

**Biocontrol de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* con especies de *Trichoderma* sp.: una
revisión.**

Valentina Álvarez Flórez

Asesora

Sandra Patricia Montenegro Gómez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Especialización en Biotecnología Agroambiental

Medellín 2023.

Resumen

La marchitez por *Fusarium* originada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, es la enfermedad fúngica más limitante que afecta el rendimiento y la economía del cultivo de banano en todo el mundo. Actualmente se han implementado los métodos de control como cultural, genético, biológico y químico, pero ninguno ha logrado mitigar exitosamente esta enfermedad. El biocontrol con especies del género *Trichoderma* sp. ha demostrado ser una estrategia de control eficiente frente la enfermedad; especies de este género han sido ampliamente utilizadas como microorganismos fúngicos antagónicos, para el control fitosanitario de plagas y enfermedades, y como promotores del crecimiento y defensa de las plantas. Por lo tanto, el objetivo de esta monografía fue revisar los antecedentes de la literatura sobre el control biológico de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* con *Trichoderma* sp. Para ello, se revisó el estado del arte en control biológico y enfermedades fúngicas en general, seguido de especies de *Trichoderma*. Además, se destacan algunas investigaciones emergentes desde las ciencias ómicas. Se informaron especies como “*T. asperellum*, *T. gamsii*, *T. hamatum*, *T. viride*”, entre otras especies del género *Trichoderma* spp. que han demostrado el potencial de biocontrol de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. Con base en los resultados, existe información limitada sobre estudios que evalúan el potencial de biocontrol de las especies de *Trichoderma* en el campo; la gran mayoría de investigaciones son realizadas en laboratorios e invernaderos. Por lo tanto, se justifica una mayor investigación que estudien las implicaciones, el potencial de biocontrol por el género *Trichoderma*, la biología, la diversidad genética, la patogenicidad y la virulencia de diferentes razas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* utilizando técnicas y herramientas ómicas.

Palabras claves: Banano, Marchitez por *Fusarium*, Control biológico, Antagonismo

Abstract

Fusarium wilt caused by the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, is the most limiting fungal disease affecting the yield and economics of banana cultivation worldwide. Currently, control methods such as cultural, genetic, biological and chemical have been implemented, but none have successfully mitigated this disease. Biocontrol with species of the genus *Trichoderma* sp. it has proven to be an efficient control strategy against the disease; Species of this genus have been widely used as antagonistic fungal microorganisms, for the phytosanitary control of pests and diseases, and as promoters of plant growth and defense. Therefore, the objective of this monograph was to review the background of the literature on the biological control of *Fusarium oxysporum* f sp. *cubense* with *Trichoderma* sp. For this, the state of the art in biological control and fungal diseases in general was reviewed, followed by *Trichoderma* species; In addition, some emerging research from the omic sciences is highlighted. Species such as *T. asperellum*, *T. gamsii*, *T. hamatum*, *T. viride*, among other species of the genus *Trichoderma* spp. that have demonstrated the bicontrol potential of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. Based on the results, there is limited information on studies evaluating the biocontrol potential of *Trichoderma* species in the field; the vast majority of research is carried out in laboratories and greenhouses. Therefore, further research is warranted to study the implications, biocontrol potential by the genus *Trichoderma*, biology, genetic diversity, pathogenicity, and virulence of different races of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* using omics techniques and tools.

Keywords: Banana, *Fusarium* wilt, Biological control, Antagonism.

Tabla de Contenido

Introducción	7
Marco Conceptual y Teórico	9
<i>Fusarium oxysporum</i>	9
Diferenciación de Formas Especiales para <i>F. oxysporum</i>	9
<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>	10
Enfermedad Causada por <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>	11
Colonización de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> en el Cultivo de Banano	13
Métodos de Control para el Marchitamiento por <i>Fusarium</i>	15
<i>Trichoderma</i> spp.	16
Características Morfológicas de <i>Trichoderma</i>	17
<i>Trichoderma</i> spp. como Agentes de Biocontrol	18
Actividad Biológica de <i>Trichoderma</i>	19
Micoparasitismo.	19
Competencia.	20
Antibiosis.....	20
Estudios Actuales de Biocontrol de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> con Especies de <i>Trichoderma</i> spp.	22
Avances desde las Ciencias Ómicas.....	25
Conclusiones	28
Referencias bibliográficas.....	29
Anexos	48

Lista de Tablas

Tabla 1. *Biofungicidas comerciales*48

Lista de Figuras

Figura 1. Ciclo de vida de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>ubense</i>	14
Figura 2. Micoparasitismo de <i>Trichoderma</i> spp. en la comunidad del suelo	21
Figura 3. Biocontrol de <i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>ubense</i> por <i>T. reesei</i> CSR-T-3	24

Introducción

Fusarium oxysporum f. sp. *cubense* hace parte de las formas especiales de fitopatógenos de *Fusarium oxysporum*, es el patógeno del banano y no causa enfermedad en otras plantas (Arie, 2019). El mercado mundial del banano para el año 2020 alcanzó 26.322.126 toneladas; donde Ecuador fue el mayor exportador de banano presentando el 26,7% de las exportaciones mundiales; Filipinas, Costa Rica y Colombia son los otros países principales exportadores de banano del mundo (Mordor Intelligence, 2022). Según la FAO (2016) la producción y las tierras agrícolas dedicadas al cultivo de banano han ido incrementado paulatinamente a lo largo de los años y se estima que la superficie de tierra apropiada para sembrar banano aumentará un 50 % para 2070. Por otro lado, la industria mundial del banano está gravemente amenazada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* debido a la facilidad de propagación de la enfermedad (García-Bastidas et al., 2019; Li et al., 2011; Ordoñez et al., 2015; Ordoñez R, 2018; Zheng et al., 2018). Por lo tanto, es una de las enfermedades mundiales más destructivas, por lo que ha atraído la atención y la preocupación de los investigadores (Zhang et al., 2018).

Tradicionalmente las formas de control para *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* implementadas son cultural, químico, biológico y genético. El control más reconocido es el químico, un método económico, pero no efectivo para su gestión adecuada y no es respetoso con el medio ambiente (Ismaila et al., 2022). Por lo tanto, el método de control biológico se convierte en una estrategia de producción agrícola muy valiosa, ya que reduce la liberación de fungicidas de componentes químicos que contaminan y degradan el ecosistema, por lo que el control biológico garantiza prácticas sostenibles y no afecta el medio ambiente. La agricultura sostenible requiere el mantenimiento de procesos biológicos mediados por la comunidad microbiana del suelo que son importantes para el control y manejo de enfermedades. Sin embargo, el

monocultivo es una realidad para la mayoría de los cultivos hoy en día, lo que resulta en una reducción de la diversidad de la comunidad microbiana del suelo, lo que puede provocar enfermedades fúngicas más graves. Por lo tanto, el mantenimiento de la comunidad microbiana es fundamental para lograr el biocontrol de las enfermedades fúngicas.

Actualmente, la investigación científica reporta varios microorganismos capaces de un control biológico efectivo de los patógenos limitantes de las plantas. Alrededor del 90% de las especies de hongos utilizadas para el control biológico de microorganismos patógenos pertenecen a varias cepas del género *Trichoderma* (Hermosa et al., 2012). Según informes, más del 60% de los biofungicidas efectivos en el mundo provienen de *Trichoderma* (Abbey et al., 2018). Varias especies de *Trichoderma* han sido clasificadas como microorganismos potenciales para el control biológico de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* dentro de estas *T. asperellum*, *T. gamsii*, *T. hamatum*, entre otras especies del género, son propicias para el biocontrol de la enfermedad e inducir resistencia a la planta (Sánchez-Espinosa et al., 2021; Sudantha, 2021; Taribuka et al., 2017). Los resultados de estos estudios indican la capacidad de las especies de *Trichoderma* para controlar biológicamente la marchitez del banano. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue revisar el estado del arte sobre el control biológico de *Fusarium oxysporum* f. sp. *ubense* con especies de *Trichoderma* sp y, además, destacar algunas investigaciones emergentes desde las ciencias ómicas.

Marco Conceptual y Teórico

Fusarium oxysporum

Fusarium es un género fúngico perteneciente al filo Ascomycota, subfilo Pezizomycotina, clase Sordariomycetes, orden Hypocreales y familia Nectriaceae (Leslie & Summerell, 2006). Este género causa el marchitamiento por *Fusarium*. En particular, se ha informado sobre *Fusarium oxysporum*, un hongo cosmopolita con varias formas patógenas diferentes (Bosland, 1988, Garces et al., 2001). *F. oxysporum* se encuentra en el ecosistema del suelo, lo que lo convierte en un habitante natural del sistema radical de las plantas hospederas. La mayoría de las cepas descritas son saprofitas con capacidad de sobrevivir en materia orgánica; aunque algunas son fitopatógenos y penetran en el sistema radicular de la planta hospedera provocando enfermedades al bloquear el sistema vascular (Fravel et al., 2003). Dentro de algunas de las especies de cultivos afectadas por *F. oxysporum* se encuentra *Musa* spp. L. (banano), *Solanum lycopersicum* L. y *Cucumis melo* L., entre otras (Michielse & Rep, 2009).

