecer la colonización del follaje y la activación de mecanismos de defensa en la planta.

Algunas especies pueden establecerse temporalmente en la filósfera y competir con microorganismos asociados a la superficie vegetal. Sin embargo, la eficacia de este método suele estar más influenciada por factores ambientales como la radiación solar, la temperatura

y las precipitaciones, que pueden reducir la permanencia del microorganismo después de la aplicación (Woo et al., 2023).

9.4 Momento de aplicación y frecuencia

La oportunidad de aplicación suele ser tan importante como el método empleado. En general, los mejores resultados se obtienen cuando los agentes biológicos se aplican de forma preventiva, antes de que el patógeno alcance niveles elevados de infección (Ferreira & Musumeci, 2021).

La frecuencia de aplicación varía según la formulación utilizada, el cultivo y las condiciones ambientales. Algunos sistemas requieren una sola aplicación al inicio del ciclo, mientras que otros demandan aplicaciones de refuerzo para mantener poblaciones suficientes del microorganismo durante el desarrollo del cultivo (Ferreira & Musumeci, 2021; Woo et al., 2023).

9.5 Integración con otras prácticas agrícolas

El control biológico rara vez funciona como una estrategia aislada. Su mayor potencial se observa cuando se integra con otras prácticas de manejo, como la rotación de cultivos, el uso de materia orgánica, el manejo adecuado del riego y la reducción del uso indiscriminado de agroquímicos.

Diversos estudios han demostrado que este enfoque favorece la estabilidad del microbioma del suelo, mejora la salud del cultivo y contribuye a sistemas de producción más sostenibles. Bajo estas condiciones, los hongos biocontroladores pueden expresar de manera más eficiente los mecanismos descritos a lo largo de esta monografía y ofrecer resultados más consistentes en campo (Fadiji et al., 2024; Manzar et al., 2022; Singh et al., 2024).

10. Retos actuales y perspectivas del uso de hongos filamentosos en la agricultura

10.1 Limitaciones técnicas y agronómicas

Los resultados obtenidos en laboratorio suelen mostrar un alto potencial de los hongos biocontroladores. Sin embargo, trasladar ese desempeño a condiciones agrícolas reales

continúa siendo uno de los principales desafíos. Como se discutió en capítulos anteriores, factores como la temperatura, la humedad, las características del suelo y la interacción con la microbiota nativa pueden modificar significativamente la respuesta del microorganismo una vez aplicado en campo.

A ello se suman aspectos relacionados con la formulación y conservación del producto. La pérdida de viabilidad durante el almacenamiento, la sensibilidad a condiciones ambientales adversas y la dificultad para mantener poblaciones estables después de la aplicación pueden limitar la eficacia observada bajo condiciones comerciales. Por esta razón, la estandarización de bioinsumos microbianos sigue siendo un tema prioritario para la investigación y el desarrollo tecnológico (Fadiji et al., 2024; Kredics et al., 2024).

10.2 Retos para su adopción en campo

Aunque el interés por la agricultura sostenible ha aumentado durante los últimos años, el uso de hongos biocontroladores todavía representa una proporción relativamente pequeña dentro de las estrategias de manejo fitosanitario empleadas por los productores.

Parte de esta situación se relaciona con la percepción de que los productos biológicos ofrecen respuestas más lentas o menos consistentes que los agroquímicos convencionales. Además, su éxito suele depender de un manejo adecuado y del conocimiento de las condiciones donde serán aplicados. Cuando estos aspectos no se consideran, los resultados pueden ser variables y generar desconfianza en el usuario final.

La adopción de estas tecnologías requiere no solo productos de mayor calidad, sino también programas de capacitación, asesoría técnica y esquemas de manejo integrado que faciliten su incorporación dentro de los sistemas productivos (Singh et al., 2024)

10.3 Consideraciones regulatorias

La regulación de bioinsumos constituye otro punto crítico para la expansión de estas tecnologías. En varios países, los procesos de registro y evaluación pueden ser prolongados, costosos y, en algunos casos, poco adaptados a las características particulares de los microorganismos utilizados en agricultura.