El hongo *Fusarium oxysporum* se destaca por varias características, dentro de estas se encuentra su larga historia de reproducción asexual predominante, quizás exclusiva (Gordon & Martyn, 1997). En general, tiene una alta especificidad para determinar plantas hospederas (Ploetz, 2006), lo que permite caracterizar alrededor de 150 formas específicas y razas fisiológicas (Edel-Hermann & Lecomte, 2019; Gordon, 2017); por ejemplo: *F. oxysporum* f. sp. *cubense* (Ploetz, 2015), *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Marín-Serna et al., 2014), *F. solani* f. sp. *passiflorae* (Ángel García et al., 2018), entre otras.

Diferenciación de Formas Especiales para *F. oxysporum*

Debido a que *F. oxysporum* causa enfermedades en una variedad de plantas, los estudios han demostrado que *F. Oxysporum* tiene una subestructura filogenética compleja, lo que sugiere

varias especies crípticas dentro de este género fúngico (Gordon & Martyn, 1997; Laurence et al., 2014). Las formas especiales de *F. oxysporum* son específicas de sus plantas hospederas (Jenkins et al., 2021). Por ejemplo, los aislamientos que causan la marchitez del tomate se han identificado como f. sp. *lycopersici*, y esta forma nunca causa enfermedad en las otras especies de plantas. Del mismo modo, *F. cubense*, afecta a cultivares de banano, no a otro tipo de planta (Arie, 2019).

Debido a los amplios límites morfológicos de esta especie, se ha convertido en una práctica común en la taxonomía de *Fusarium oxysporum* utilizar el término formas especiales como una jerarquía de subespecies (Leslie & Summerell, 2006). También se han introducido sistemas de clasificación subespecíficos adicionales para las formas especiales de *F. oxysporum*, que incluyen razas (Lombard et al., 2019). Las razas de *F. oxysporum* reflejan variación de la virulencia dentro de las formas especializadas, reveladas por interacciones diferenciales con otros genotipos del huésped, a veces asociados a genes de resistencia conocidos (Edel-Hermann & Lecomte, 2019). Por ejemplo, de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* se han informado tres razas, 1, 2 y 4, la raza tropical 4 es una de las razas económicamente más limitante, que está especializada para infectar ciertos los cultivares de banano.

Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense

F. oxysporum f. sp. *cubense* (*Foc*, en adelante) origina el marchitamiento vascular (Groenewald, 2006), es un hongo filamentoso habitante del suelo; el cual, presenta tres tipos de esporas asexuales; macroconidios, microconidios y clamidosporas, para dispersarse y sobrevivir (Guo et al., 2014, p 1). Los macroconidios y microconidios se producen en la superficie de las raíces y los pseudotallos de las plantas de banano y son importantes como inóculo secundario (Ding et al., 2020). Las clamidosporas son esporas formadas por la condensación del contenido

de hifas de paredes gruesas y conidios (Mainato-Quizhapilema & Siranaula-Orellana, 2021), lo que les permite permanecer en el suelo por mucho tiempo y es importante como inóculo primario (Garces et al., 2001; Waite & Dunlap, 1953). Gracias a las esporas de paredes gruesas, el hongo puede sobrevivir saprofitamente en el medio ambiente incluso en ausencia de condiciones favorables y plantas huésped.

Se ha documentado a lo largo de los años que *Foc* es un patógeno fúngico muy diverso, del que se han descrito cuatro razas: la raza 1, afecta a los cultivos de Gros Michel y Manzano (AAB); la raza 2, ataca a las variedades ABB, conocidas como Guineo, Cuadrado, Topocho y Chatos; la raza 3, a heliconias (*Heliconia L.*) y la raza 4, a cultivares susceptibles a las razas 1, 2 y del tipo Cavendish (Hennessy et al., 2005; Ploetz, 2015). La raza 4 identifica raza tropical (RT4) y subtropical (ST4), ambas pertenecientes a diferentes grupos de fitocompatibilidad; la primera causa enfermedades tanto en los trópicos como en los subtrópicos, mientras que la segunda solo causa enfermedades en los subtrópicos (Belgrove et al., 2011). En 2019 Maryani et al., sugirieron considerar *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Raza 4 (*Foc* TR4, en adelante) como una especie distinta llamada *Fusarium odoratissimum*. Sin embargo, esta propuesta ha sido cuestionada por Torres et al., (2021) quienes, con base a sus resultados, argumentan que estos cambios son prematuros e insuficientemente fundamentados (Bragard et al., 2022). Las razas 1 y 4 son las de mayor interés económico y de investigación a nivel mundial debido a su dificultad de control y alta patogenicidad.

Enfermedad Causada por Fusarium oxysporum f. sp. cubense

El marchitamiento por *Fusarium* es la enfermedad fúngica más limitante y hasta la fecha incontrolable dentro del cultivo de banano, por lo cual, continúa amenazando la producción de banano a nivel mundial (Ordoñez et al., 2015; Ploetz, 2015). La propagación de esta enfermedad

está asociada con el intercambio de diversos materiales vegetales infectados durante la siembra. Las primeras afectaciones reportadas por este hongo en el cultivo de banano se datan en la década de los ochenta con la afectación de los cultivos de la variedad Gros Michel por la raza 1 del hongo en el país australiano. Sin embargo, algo favorable para esta época la variedad Cavendish demostró una resistencia a la raza 1, por lo cual, reemplazaron las plantaciones de Gros Michel en Australia y también en el comercio estadounidense y africano. Según datos históricos, el marchitamiento por *Foc* se reportó inicialmente en Australia, pero se estima que este hongo posiblemente evolucionó con el cultivo de banano en el sudeste asiático (Ploetz, 2015).

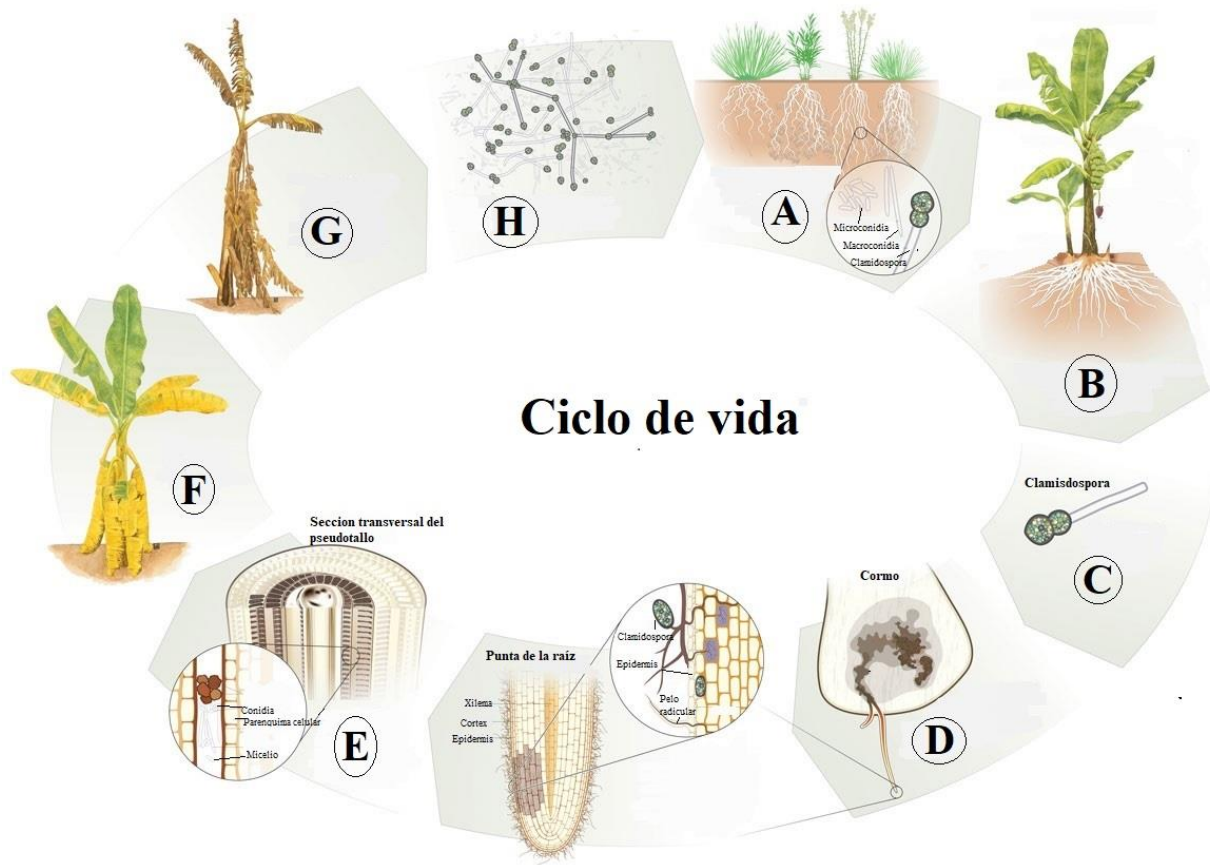
En la década de 1990, se hizo evidente la nueva raza tropical 4 (TR4) (Ploetz, 2006) y en períodos posteriores, TR4 se desarrolló rápidamente, primero en el sudeste asiático, pero más recientemente en África y Asia occidental; luego en algunas regiones de los países de Australia, China, Indonesia, Jordania, Líbano, Malasia, Mozambique, Omán, Pakistán, Filipinas, Taiwán (Butler, 2013; Ordoñez et al., 2015; Ploetz, 2015) y Colombia (ICA, 2019).

Principalmente en los cultivos de Musáceas y Heliconias en el país de Colombia siempre han estado presentes las tres primeras razas patógenas controladas de forma, legal, cultural, biológica y químicamente. Sin embargo, en 2019, el ICA confirmó el ingreso de TR4 en la provincia de la Guajira, en el municipio de Riohacha y Dibulla; pero la raza aún no afectado en el resto del país (ICA, 2019). Por ello, se implementó el desarrollo de capacitaciones en el país para evitar la propagación de la TR4 como estrategia de control y concientizar sobre la problemática que puede causar en los cultivos de banano.

Colonización de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* en el Cultivo de Banano

Los síntomas de la enfermedad del marchitamiento por *Fusarium* del banano están determinados por el amarillamiento y el debilitamiento característico de la planta. *Foc* se considera una forma hemitrófica porque el patógeno forma una relación biotrófica con el huésped durante la infección inicial, y cuando continúa esta relación como forma necrotrófica, provoca la muerte de los tejidos del huésped (Ploetz, 2015; Zhang et al., 2018). Generalmente, el ciclo de vida del hongo comienza con la invasión del patógeno a través de raíces secundarias o terciarias o raíces muertas o dañadas, y la invasión no ocurre a través de raíces primarias, ni por el cormo a menos que presenten daños mecánicos. Luego, el hongo pasa al cormo en el cual se desarrolla con gran rapidez y continúa al pseudotallo e invade los vasos del xilema. Una vez en el xilema, produce conidios que se ubican en los haces vasculares, creando nuevas áreas de infección, provocando obstrucciones, lo que reduce el movimiento de agua y nutrientes, como se muestra en la figura 1. En las últimas etapas de la enfermedad, el hongo crece fuera del sistema vascular y origina numerosas conidios y clamidosporas; estas vuelven al suelo cuando la planta muere y persiste latente por más de 20 años (Pérez- Vicente et al., 2014).

Según los informes de la literatura, se ha encontrado que el proceso de colonización en Gros Michel continúa indefinidamente, mientras que la invasión en los cultivares Cavendish se evita mediante la acumulación de gel durante las primeras 24 a 48 horas, seguida por el desarrollo de parénquima vascular que impide cualquier colonización adicional (de Ascensao & Dubery, 2000). La colonización está determinada en gran medida por el tipo de variedad de cultivo, que determina la entrada del patógeno en la planta.

Figura 1.Ciclo de vida de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*

Nota. “(A) clamidosporas, microsporas y macroesporas que se encuentran en el suelo o en huéspedes alternativos como las malas hierbas; (B) introducción del patógeno al material vegetal sano; (C) las clamidosporas germinan en respuesta a los exudados de las raíz; (D) la infección ingresa intracelularmente a las puntas de las raíces secundarias o terciarias; (E) en el pseudotallo el micelio fúngico, junto con las tálides son producidos por la planta como defensa; (F) el bloqueo de los vasos del xilema provoca estrés hídrico y marchitamiento; (H) todo el sistema vascular de la planta colonizado por el hongo, que invadió el parénquima y los tejidos corticales producen abundantes clamidosporas y las cuales retornan al suelo” . Imagen adaptada de (Pembroke graphics, n.d.)

Métodos de Control para el Marchitamiento por *Fusarium*

El marchitamiento por *Fusarium* es difícil de controlar por varias razones: primero, es un patógeno persistente del suelo (se estima que dura más de 20 años) incluso en ausencia de plantas hospedantes (Buddenhagen, 2009). Además puede sobrevivir en hospedantes alternativos que no expresan los síntomas del marchitamiento (Hennessy et al., 2005). En segundo lugar, como es una enfermedad que afecta el sistema vascular, los métodos de control tienen contacto con el hongo después de ingresar a la planta. Tercero, puede dispersarse por el material de propagación vegetativo del banano, tierra esparcida por trabajadores y máquinas, agua de riego, animales y artesanías. Finalmente, la cuarta razón es la expansión del monocultivo, en especial de la variedad Cavendish, que favorece la propagación del patógeno (Dita et al., 2018). La expansión del monocultivo es una de las mayores limitantes porque elimina las barreras biológicas que impiden su rápida propagación del patógeno en los cultivos, así como degrada la comunidad microbiana, que es un factor clave en su control.

Inicialmente, se tomaron medidas preventivas para combatir la enfermedad, como la aplicación de fungicidas químicos al suelo para reducir la propagación del patógeno, pero estos químicos crearon problemas para el medio ambiente y las personas, además el hongo adquiere resistencia a los fungicidas de síntesis química (Ramu et al., 2016). Debido a los efectos nocivos de los fungicidas, se han implementado métodos como el control biológico, el desarrollo de variedades resistentes mediante mejoramiento por mutación, métodos transgénicos y cisgénicos, cultivo de protoplastos e hibridación somática para generar los nuevos tipos de materiales, la selección *in vitro* y la variación somaclonal se han convertido en mejores opciones, que la aplicación de químicos (Chen et al., 2011; Dale et al., 2017; Mohandas et al., 2013; Raza et al., 2017; Subramaniam et al., 2006; Sun et al., 2013; Z. Wang et al., 2015; Wu et al., 2010). Otros

métodos de control como el uso de enmiendas orgánicas (Moore et al., 1995), la rotación de cultivos y el cultivo intercalado (H. Zhang et al., 2013), el uso de biofumigación y solarización de suelo (Azkolain, 2016); han sido utilizados para controlar la enfermedad, pero aún sigue siendo un desafío.

Los métodos actuales de control químico no pueden neutralizar eficazmente los efectos de la enfermedad. Las acciones efectivas tomadas hasta ahora incluyen el uso de áreas de siembra que no han estado expuestas al hongo, el uso de semillas sanas y variedades resistentes a la enfermedad, y la implementación de las buenas prácticas agrícolas de forma integral con el control biológico. El control biológico incluye microorganismos bacterianos y fúngicos antagonistas que son efectivos contra el patógeno (Raza et al., 2017). Entre los posibles géneros de hongos antagonistas para el control biológico, se destaca *Trichoderma* sp. especialmente para el manejo de enfermedad fúngica del marchitamiento *Fusarium* (Thambugala et al., 2020).

***Trichoderma* spp.**

Trichoderma es un género de hongos filamentosos perteneciente al Reino: Fungi; Phylum: Ascomycota; Subfilo: Pezizomycotina; Clase: Eu-ascomycetes o Sordariomycetes; Orden: Hypocreales; Familia: Hypocreaceae, contiene varias especies (Pandey et al., 2021). La primera descripción genérica real e identificación sistemática de especies de *Trichoderma* fue propuesta por Rifai, (1969), en base a las características de la tasa de crecimiento de las colonias y las características observadas al microscopio, es decir, el patrón de ramificación del conidióforo y la morfología del conidio (Pandey et al., 2021).

Trichoderma spp. simbolizan uno de los géneros de hongos más significativos para la humanidad y en ambientes naturales (Li et al., 2021). Las especies pertenecientes del género *Trichoderma* son invasoras oportunistas con rápido crecimiento, reproducción asexual y esporulación (Pandey

et al., 2021). Se caracterizan por ser hongos saprofitos, capaces de sobrevivir en suelos con contenido variable de materia orgánica, y bajo ciertas condiciones, pueden ser anaerobios facultativos, lo que les permite mostrar una mayor plasticidad ecológica. *Trichoderma* se encuentra en todas las latitudes, desde las regiones polares hasta las ecuatoriales. Esta amplia distribución y su plasticidad ecológica están estrechamente relacionadas con su alta capacidad enzimática para degradar sustratos, metabolismo multifuncional y resistencia a inhibidores microbianos (Infante et al., 2009).

Los hongos del género *Trichoderma* son simbioses que ejercen un efecto positivo sobre las plantas. Sus especies son ampliamente estudiadas para el tratamiento de enfermedades de las plantas, principalmente por su actividad antagonista y micoparasitaria (Dugassa et al., 2021; Hermosa et al., 2012; Khan & Panda, 2007). Conjuntamente, pueden mejorar la absorción de nutrientes de las plantas (Harman et al., 2004) y mejorar el crecimiento y la actividad biológica de las planta hospedantes (la Spada et al., 2020; Shoresh et al., 2010) . Además, han sido investigadas para el manejo del estrés biótico y abiótico, potenciadores del crecimiento de cultivos, producción y usos industriales de enzimas y antibióticos, en la biología molecular, cultivos modificados genéticamente, metabolizadores de xenobióticos y biofungicidas comerciales, entre otros (Pandey et al., 2021).

Características Morfológicas de Trichoderma

Las cepas de *Trichoderma* se pueden identificar por características morfológicas comunes por su pigmento conidial verde brillante, tienen un crecimiento rápido y se ramifican repetidamente (Zin & Badaluddin, 2020). El crecimiento de *Trichoderma* cultivado en medios como PDA se identifica fácilmente porque produce numerosas conidias de color verde a blanco adheridos a filídes ubicadas en conidióforos abundantes (Samuels, 1996). Los conidióforos son muy

ramificados, dispuestos irregularmente en verticilos, aparecen como grupos de fiálides divergentes, generalmente dobladas asimétricamente, en forma de matraz o cilíndrica a subglobosa. Las conidias son elipsoidales a globosas, 3-5 a 2-4 μm de diámetro, generalmente verdes, a veces hialinas para agruparse en agregados en la terminal de las fiálides (Pandey et al., 2021; Zin & Badaluddin, 2020).