A esto se añade la necesidad de establecer criterios más homogéneos para evaluar calidad, viabilidad, concentración y eficacia de los productos comerciales. Una mayor estandarización permitiría generar mayor confianza entre productores, distribuidores y organismos reguladores, favoreciendo una adopción más amplia de estas alternativas biológicas (Villavicencio-Vásquez et al., 2025)

10.4 Perspectivas futuras del control biológico con hongos filamentosos

A pesar de las limitaciones existentes, el panorama para los hongos biocontroladores es alentador. El desarrollo de herramientas genómicas, nuevas tecnologías de formulación y estrategias de producción más eficientes está ampliando las posibilidades de uso de estos microorganismos en la agricultura moderna.

Es probable que especies como *Trichoderma harzianum*, *T. virens*, *Clonostachys rosea* y *Purpureocillium lilacinum* continúen ganando relevancia dentro de programas de manejo integrado. Al mismo tiempo, el estudio de consorcios microbianos, biofertilizantes multiespecie y sistemas avanzados de encapsulación abre nuevas oportunidades para mejorar la estabilidad y el desempeño de estos organismos en condiciones de campo.

Más que sustituir completamente a otras estrategias de manejo, los hongos filamentosos parecen dirigirse hacia un papel complementario dentro de sistemas agrícolas cada vez más enfocados en la sostenibilidad, la reducción de insumos químicos y la conservación de la salud del suelo (Kredics et al., 2024; Woo et al., 2023).

En conjunto, los hongos filamentosos representan una herramienta con gran potencial para el manejo sostenible de enfermedades agrícolas. Aunque aún existen desafíos relacionados con su formulación, estabilidad, regulación y desempeño bajo condiciones de campo, los avances recientes en biotecnología y microbiología agrícola han ampliado significativamente las posibilidades de su aplicación práctica. La integración de estos microorganismos dentro de estrategias de manejo agrícola sostenible no solo contribuye a la reducción del uso de agroquímicos, sino que también favorece la conservación de la salud del suelo y el equilibrio de los agroecosistemas. En este contexto, su estudio y desarrollo continúan siendo áreas

prioritarias para fortalecer una agricultura más eficiente, resiliente y ambientalmente responsable.

11. CONCLUSIONES

La revisión realizada permitió identificar el potencial de diversos hongos filamentosos como herramientas para el control biológico de enfermedades agrícolas. Especies como *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma virens*, *Clonostachys rosea* y *Purpureocillium lilacinum* presentan diferentes estrategias para limitar el desarrollo de fitopatógenos y nematodos, incluyendo micoparasitismo, producción de enzimas líticas, antibiosis, competencia por recursos e inducción de mecanismos de defensa en las plantas.

Más que actuar mediante un único mecanismo, estos microorganismos combinan distintos procesos biológicos que les permiten establecerse en la rizósfera, interactuar con la planta y contribuir a la reducción de enfermedades. En algunos casos, además, favorecen el crecimiento vegetal y mejoran la disponibilidad o absorción de nutrientes, ampliando su interés dentro de los sistemas agrícolas actuales.

La eficacia observada en condiciones de laboratorio no siempre se reproduce de la misma manera en campo. El desempeño de los hongos biocontroladores depende de numerosos factores, entre ellos las características del suelo, las condiciones climáticas, la microbiota nativa y las estrategias de manejo implementadas por el productor. Por esta razón, el éxito del control biológico no debe evaluarse únicamente en función del microorganismo utilizado, sino también considerando aspectos como la formulación, la viabilidad durante el almacenamiento, el método de aplicación y el momento de uso.

En este contexto, el empleo de hongos filamentosos representa una alternativa compatible con los principios de la agricultura sostenible, ya que contribuye a disminuir la dependencia de insumos químicos y favorece el aprovechamiento de procesos biológicos presentes de forma natural en el suelo. Además de su papel en el manejo de enfermedades, estos microorganismos pueden participar en la conservación de la salud edáfica, el mantenimiento de la diversidad microbiana y la mejora del desarrollo vegetal.