Trichoderma spp. como Agentes de Biocontrol

El control biológico mediante microorganismos antagónicos se considera una alternativa a los tratamientos químicos existentes y un componente clave en el surgimiento de una agricultura respetuosa con el medio ambiente que inhiba los hongos fitopatógenos. Las especies del género *Trichoderma* sp. son bioagentes con gran potencial en el tratamiento de diversas enfermedades, porque han demostrado una excelente acción de biocontrol. Han sido estudiados desde 1930, realizando aplicaciones a pequeñas escalas en el sustrato del suelo y en las semillas, evaluando su efectividad (Harman, 1991; Weindling, 1934).

Los mecanismos de control biológico ejercidos por *Trichoderma* sobre los hongos fitopatógenos, incluida la competencia por el espacio y los nutrientes, el micoparasitismo y la antibiosis, controlan directamente a los hongos patógenos (Lorenzo, 2004). Esto se debe a la capacidad de los aislados de *Trichoderma* para colonizar la rizosfera de las plantas, y así simultáneamente estimular a las plantas a producir metabolitos secundarios, incluidos compuestos de bajo peso molecular que inducen la expresión de genes involucrados en la respuesta de defensa contra el patógeno (Hermosa et al., 2012; Malmierca et al., 2015; Sood et al., 2020). *Trichoderma* también posee otros mecanismos biorreguladores indirectos que provocan modificaciones morfológicas y bioquímicas de las plantas hospedantes y se cree ampliamente que aumentan la resistencia de las

plantas al estrés a través de la resistencia sistémica y el aumento del crecimiento de las raíces (Abdelrahman & Jogaiah, 2019; Silva et al., 2019; Viterbo et al., 2002).

Actividad Biológica de Trichoderma

El principal mecanismo de acción de *Trichoderma* es el antagonismo microbiano, que es el resultado de la interacción directa entre dos microorganismos involucrados en el mismo nicho ecológico. Se han caracterizado tres tipos principales: Micoparasitismo, competencia por nutrientes o tejidos vegetales y antibiosis (Alabouvette et al., 2009).

Micoparasitismo. El mecanismo más directo por el cual *Trichoderma* combate los hongos fitopatógenos es una interacción llamada micoparasitismo, que es la forma más efectiva de reducir el inóculo de patógenos, especialmente que se encuentran en el suelo. Este proceso está regulado e implica la activación de vías de transducción de señales que conducen a la activación o represión transcripcional de varios genes (Karlsson et al., 2017). Inicialmente, para desarrollar la interacción, *Trichoderma* detecta y es atraído por el hongo patógeno, posiblemente por quimiotropismo (Viterbo & Horwitz, 2010). Luego, del reconocimiento específico del hongo huésped, y posteriormente sucede la unión y enrollamiento alrededor de las hifas del patógeno, y comienzan la liberación de enzimas que degradan la pared celular (quitinasas, β -1,3-glucanasas) (Macías-Rodríguez et al., 2020; Poveda, 2021; Vinale et al., 2008; Yang, 2017) (Figura 2). El ataque químico y la degradación de la pared celular del patógeno por parte de las enzimas hidrolíticas y los compuestos antifúngicos producidos por *Trichoderma* es la última etapa de la interacción micoparásita, que finalmente conduce a la muerte del huésped (Mukherjee et al., 2012; Seidl-Seiboth et al., 2014).

La señalización específica de la superficie celular mediada por lectinas asociadas con el hongo huésped es la principal responsable de la unión y enrollamiento de *Trichoderma* alrededor de las

hifas del patógeno (Zeilinger & Omann, 2007). Durante la interacción micoparásita, los hongos patógenos responden al ataque produciendo metabolitos secundarios, enzimas y ROS, pero el hongo micoparásito exitoso debe ser capaz de responder a este contraataque (Druzhinina et al., 2011). Aunque, este mecanismo de *Trichoderma* no se limita a afectar las hifas patógenas del huésped, estos hongos pueden utilizar mecanismos de biocontrol adicionales al actuar sobre las conidias del patógeno.

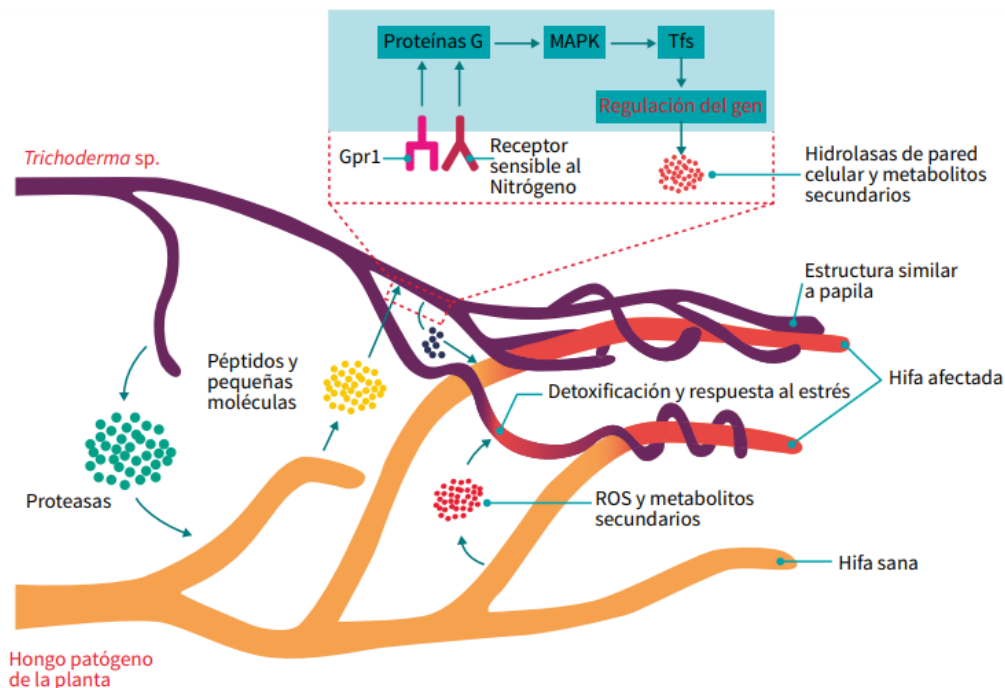
Competencia. La competencia por los nutrientes y el espacio es uno de los modos de acción clásicos del control biológico de *Trichoderma*. Es un fenómeno general que rige la dinámica de población de microorganismos que habitan en el mismo nicho ecológico y comparten los mismos requerimientos fisiológicos bajo limitaciones de recursos (Alabouvette et al., 2009). La competencia por los nutrientes, especialmente por el carbono, es frecuente en un medio oligotrófico como el suelo, y se considera responsable del conocido fenómeno de la fungistasis (Boer et al., 2003), el cual consiste en la inhibición de la germinación de esporas de hongos en el suelo. Otra forma en que los antagonistas limitan la entrada de los patógenos, es a través de la competencia por la colonización de los tejidos vegetales y las superficies de las raíces.

Antibiosis. En la antibiosis, el hongo antagonista libera toxinas o compuestos antimicrobianos que inhiben el metabolismo y el crecimiento de los hongos patógenos (Ram et al., 2018; Schirmbock et al., 1994; Verma et al., 2007). Estos metabolitos contienen compuestos volátiles y no volátiles que previenen la colonización de patógenos. *Trichoderma* produce tres tipos de metabolitos secundarios, incluidos; antibióticos volátiles (6-pentil-a-pirona), compuestos solubles en agua (ácido heptelídico o ácido koníngico), peptaibols (oligopéptidos lineales de hasta 22 aminoácidos de longitud) (Mukherjee et al., 2012; Zeilinger et al., 2016). Además, otros

metabolitos como el ácido harziánico, las alameticinas y la viridina. La capacidad antagónica de los metabolitos varía según el comportamiento de virulencia del patógeno diana (Asad, 2022).

Figura 2

“ Micoparasitismo de *Trichoderma spp.* en la comunidad del suelo”



Nota. *Trichoderma* reconoce un hongo patógeno por las pequeñas moléculas que son liberadas como por péptidos. Estas moléculas se pueden unir a receptores acoplados a proteína G o receptores de detección de nitrógeno en la superficie, lo que desencadena una cascada de señalización que consiste en proteínas G y quinasas activadas por mitógenos (MAPK), que finalmente regulan los factores de transcripción (TF). Estos factores luego aumentan la biosíntesis de metabolitos secundarios y la lisis de la pared celular. Al mismo tiempo, los patógenos reaccionan produciendo metabolitos secundarios y especies reactivas de oxígeno (ROS), que desencadenan respuestas de estrés y desintoxicación de *Trichoderma*. Adaptado de Druzhinina et al., (2011)

Estudios Actuales de Biocontrol de *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* con Especies de *Trichoderma* spp.

La investigación respalda el control biológico con hongos antagónicos como una alternativa eficaz para el manejo de patógenos fúngicos, cuya colonización endofítica no solo suprime los patógenos sino que también estimula la resistencia de la planta huésped inducida sistémicamente (Sood et al., 2020). Varios estudios han demostrado los beneficios del uso de *Trichoderma*. En el control biológico, como la ubicuidad; rápida colonización del suelo y rápido crecimiento en varios sustratos (Al-Ani, 2018). Características que han propiciado el interés investigativo para ser implementado con biocontroladores de *Foc*.