Aunque todavía existen desafíos relacionados con su formulación, regulación y adopción a gran escala, los avances recientes en biotecnología, microbiología agrícola y desarrollo de bioinsumos permiten anticipar una participación cada vez más importante de estos organismos dentro de los programas de manejo integrado. Su estudio y aplicación continuarán siendo elementos clave para avanzar hacia sistemas agrícolas más resilientes, productivos y ambientalmente sostenibles.

12. LITERATURA CITADA

Abeyratne, G. D. D., & Deshappriya, N. (2018). The effect of pH on the biological control activities of a Trichoderma sp. against Fusarium sp. isolated from the commercial onion fields in Sri Lanka. *Tropical Plant Research*, *5*(2), 121–128. https://doi.org/10.22271/tpr.2018.v5.i2.017

Alcántara-Contreras, Karen, G., Corlay-chee, Hernandez-Tapia, & Alejandro. (2018). La ecología microbiana como herramienta indispensable en estudios agroecológicos. *Cademos de Agroecologia*, *13*(1).

Alvarado Aguayo, A., Pilaloa David, W., Torres Sánchez, S., & Torres Sánchez, K. (2019). Efecto de Trichoderma harzianum en el control de mildiu (Pseudoperonospora cubensis) en pepino. *Agronomía Costarricense*, *43*(1), 101–111. https://doi.org/10.15517/rac.v43i1.35672

Andrade-Hoyos, P., Rivera-Jiménez, M. N., Landero-Valenzuela, N., Silva-Rojas, H. V., Martínez-Salgado, S. J., & Romero-Arenas, O. (2023). Beneficios ecológicos y biológicos del hongo cosmopolita Trichoderma spp. en la agricultura: una perspectiva en el campo mexicano. *Revista Argentina de Microbiología*, *55*(4), 366–377. https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.06.005

Andrade Montalvo, M., C., Erazo, S., & N. & León Ruiz, J. E. (2012). *Evaluación del Efecto de la Aplicación de Trichoderma harzianum y Trichoderma viride para el Control de Marchitez en Mora de Castilla (Rubus glaucus Benth) en el Cantón Pillaro, Provincia de Tungurahua*. 103.

Baron, N. C., Souza Pollo, A. de, & Rigobelo, E. C. (2020). Purpureocillium lilacinum and Metarhizium marquandii as plant growth-promoting fungi. *PeerJ*, *8*, e9005. https://doi.org/10.7717/peerj.9005

Berg, G., Kusstatscher, P., Stocker, F., Abdelfattah, A., Cernava, T., Bettiol, W., de Medeiros, F. H. V., Chiaramonte, J. B., Mendes, R., & Compant, S. (2021). *Microbial bioprotectants for plant disease management* (Vol. 108). Burleigh Dodds Science Publishing.

Contreras-Cornejo, H. A., Macías-Rodríguez, L., Cortés-Penagos, C., & López-Bucio, J. (2009). Trichoderma virens , a Plant Beneficial Fungus, Enhances Biomass Production and Promotes Lateral Root Growth through an Auxin-Dependent Mechanism in Arabidopsis. *Plant Physiology*, *149*(3), 1579–1592. https://doi.org/10.1104/pp.108.130369

Contreras-Cornejo, H. A., Schmoll, M., Esquivel-Ayala, B. A., González-Esquivel, C. E., Rocha-Ramírez, V., & Larsen, J. (2024a). Abiotic plant stress mitigation by Trichoderma species. *Soil Ecology Letters*, *6*(4), 240240. https://doi.org/10.1007/s42832-024-0240-8

Contreras-Cornejo, H. A., Schmoll, M., Esquivel-Ayala, B. A., González-Esquivel, C. E., Rocha-Ramírez, V., & Larsen, J. (2024b). Mechanisms for plant growth promotion activated by Trichoderma in natural and managed terrestrial ecosystems. *Microbiological Research*, *281*, 127621. https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127621

Delgado Silva, H. D., & Gutiérrez Montoya, L. V. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, *12*(2), 2–14. https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15196