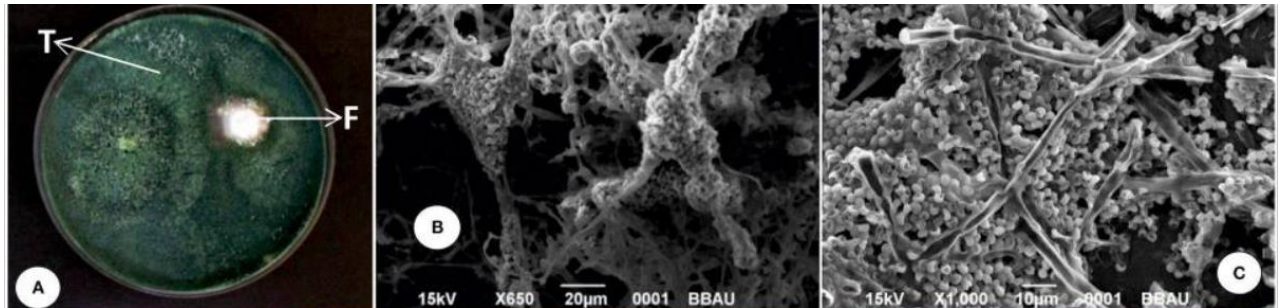
Si bien durante mucho tiempo se ha sostenido que el marchitamiento por *Fusarium* es una enfermedad fúngica importante de muchos cultivos, principalmente en el banano, que causa enormes pérdidas económicas (Wang et al., 2022), varios estudios científicos han demostrado que el marchitamiento por *Fusarium* se puede controlar utilizando aislados de *Trichoderma*, ayuda a reducir el crecimiento y desarrollo del patógeno. Se ha informado varios aislamientos con capacidades de biocontrol frente a *Foc*, Sudantha, (2021) encontraron seis aislamientos del hongo endófito *Trichoderma* spp. que son eficaces para suprimir el crecimiento del hongo *Foc* las cuales son; *T. harzianum*, *T. koningii*, *T. aureoviride*, *T. hamatum*, *T. viride* y *T. piluliferum*. De igual forma, otro estudio reportó que especies como *T. asperellum* PRR2 trabajando junto con *Trichoderma* sp. NRCB3 puede reducir la incidencia del marchitamiento por *Fusarium* del banano en un 47 % en función de las características que promueven el crecimiento de la planta y la inhibición de la germinación de esporas y el crecimiento de *F. oxysporum* (Thangavelu & Gopi, 2015).

El éxito del biocontrol de *Trichoderma* depende de la correcta identificación de las cepas potenciales y su uso en el campo (Chaves et al., 2011). Por lo tanto, el aislamiento y detección de microorganismos efectivos es la base del control biológico. Damadaran et al., (2020) evaluaron la eficacia de tres aislados de *Trichoderma* extraídos de la rizosfera de ecosistemas estresados por factores bióticos y abióticos, que tienen el potencial de inhibir el patógeno *Foc* TR4, además buscaban descifrar el modo de acción antifúngico en la supresión de la enfermedad a través de expresión génica y análisis LC-MS. Dentro de los resultados de la investigación se destacó el aislado *T. reesei* (CSR-T-3) que demostró una eficacia de manera *in vitro* de 85,19% de porcentaje de inhibición frente a la raza 4, indicando su alta capacidad antagónica frente al patógeno como se ilustra en la Figura 3 (Damodaran et al., 2020). Al igual que estos, estudios realizados en años anteriores han reportado la diversidad de especies de *Trichoderma* spp. como biocontroladores de *Foc* para sus diferentes razas patogénicas (Akila et al., 2011; Asad, 2022; Damodaran et al., 2020; Gui et al., 2020; Kovács et al., 2021; Sood et al., 2020; Taribuka et al., 2017).

Trichoderma representa es el género fúngico con mayor potencial de control biológico. Según Rush et al., (2021) las especies de *Trichoderma* representan del 50% al 60 % de los agentes de control biológico fúngico. Actualmente existen al menos 77 biofungicidas comerciales a base de *Trichoderma* que están disponibles en el mercado mundial (Anexo 1) (CABI, 2020; ICA, 2021; Kovács et al., 2021; Thambugala et al., 2020b; Tyśkiewicz et al., 2022). En formulaciones comerciales, las cepas que se ha informado que tienen mayor capacidad de biocontrol del marchitamiento por *Fusarium* en banano son; “*T. asperellum*, *T. gamsii*, *T. hamatum*, *T. viride*” (Sánchez-Espinosa et al., 2021; Sudantha, 2021; Taribuka et al., 2017).

Figura 3

“Biocontrol de *Fusarium oxysporum f. sp. cubense* tropical raza 4 (Foc TR4) por *Trichoderma reesei* CSR-T-3”



Nota. “(A) Ensayo de cultivo dual *in vitro* que muestra la inhibición de Foc TR4 (F) por el aislado *Trichoderma reesei* (CSR-T-3) (T). (B) y (C) Micrografía electrónica de barrido del micoparasitismo del aislado de *Trichoderma reesei* CSR-T-3 en el micelio Foc TR-4”. Imagen tomada de Damodaran et al., (2020)

En Colombia se encuentran disponibles varias formulaciones a base de *Trichoderma* de diferentes fabricantes, entre los que destaca el biofungicida Tricotec® WG desarrollado por Agrosavia. Se basa en el hongo antagonista *T. koningiopsis* cepa Th003 (1×10^9 conidias/g), cuenta con registro ICA #12164, para los cultivos de tomate, lechuga, arroz, fresa, mora, frambuesa, arándano, uva, brevo, rosas, ornamentales y papa, aunque no se ha reportado cultivo de banano. Según el fabricante, en este tipo de cultivos puede disminuir entre un 31% y un 60% la incidencia de las enfermedades causadas por *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *S. minor*, *Botrytis cinerea* y *Rhizoctonia solani*. Las actividades de control biológico las logran a través de mecanismos de acción como competencia, lisis, micoparasitismo, inducción de resistencia, y estimulación del crecimiento (Moreno Velandia et al., 2020).

El potencial de biocontrol de las especies de *Trichoderma* contra el patógeno *Foc* ha impulsado la necesidad de desarrollar y comercializar biofungicidas con concentraciones apropiadas y

efectivas para el control biológico de patógenos fúngicos que se encuentran principalmente en el suelo. En síntesis, la mayoría de los artículos analizados realizan estudio de las cepas con características prometedoras de biocontrol principalmente a nivel de laboratorio *in vitro* o bajo condiciones de invernadero, son pocos los estudios que evalúan las potencialidades de control biológico en campo. Además, todavía se necesita más investigación para comprender la fisiología del patógeno y sus factores de virulencia, conjuntamente de que la diversificación y expansión del genoma del banano, son estrategias que pueden contribuir a superar la desastrosa enfermedad (Raman et al., 2021).

Avances desde las Ciencias Ómicas

En cuanto a las estrategias de biocontrol desde el punto de vista de las ciencias ómicas, ha sido posible realizar estudios que ayuden a comprender la complejidad de las cepas de *Trichoderma* utilizando métodos de investigación que incluyen genómica, transcriptómica, proteómica, metabolómica y otras ciencias ómicas. De esta manera, los científicos están haciendo todo lo posible para estudiar la biología, la diversidad genética, la patogenicidad y la virulencia de las diferentes razas de *Foc* utilizando técnicas y herramientas ómicas. En este contexto, los investigadores utilizan una variedad de enfoques ómicos de alto rendimiento, incluida la genómica, que estudia los aspectos estructurales y funcionales de los genes, la transcriptómica, que cuantifica las transcripciones de ARNm, la proteómica, que analiza la composición de proteínas y la metabolómica, se ocupa del análisis de metabolitos celulares mediante la identificación y la cuantificación (Singh et al., 2022; Swarupa et al., 2016).

Se ha estudiado el genoma de *Trichoderma* y se ha demostrado que contiene muchos genes útiles, así como metabolitos y mecanismos moleculares que respaldan la función del hongo tanto externamente (micoparásitos, antimicrobianos, degradación de toxinas) como internamente en

las plantas (aumento de la resistencia, mayor eficiencia fotosintética, promoción del crecimiento y desarrollo, etc.), que permiten que estos hongos se adapten a muchos entornos diferentes.

Además, los datos metabolómicos y proteómicos se han utilizado directamente para mejorar la eficacia de estos microorganismos y facilitar su implementación en el manejo de cultivos (Lorito et al., 2010). Los estudios ómicos sobre *Trichoderma* se consideran investigaciones exitosas, ya que ayudan a proporcionar ingredientes con mejores principios activos para productos comerciales, que presentan mayores capacidades de biocontrol.

Entre las técnicas ómicas, la proteómica es de particular interés en la investigación sobre *Foc* porque es una técnica poderosa que permite el análisis a gran escala de la producción de proteínas, proporcionando una visión de todo el sistema de las reacciones moleculares de un organismo (Grinyer et al., 2004; Marra et al., 2006). Las diferencias obtenidas a partir de estudios de proteínas entre cepas patógenas de las razas de *Foc* se utiliza para distinguir entre factores de patogenicidad o virulencia únicos y compartidos (Raman et al., 2021). En una investigación realizada por Raman et al., (2021) compararon el proteoma de las dos cepas patógenas de *Foc* la raza 1 (*Foc* R1) y la raza tropical 4 (*Foc*TR4), los resultados del estudio mostraron que una comparación de los proteomas de *Foc* R1 y *Foc* TR4 22 de las 25 proteínas eran exclusivas de *Foc* R1 y las 3 restantes fueron abundantes en *Foc* TR4. Además, los resultados experimentales muestran que el silenciamiento de MAPK (cascada de proteína quinasa activada por mitógenos) en *Fusarium oxysporum* reduce las funciones patogénicas potenciales, como el crecimiento de hifas en la interfaz líquido-aire, la colonización del huésped y las enzimas que degrada la pared celular (di Pietro et al., 2004).