Ding, H., Li, X., Wang, S., Yang, Y., Chen, X., Chen, C., & Wang, H. (2026). Trichoderma harzianum for the control of agricultural pests: Potential, progress, applications and future prospects. *Revista Argentina de Microbiología*, *58*(1), 101–118. https://doi.org/10.1016/j.ram.2025.09.004

Druzhinina, I. S., Seidl-Seiboth, V., Herrera-Estrella, A., Horwitz, B. A., Kenerley, C. M., Monte, E., Mukherjee, P. K., Zeilinger, S., Grigoriev, I. V., & Kubicek, C. P. (2011). Trichoderma: the genomics of opportunistic success. *Nature Reviews Microbiology*, *9*(10), 749–759. https://doi.org/10.1038/nrmicro2637

El-Marzoky, A. M., Elnahal, A. S. M., Jghef, M. M., Abourehab, M. A. S., El-Tarabily, K. A., & Ali, M. A. M. S. (2023). Purpureocillium lilacinum strain AUMC 10620 as a biocontrol agent against the citrus nematode Tylenchulus semipenetrans under laboratory and field conditions. *European Journal of Plant Pathology*, *167*(1), 59–76. https://doi.org/10.1007/s10658-023-02684-1

Fadiji, A. E., Xiong, C., Egidi, E., & Singh, B. K. (2024). Formulation challenges associated with microbial biofertilizers in sustainable agriculture and paths forward. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, *3*(3). https://doi.org/10.1002/sae2.70006

FAO. (2021). *The hidden health crisis: How plant diseases threaten global food security*. https://www.fao.org/one-health/highlights/how-plant-diseases-threaten-global-food-security

FAO. (2023). *Climate change and plant health. Food and Agriculture Organization of the United Nations*. https://www.fao.org/plant-health/overview/climate-change

Ferreira, F. V., & Musumeci, M. A. (2021). Trichoderma as biological control agent: scope and prospects to improve efficacy. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *37*(5), 90. https://doi.org/10.1007/s11274-021-03058-7

Gandía, M., & Garrigues, S. (2024). Filamentous Fungi as Excellent Industrial Strains: Development and Applications. *Journal of Fungi*, *10*(8), 541. https://doi.org/10.3390/jof10080541

García-Conde, K. B., Cerna-Chávez, E., Ochoa-Fuentes, Y. M., & Velázquez-Guerrero, J. J. (2024). Aspergillus oryzae: An opportunity for agriculture. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, *42*(1). https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2302-2

Gašparović Pinto, A., Kos, T., Puškarić, J., Vrandečić, K., Benković-Lačić, T., & Brmež, M. (2024). Soil Ecosystem Functioning through Interactions of Nematodes and Fungi Trichoderma sp. *Sustainability*, *16*(7), 2885. https://doi.org/10.3390/su16072885

Gato Cárdenas, Y. (2010). Métodos de conservación y formulación de Trichoderma harzianum. *Fitosanidad*, *14*(3), 189–195.

Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Orozco-Mosqueda, M. del C., Fadiji, A. E., Hyder, S., Babalola, O. O., & Santoyo, G. (2023). Trichoderma Species: Our Best Fungal Allies in the Biocontrol of Plant Diseases—A Review. *Plants*, *12*(3), 1–35. https://doi.org/10.3390/plants12030432

Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). Trichoderma species — opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, *2*(1), 43–56. https://doi.org/10.1038/nrmicro797

Howell, C. R. (2006). Understanding the Mechanisms Employed by Trichoderma virens to Effect Biological Control of Cotton Diseases. *Phytopathology®*, *96*(2), 178–180. https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0178

Jang, S., Kwon, S. L., Lee, H., Jang, Y., Park, M. S., Lim, Y. W., Kim, C., & Kim, J.-J. (2018). New Report of Three Unrecorded Species in Trichoderma harzianum Species Complex in Korea. *Mycobiology*, *46*(3), 177–184. https://doi.org/10.1080/12298093.2018.1497792

Karlsson, M., Durling, M. B., Choi, J., Kosawang, C., Lackner, G., Tzelepis, G. D., Nygren, K., Dubey, M. K., Kamou, N., Levasseur, A., Zapparata, A., Wang, J., Amby, D. B., Jensen, B., Sarrocco, S., Panteris, E., Lagopodi, A. L., Pöggeler, S., Vannacci, G., … Jensen, D. F. (2015). Insights on the Evolution of Mycoparasitism from the Genome of