La expresión génica en banano en respuesta a la infección por *Foc* puede proporcionar información importante sobre los genes de plantas relacionados con la defensa contra la

enfermedad. Además, existen unas variedades de cultivares de banano resistente a las raza 1 y la raza 2 de *Foc*, que pueden permitir examinar desde estudios proteómicos, metagenómicos y transcriptómicos los perfiles de expresión génica de *Foc* en los cultivares de banano resistentes y susceptibles, proporcionando información sobre los mecanismos de resistencia que podrían aprovecharse para el desarrollo de estrategias de biocontrol para el marchitamiento por *Fusarium* (Kaushal et al., 2021).

Los enfoques multiómicos (genómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica) brindan información sobre los mecanismos moleculares y las interacciones entre los microorganismos con las plantas (Bell et al., 2014). Sin embargo, los estudios que utilizan enfoques multiómicos para estudiar las interacciones planta-microorganismos que emplea enfoques ómicos múltiples es aún escasa. Además, las interacciones entre los microorganismos y las plantas no pueden entenderse por completo utilizando una sola ciencia ómica, por lo que abordar el complejo fenómeno de las interacciones planta-microorganismo requiere el uso combinado de varias ciencias multiómicas (Manzar et al., 2022).

Conclusiones

La capacidad antagónica de biocontrol de las especies de *Trichoderma* frente a *F. oxysporum* f. sp. *cubense* se logra mediante sus mecanismos biológicos de micoparasitismo, competencia por nutrientes o tejidos vegetales y antibiosis. Una gran cantidad de estudios científicos convergen resaltando el efecto positivo que tienen las propiedades antifúngicas de especies del género *Trichoderma* como “*T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. koningii*, *T. aureoviride*, *T. hamatum*, *T. reesei*, *T. viride*, *T. gamsii* y *T. piluliferum*” para el biocontrol de la marchitez por *Fusarium*, principalmente en pruebas *in vitro*. Este agente de biocontrol ha demostrado tener un buen efecto sobre el rendimiento, supresión del patógeno y aumento del sistema de defensa de las plantas, por lo tanto, de acuerdo al análisis realizado se resalta la necesidad de más estudios desde el laboratorio hasta campo para el biocontrol de la enfermedad con especies de *Trichoderma*; además expresión génica en banano en respuesta a la infección.

En esta revisión, se destacan algunos estudios emergentes hacia una mejor comprensión la diversidad genética, la patogenicidad y la virulencia de las diferentes razas de *Foc* y la complejidad de las especies de *Trichoderma* con el uso de las ciencias ómicas de la genómica, la transcriptómica, la proteómica y la metabolómica. A partir de esta información, se puede concluir que las herramientas ómicas por sí solas pueden proporcionar información específica, pero lo ideal sería la integración las otras ciencias ómicas para comprender de manera integral los genes, metabolitos, proteínas y otros procesos intracelulares y extracelulares involucrados en el biocontrol de *Foc* mediada por *Trichoderma*. El conocimiento generado por la investigación ómica, junto con una mayor comprensión de la biología de *Trichoderma* permitiría la mejora genética dirigida de estos microorganismos beneficiosos o en estudios posteriores el uso de sus genes para una variedad de propósitos en la agricultura.

Referencias bibliográficas

- Abbey, J. A., Percival, D., Abbey, Lord, Asiedu, S. K., Prithiviraj, B., & Schilder, A. (2018). Biofungicides as alternative to synthetic fungicide control of grey mould (*Botrytis cinerea*) – prospects and challenges. *Biocontrol Science and Technology*, 29(3), 241–262. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1548574>
- Abdelrahman, M., & Jogaiah, S. (2019). Defense mechanism and diverse actions of fungal biological control agents against plant biotic stresses. *Plant Biotechnology: Progress in Genomic Era*, 461–478. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8499-8_20/COVER
- Akila, R., Rajendran, L., Harish, S., Saveetha, K., Raguchander, T., & Samiyappan, R. (2011). Combined application of botanical formulations and biocontrol agents for the management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Foc) causing Fusarium wilt in banana. *Biological Control*, 57(3), 175–183. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2011.02.010>
- Alabouvette, C., Olivain, C., Migheli, Q., & Steinberg, C. (2009). Microbiological control of soil-borne phytopathogenic fungi with special emphasis on wilt-inducing *Fusarium oxysporum*. *New Phytologist*, 184(3), 529–544. <https://doi.org/10.1111/J.1469-8137.2009.03014.X>
- Al-Ani, L. K. T. (2018). Trichoderma: Beneficial Role in Sustainable Agriculture by Plant Disease Management. *Springer, Singapore*, 5, 105–126. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5514-0_5
- Ángel García, C., Robledo Buriticá, J., & Castaño Zapata, J. (2018). Comparación de métodos de inoculación de *Fusarium solani* f. sp. *passiflorae* en plántulas de maracuyá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(1), 23–31. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n1.2018.659>

- Arie, T. (2019). Fusarium diseases of cultivated plants, control, diagnosis, and molecular and genetic studies. *Journal of Pesticide Science*, 44(4), 281.
<https://doi.org/10.1584/JPESTICS.J19-03>
- Asad, S. A. (2022). Mechanisms of action and biocontrol potential of Trichoderma against fungal plant diseases - A review. *Ecological Complexity*, 49, 100978.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOCOM.2021.100978>
- Azkolain, J. A. (2016). Biofumigación y biosolarización para el manejo del mal de Panamá en la platanera de Canarias [Universidad Pública de Navarra]. In *Upna*. <https://academic-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/22224>
- Belgrove, A., Steinberg, C., & Viljoen, A. (2011). Evaluation of nonpathogenic Fusarium oxysporum and Pseudomonas fluorescens for Panama disease control. *Plant Disease*, 95(8), 951–959. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-10-0409>
- Bell, T. H., Joly, S., Pitre, F. E., & Yergeau, E. (2014). Increasing phytoremediation efficiency and reliability using novel omics approaches. *Trends in Biotechnology*, 32(5), 271–280.
<https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2014.02.008>
- Bosland, P. W. (1988). Fusarium Oxysporum, a Pathogen of Many Plant Species. *Advances in Plant Pathology*, 6(C), 281–289. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-033706-4.50023-2>
- Bragard, C., Baptista, P., Chatzivassiliou, E., Serio, F. Di, Gonthier, P., Anton, J., Miret, J., Justesen, A. F., Macleod, A., Magnusson, S., Milonas, P., Navas-Cortes, J. A., Parnell, S., Potting, R., Stefani, E., Thulke, H.-H., Van Der Werf, W., Civera, A. V., Yuen, J., ... Reignault, P. L. (2022). Pest categorisation of Fusarium oxysporum f. sp. cubense Tropical Race 4. *EFSA Journal*, 20(1), e07092. <https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2022.7092>

- Buddenhagen, I. (2009). Understanding strain diversity in *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* and history of introduction of “tropical race 4” to better manage banana production. *Acta Horticulturae*, 828, 193–204. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2009.828.19>
- Butler, D. (2013). Fungus threatens top banana. In *Nature* (Vol. 504, Issue 7479, pp. 195–196). <https://doi.org/10.1038/504195a>
- CABI. (2020). *Registered Biocontrol and Biopesticide Products around the World*. Bioprotection Portal. <https://bioprotectionportal.com/>
- Chaves, J. Q., Pires, E. S., & Vivoni, A. M. (2011). Genetic diversity, antimicrobial resistance and toxigenic profiles of *Bacillus cereus* isolated from food in Brazil over three decades. *International Journal of Food Microbiology*, 147(1), 12–16. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2011.02.029>
- Chen, Y. F., Dai, X. M., Gong, Q., Huang, X., Xiao, W., Zhao, J. T., & Huang, X. L. (2011). Non-conventional breeding of banana (*Musa* spp.). *Acta Horticulturae*, 897, 39–46. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.897.2>
- Dale, J., James, A., Paul, J.-Y., Khanna, H., Smith, M., Peraza-Echeverria, S., Garcia-Bastidas, F., Kema, G., Waterhouse, P., Mengersen, K., & Harding, R. (2017). Transgenic Cavendish bananas with resistance to *Fusarium* wilt tropical race 4. *Nature Communications*, 8(1), 1496. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01670-6>
- Damodaran, T., Rajan, S., Muthukumar, M., Ram Gopal, Yadav, K., Kumar, S., Ahmad, I., Kumari, N., Mishra, V. K., & Jha, S. K. (2020). Biological Management of Banana *Fusarium* Wilt Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Tropical Race 4 Using

Antagonistic Fungal Isolate CSR-T-3 (*Trichoderma reesei*). *Frontiers in Microbiology*, 11.
<https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.595845/FULL>

de Ascensao, A. R. D. C. F., & Dubery, I. A. (2000). Panama Disease: Cell Wall Reinforcement in Banana Roots in Response to Elicitors from *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Race Four. *Phytopathology*, 90(10), 1173–1180. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.10.1173>

de Boer, W., Verheggen, P., Klein Gunnewiek, P. J. A., Kowalchuk, G. A., & van Veen, J. A. (2003). Microbial community composition affects soil fungistasis. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(2), 835–844. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.2.835-844.2003/ASSET/0DD7CEC3-72DF-443A-A3B1-D2A6141E266D/ASSETS/GRAPHIC/AM0231090003.JPEG>

di Pietro, A., Garcõ Aa-Maceira, F. I., Meglecz, E., & Roncero, M. I. (2004). A MAP kinase of the vascular wilt fungus *Fusarium oxysporum* is essential for root penetration and pathogenesis. *Molecular Microbiology*, 39(5), 1140–1152. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2958.2001.02307.X>

Ding, Z., Xu, T., Zhu, W., Li, L., & Fu, Q. (2020). A MADS-box transcription factor FoRlm1 regulates aerial hyphal growth, oxidative stress, cell wall biosynthesis and virulence in *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *Fungal Biology*, 124(3–4), 183–193. <https://doi.org/10.1016/J.FUNBIO.2020.02.001>

Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E. S. G., & Staver, C. P. (2018). Fusarium Wilt of Banana: Current Knowledge on Epidemiology and Research Needs Toward Sustainable Disease Management. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1468. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2018.01468>

- 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* 2011 9:10, 9(10), 749–759. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2637>
- Dugassa, A., Alemu, T., & Woldehawariat, Y. (2021). In-vitro compatibility assay of indigenous Trichoderma and Pseudomonas species and their antagonistic activities against black root rot disease (*Fusarium solani*) of faba bean (*Vicia faba* L.). *BMC Microbiology*, 21(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S12866-021-02181-7/TABLES/3>
- 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/ASSET/IMAGES/LARGE/PHYTO-08-18-0320-RVW_T3.JPEG
- FAO. (2016). *All about bananas: things you should know about the tropical fruit*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. <https://www.fao.org/zhc/detail-events/en/c/446573/>
- Fravel, D., Olivain, C., & Alabouvette, C. (2003). Fusarium oxysporum and its biocontrol. *New Phytologist*, 157(3), 493–502. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00700.x>
- Garces, E., Orozco, M., Bautista, G. R., & Valencia, H. (2001). Fusarium Oxysporum el hongo que nos falta conocer. *Acta Biológica Colombiana*, 6(1), 7–25. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/63462>
- García-Bastidas, F. A., Quintero-Vargas, J. C., Ayala-Vasquez, M., Schermer, T., Seidl, M. F., Santos-Paiva, M., Noguera, A. M., Aguilera-Galvez, C., Wittenberg, A., Hofstede, R., Sørensen, A., & Kema, G. H. J. (2019). First Report of Fusarium Wilt Tropical Race 4 in

Cavendish Bananas Caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *APS Publications*, 104(3). <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN>

Gordon, T. R. (2017). *Fusarium oxysporum* and the Fusarium Wilt Syndrome. *Annual Review of Phytopathology*, 55(1), 23–39. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-095919>

Gordon, T. R., & Martyn, R. D. (1997). The evolutionary biology of *Fusarium oxysporum*. *Annual Review of Phytopathology*, 35, 111–128.

<https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PHYTO.35.1.111>

Grinyer, J., McKay, M., Nevalainen, H., & Herbert, B. R. (2004). Fungal proteomics: Initial mapping of biological control strain *Trichoderma harzianum*. *Current Genetics*, 45(3), 163–169. <https://doi.org/10.1007/S00294-003-0474-4/FIGURES/3>

Groenewald, S. (2006). Role of mononuclear rare earth metal complexes in promoting the hydrolysis of 2-hydroxypropyl p-nitrophenyl phosphate. *Chinese Journal of Chemistry*, 25(11), 1646–1651. <https://doi.org/10.1002/cjoc.200790304>

Gui, S., Liu, F., Zhang, L. D., & Fan, X. L. (2020). Effects of Complex Anti-Fungal Agents Biocontrolling Fusarium Wilt on Banana and Its Microbiological Mechanism. *Acta Pedolo Sin*, 57, 955–1007. [10.11766/trxb201903060111](https://doi.org/10.11766/trxb201903060111)

Guo, L., Han, L., Yang, L., Zeng, H., Fan, D., Zhu, Y., Feng, Y., Wang, G., Peng, C., Jiang, X., Zhou, D., Ni, P., Liang, C., Liu, L., Wang, J., Mao, C., Fang, X., Peng, M., & Huang, J. (2014). Genome and Transcriptome Analysis of the Fungal Pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* Causing Banana Vascular Wilt Disease. *PLOS ONE*, 9(4), e95543. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0095543>

- Harman, G. E. (1991). Seed treatments for biological control of plant disease. *Crop Protection*, 10(3), 166–171. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(91\)90038-S](https://doi.org/10.1016/0261-2194(91)90038-S)
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). Trichoderma species — opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology* 2004 2:1, 2(1), 43–56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- Hennessy, C., Walduck, G., Daly, A., & Padovan, A. (2005). Weed hosts of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 in northern Australia. *Australasian Plant Pathology*, 34(1), 115–117. <https://doi.org/10.1071/AP04091>
- Hermosa, R., Viterbo, A., Chet, I., & Monte, E. (2012). Plant-beneficial effects of Trichoderma and of its genes. *Microbiology*, 158(1), 17–25. <https://doi.org/10.1099/MIC.0.052274-0/CITE/REFWORKS>
- ICA. (2019). *Primera detección de marchitez por Fusarium oxysporum f.sp. cubense Raza 4 Tropical – FOC R4T*. <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/epidemiologia-agricola/saf/notificacion-oficial/detalle-notificacion-oficial/primera-deteccion-de-marchitez-por-fusarium-oxyspo>
- ICA, I. C. A. (2021). *Productos bioinsumos registrados- Enero 2021*. ICA. <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/agricultura-ecologica-1/documentos/productos-bioinsumos-marzo-14-2018.aspx>
- Infante, D., Martinez, B., Gonzalez, N., & Reyes, Y. (2009). Mecanismos de acción de Trichoderma frente a hongos fitopatógenos. *Revista de Protección Vegetal*, 24(1)(2), 14–21. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522009000100002

- Ismaila, A. A., Ahmad, K., Siddique, Y., Wahab, M. A. A., Kutawa, A. B., Abdullahi, A., Zobir, S. A. M., Abdu, A., & Abdullah, S. N. A. (2022). Fusarium Wilt of Banana: Current Update and Sustainable Disease Control Using Classical and Essential Oils Approaches. *Horticultural Plant Journal*. <https://doi.org/10.1016/J.HPJ.2022.02.004>
- Jenkins, S., Taylor, A., Jackson, A. C., Armitage, A. D., Bates, H. J., Mead, A., Harrison, R. J., & Clarkson, J. P. (2021). Identification and Expression of Secreted In Xylem Pathogenicity Genes in *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisii*. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 788. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2021.593140/BIBTEX>
- Karlsson, M., Atanasova, L., Jensen, D. F., & Zeilinger, S. (2017). Necrotrophic Mycoparasites and Their Genomes. *Microbiology Spectrum*, *5*(2). <https://doi.org/10.1128/MICROBIOLSPEC.FUNK-0016-2016/ASSET/B6526965-5212-4D38-A02C-1BA587632837/ASSETS/GRAPHIC/FUNK-0016-2016-FIG1.GIF>
- Kaushal, M., Mahuku, G., & Swennen, R. (2021). Comparative Transcriptome and Expression Profiling of Resistant and Susceptible Banana Cultivars during Infection by *Fusarium oxysporum*. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(6), 3002. <https://doi.org/10.3390/IJMS22063002>
- Khan, M. H., & Panda, S. K. (2007). Alterations in root lipid peroxidation and antioxidative responses in two rice cultivars under NaCl-salinity stress. *Acta Physiologiae Plantarum* *2007 30:1*, *30*(1), 81–89. <https://doi.org/10.1007/S11738-007-0093-7>
- Kovács, C., Csótó, A., Pál, K., Nagy, A., Fekete, E., Karaffa, L., Kubicek, C. P., Sándor, E., Nagy, K. ;, Fekete, A. ;, Karaffa, E. ;, Kubicek, L. ;, Sándor, C. P. ;, The, E., Tarasco, E., & Gevens, A. (2021). The Biocontrol Potential of Endophytic Trichoderma Fungi Isolated

from Hungarian Grapevines. Part I. Isolation, Identification and In Vitro Studies. *Pathogens* 2021, Vol. 10, Page 1612, 10(12), 1612. <https://doi.org/10.3390/PATHOGENS10121612>

la Spada, F., Stracquadiano, C., Riolo, M., Pane, A., & Cacciola, S. O. (2020). Trichoderma Counteracts the Challenge of *Phytophthora nicotianae* Infections on Tomato by Modulating Plant Defense Mechanisms and the Expression of Crinkler, Necrosis-Inducing *Phytophthora* Protein 1, and Cellulose-Binding Elicitor Lectin Pathogenic Effectors. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.583539>

Laurence, M. H., Summerell, B. A., Burgess, L. W., & Liew, E. C. Y. (2014). Genealogical concordance phylogenetic species recognition in the *Fusarium oxysporum* species complex. *Fungal Biology*, 118(4), 374–384. <https://doi.org/10.1016/J.FUNBIO.2014.02.002>

Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). The *Fusarium* Laboratory Manual. In *The Fusarium Laboratory Manual*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470278376>

Li, C., Chen, S., Zuo, C., Sun, Q., Ye, Q., Yi, G., & Huang, B. (2011). The use of GFP-transformed isolates to study infection of banana with *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* race 4. *European Journal of Plant Pathology* 2011 131:2, 131(2), 327–340. <https://doi.org/10.1007/S10658-011-9811-5>