Clonostachys rosea. *Genome Biology and Evolution*, *7*(2), 465–480. https://doi.org/10.1093/gbe/evu292

Khan, M., & Tanaka, K. (2023). Purpureocillium lilacinum for plant growth promotion and biocontrol against root-knot nematodes infecting eggplant. *PLOS ONE*, *18*(3), e0283550. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283550

Kredics, L., Büchner, R., Balázs, D., Allaga, H., Kedves, O., Racić, G., Varga, A., Nagy, V. D., Vágvölgyi, C., & Sipos, G. (2024). Recent advances in the use of Trichoderma-containing multicomponent microbial inoculants for pathogen control and plant growth promotion. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *40*(5), 162. https://doi.org/10.1007/s11274-024-03965-5

Li, M., Li, J., An, Z., Wang, S., & Lai, Y. (2025). First Record of Clonostachys rosea as an Entomopathogenic Fungus of the Cephus fumipennis (Hymenoptera: Cephidae) in China. *Biology*, *14*(9), 1240. https://doi.org/10.3390/biology14091240

Manzar, N., Kashyap, A. S., Goutam, R. S., Rajawat, M. V. S., Sharma, P. K., Sharma, S. K., & Singh, H. V. (2022). Trichoderma: Advent of Versatile Biocontrol Agent, Its Secrets and Insights into Mechanism of Biocontrol Potential. *Sustainability*, *14*(19), 12786. https://doi.org/10.3390/su141912786

Martinez, Y., Ribera, J., Schwarze, F. W. M. R., & De France, K. (2023). Biotechnological development of Trichoderma-based formulations for biological control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *107*(18), 5595–5612. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12687-x

Morán-Diez, M. E., Trushina, N., Lamdan, N. L., Rosenfelder, L., Mukherjee, P. K., Kenerley, C. M., & Horwitz, B. A. (2015). Host-specific transcriptomic pattern of Trichoderma virens during interaction with maize or tomato roots. *BMC Genomics*, *16*(1), 8. https://doi.org/10.1186/s12864-014-1208-3

Mukherjee, P. K., Horwitz, B. A., Herrera-Estrella, A., Schmoll, M., & Kenerley, C. M. (2013). Trichoderma Research in the Genome Era. *Annual Review of Phytopathology*,

51(1), 105–129. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102353

Mukherjee, P. K., & Kenerley, C. M. (2010). Regulation of Morphogenesis and Biocontrol Properties in Trichoderma virens by a VELVET Protein, Vel1. *Applied and Environmental Microbiology*, *76*(7), 2345–2352. https://doi.org/10.1128/AEM.02391-09

Mukhopadhyay, R., & Kumar, D. (2020). Trichoderma: a beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, *30*(1), 133. https://doi.org/10.1186/s41938-020-00333-x

Prasad, P., Varshney, D., & Adholeya, A. (2015). Whole genome annotation and comparative genomic analyses of bio-control fungus Purpureocillium lilacinum. *BMC Genomics*, *16*(1), 1004. https://doi.org/10.1186/s12864-015-2229-2

PURWANTO, B., SUMADI, S., NURAINI, A., & SETIAWATI, M. R. (2022). Effect of water content on conidia of Trichoderma spp., indole acetic acid content, electrical conductivity, and pH. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, *23*(5). https://doi.org/10.13057/biodiv/d230536

Riaz, M., Chen, W.-H., Kafle, L., & Tseng, M.-N. (2024). Morphological and molecular characterization of Purpureocillium lilacinum along with its biopesticidal effect against fall armyworm (Spodoptera frugiperda) in Southern Taiwan. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, *34*(1), 60. https://doi.org/10.1186/s41938-024-00830-3

Rigobelo, E. C., Nicodemo, D., Babalola, O. O., & Desoignies, N. (2024). Purpureocillium lilacinum as an Agent of Nematode Control and Plant Growth-Promoting Fungi. *Agronomy*, *14*(6), 1225. https://doi.org/10.3390/agronomy14061225

Salamone, A. L., Gundersen, B., & Inglis, D. A. (2018). Clonostachys rosea , a potential biological control agent for Rhizoctonia solani AG-3 causing black scurf on potato. *Biocontrol Science and Technology*, *28*(9), 895–900. https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1498063

Santana Baños, Y., del Busto Concepción, A., González Fuentes, Y., Aguiar González, I.,

Carrodeguas Díaz, S., Páez Fernández, P. L., & Díaz Lugo, G. (2016). Efecto de Trichoderma harzianum Rifai y FitoMas-E® como bioestimulantes de la germinación y crecimiento de plántulas de tomate. *Centro Agricola*, *43*(3), 5–12. http://uclv.edu.cu

Santos, C. H. B., De Andrade, L. A., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. C. (2023). *Purpureocillium lilacinum for Biocontrol, Bioremediation and Biofertilization*. https://doi.org/10.20944/preprints202305.1926.v1

Shahriar, S. A., Islam, M. N., Chun, C. N. W., Kaur, P., Rahim, M. A., Islam, M. M., Uddain, J., & Siddiquee, S. (2022). Microbial Metabolomics Interaction and Ecological Challenges of Trichoderma Species as Biocontrol Inoculant in Crop Rhizosphere. *Agronomy*, *12*(4), 900. https://doi.org/10.3390/agronomy12040900

Sharma, K. K., & Singh, U. S. (2014). Cultural and morphological characterization of rhizospheric isolates of fungal antagonist Trichoderma. *Journal of Applied and Natural Science*, *6*(2), 451–456. https://doi.org/10.31018/jans.v6i2.481

Singh, S., Singh, A. K., Pradhan, B., Tripathi, S., Kumar, K. S., Chand, S., Rout, P. R., & Shahid, M. K. (2024). Harnessing Trichoderma Mycoparasitism as a Tool in the Management of Soil Dwelling Plant Pathogens. *Microbial Ecology*, *87*(1), 158. https://doi.org/10.1007/s00248-024-02472-2

Sun, Z.-B., Li, S.-D., Ren, Q., Xu, J.-L., Lu, X., & Sun, M.-H. (2020). Biology and applications of Clonostachys rosea. *Journal of Applied Microbiology*, *129*(3), 486–495. https://doi.org/10.1111/jam.14625

Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., & Jaroszuk-Ściseł, J. (2022). Trichoderma: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(4), 2329. https://doi.org/10.3390/ijms23042329

Urbaneja, A., Galeano Revert, M., Lara Acedo, L., & Téllez-Navarro, M. M. (2003). Efecto de Trichoderma harzianum T-22 sobre un cultivo de judía. *Agrícola Vergel: Fruticultura, Horticultura, Floricultura*, *22*(256), 249–253.

Villavicencio-Vásquez, M., Espinoza-Lozano, F., Espinoza-Lozano, L., & Coronel-León, J. (2025). Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. *Frontiers in Agronomy*, *7*. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915

Vinale, F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E. L., Marra, R., Woo, S. L., & Lorito, M. (2008). Trichoderma–plant–pathogen interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, *40*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.07.002

Woo, S. L., Hermosa, R., Lorito, M., & Monte, E. (2023). Trichoderma: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology*, *21*(5), 312–326. https://doi.org/10.1038/s41579-022-00819-5

Yao, X., Guo, H., Zhang, K., Zhao, M., Ruan, J., & Chen, J. (2023). Trichoderma and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology*, *14*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1160551

Zhang, L., Zuo, Q., Cai, H., Li, S., Shen, Z., & Song, T. (2024). Fungicides reduce soil microbial diversity, network stability and complexity in wheat fields with different disease resistance. *Applied Soil Ecology*, *201*, 105513. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105513

Zhang, X., Yang, Y., Liu, L., Sui, X., Bermudez, R. S., Wang, L., He, W., & Xu, H. (2024). Insights into the efficient degradation mechanism of extracellular proteases mediated by Purpureocillium lilacinum. *Frontiers in Microbiology*, *15*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1404439