Lombard, L., Sandoval-Denis, M., Lamprecht, S. C., & Crous, P. W. (2019). Epitypification of *Fusarium oxysporum* – clearing the taxonomic chaos. *Persoonia : Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, 43, 47. <https://doi.org/10.3767/PERSONIA.2019.43.01>

Lorenzo, M. E. (2004). Prospección De Hongos Antagonistas En La Provincia De Cienfuegos. Efectividad Y Posibilidades De Reproducción De Cepas Nativas De *Trichoderma* Spp. *Fitosanidad*, 8(2), 64. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209117836021>

- Lorito, M., Woo, S. L., Harman, G. E., & Monte, E. (2010). Translational Research on Trichoderma: From 'Omics to the Field. *Annual Review of Phytopathology*, *48*, 395–417. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-PHYTO-073009-114314>
- Macías-Rodríguez, L., Contreras-Cornejo, H. A., Adame-Garnica, S. G., del-Val, E., & Larsen, J. (2020). The interactions of Trichoderma at multiple trophic levels: inter-kingdom communication. *Microbiological Research*, *240*, 126552. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2020.126552>
- Malmierca, M. G., Barua, J., McCormick, S. P., Izquierdo-Bueno, I., Cardoza, R. E., Alexander, N. J., Hermosa, R., Collado, I. G., Monte, E., & Gutiérrez, S. (2015). Novel aspinolide production by *Trichoderma arundinaceum* with a potential role in *Botrytis cinerea* antagonistic activity and plant defence priming. *Environmental Microbiology*, *17*(4), 1103–1118. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12514>
- 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 2022*, *Vol. 14*, Page 12786, *14*(19), 12786. <https://doi.org/10.3390/SU141912786>
- Marín-Serna, S., González-Guzmán, J., Castaño-Zapata, J., & Ceballos-Aguirre, N. (2014). Respuesta de quince introducciones de tomate tipo cereza (*Solanum* spp.) a la marchitez vascular (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Snyder & Hansen). *Revista Agronomía*, *22*(2), 48–59. [http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia22\(2\)_5.pdf](http://agronomia.ucaldas.edu.co/downloads/Agronomia22(2)_5.pdf)
- Marra, R., Ambrosino, P., Carbone, V., Vinale, F., Woo, S. L., Ruocco, M., Ciliento, R., Lanzuise, S., Ferraioli, S., Soriente, I., Gigante, S., Turrà, D., Fogliano, V., Scala, F., & Lorito, M.

(2006). Study of the three-way interaction between *Trichoderma atroviride*, plant and fungal pathogens by using a proteomic approach. *Current Genetics*, 50(5), 307–321.

<https://doi.org/10.1007/S00294-006-0091-0/TABLES/6>

Maryani, N., Lombard, L., Poerba, Y. S., Subandiyah, S., Crous, P. W., & Kema, G. H. J. (2019). Phylogeny and genetic diversity of the banana *Fusarium* wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* in the Indonesian centre of origin. *Studies in Mycology*, 92, 155–194. <https://doi.org/10.1016/J.SIMYCO.2018.06.003>

Michielse, C. B., & Rep, M. (2009). Pathogen profile update: *Fusarium oxysporum*. *Molecular Plant Pathology*, 10(3), 311–324. <https://doi.org/10.1111/J.1364-3703.2009.00538.X>

Mohandas, S., Sowmya, H. D., Saxena, A. K., Meenakshi, S., Rani, R. T., & Mahmood, R. (2013). Transgenic banana cv. Rasthali (AAB, Silk gp) harboring Ace-AMP1 gene imparts enhanced resistance to *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* race 1. *Scientia Horticulturae*, 164, 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.018>

Moore, N. Y., Bentley, K. G., & Jones, D. R. (1995). *Fusarium* wilt of banana. *Inibap*, 5, 1–4. <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/105391/702.pdf?sequence=7>

Mordor Intelligence. (2022). *BANANA MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2022 - 2027)*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/banana-market>

Moreno Velandia, C. A., Izquierdo García, L. F., Zapata Narváez, Y. A., Beltrán Acosta, C. R., & Zuluaga Mogollón, M. V. (2020). Tricotec® WG biofungicida: recomendaciones de uso y patógenos blanco. *Agrosavia*, 1–48.

<https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.BROCHURE.7403787>

- Mukherjee, M., Mukherjee, P. K., Horwitz, B. A., Zachow, C., Berg, G., & Zeilinger, S. (2012). Trichoderma–Plant–Pathogen Interactions: Advances in Genetics of Biological Control. *Indian Journal of Microbiology* 2012 52:4, 52(4), 522–529. <https://doi.org/10.1007/S12088-012-0308-5>
- Mukherjee, P. K., Horwitz, B. A., & Kenerley, C. M. (2012). Secondary metabolism in Trichoderma - A genomic perspective. *Microbiology*, 158(1), 35–45. <https://doi.org/10.1099/MIC.0.053629-0/CITE/REFWORKS>
- Ordoñez, N., García-Bastidas, F., Laghari, H. B., Akkary, M. Y., Harfouche, E. N., al Awar, B. N., & Kema, G. H. J. (2015). First Report of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense Tropical Race 4 Causing Panama Disease in Cavendish Bananas in Pakistan and Lebanon. *APS Publications*, 100(1), 209. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-14-1356-PDN>
- Pandey, R. N., Jaisani, P., & Singh, H. B. (2021). Trichoderma: agricultural applications and beyond. In *Biopesticides* (Vol. 2, pp. 353–381). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823355-9.00013-4>
- Pembroke graphics. (n.d.). *Panama Disease illustrated lifecycle infographic*. Retrieved June 4, 2022, from <https://pembroke.graphics/panama-disease-illustrated-lifecycle-infographic/>
- Ploetz, R. C. (2006). Fusarium-Induced Diseases of Tropical Perennial Crops Fusarium Wilt of Banana Is Caused by Several Pathogens Referred to as *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *Phytopathology*, 96(6), 653–656. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0653>
- Ploetz, R. C. (2015). Fusarium wilt of banana. *Phytopathology*, 105(12), 1512–1521. https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW/ASSET/IMAGES/LARGE/PHYTO-04-15-0101-RVW_T2.JPG

- Poveda, J. (2021). Trichoderma as biocontrol agent against pests: New uses for a mycoparasite. *Biological Control*, 159. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCONTROL.2021.104634>
- Ram, R. M., Keswani, C., Bisen, K., Tripathi, R., Singh, S. P., & Singh, H. B. (2018). Biocontrol Technology: Eco-Friendly Approaches for Sustainable Agriculture. *Omic Technologies and Bio-Engineering: Volume 2: Towards Improving Quality of Life*, 177–190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815870-8.00010-3>
- Raman, T., Kalaimughilan, K., & Esack, E. R. (2021). Comparative proteomic analysis of *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense strains (Foc R1 and Foc TR4) provides better insights into mechanisms of their virulence, habitat adaptation and pathogenesis. *BioRxiv*, 102, 1–34. <https://doi.org/10.1101/2021.12.29.474485>
- Ramu, V., Venkatarangaiyah, K., Krishnappa, P., Rajanna, S. K. S., Deeplanaik, N., Pal, A. C., & Kini, K. R. (2016). Identification of biomarkers for resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense infection and in silico studies in *Musa paradisiaca* cultivar puttabale through proteomic approach. *Proteomes*, 4(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/proteomes4010009>
- Raza, W., Ling, N., Zhang, R., Huang, Q., Xu, Y., & Shen, Q. (2017). Success evaluation of the biological control of *Fusarium* wilts of cucumber, banana, and tomato since 2000 and future research strategies. In *Critical Reviews in Biotechnology* (Vol. 37, Issue 2, pp. 202–212). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1130683>
- Rifai, M. A. (1969). *A revision of the genus Trichoderma* (Mycol, Vol. 116). https://openlibrary.org/books/OL5273464M/A_revision_of_the_genus_Trichoderma
- Rush, T. A., Shrestha, H. K., Gopalakrishnan Meena, M., Spangler, M. K., Ellis, J. C., Labbé, J. L., & Abraham, P. E. (2021). Bioprospecting *Trichoderma*: A Systematic Roadmap to Screen

Genomes and Natural Products for Biocontrol Applications. *Frontiers in Fungal Biology*, 2, 41. <https://doi.org/10.3389/FFUNB.2021.716511>

Samuels, G. J. (1996). Trichoderma: a review of biology and systematics of the genus. *Mycological Research*, 100(8), 923–935. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(96\)80043-8](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(96)80043-8)

Sánchez-Espinosa, A. C., Villarruel-Ordaz, J. L., & Maldonado Bonilla, L. D. (2021).

Mycoparasitic antagonism of a *Trichoderma harzianum* strain isolated from banana plants in Oaxaca, Mexico. *Biotechnia*, 23(1), 127–134.

<https://doi.org/10.18633/BIOTECNIA.V23I1.1310>

Schirmbock, M., Lorito, M., Wang, Y. L., Hayes, C. K., Arisan-Atac, I., Scala, F., Harman, G. E.,

& Kubicek, C. P. (1994). Parallel formation and synergism of hydrolytic enzymes and peptaibol antibiotics, molecular mechanisms involved in the antagonistic action of

Trichoderma harzianum against phytopathogenic fungi. *Applied and Environmental*

Microbiology, 60(12), 4364–4370. <https://doi.org/10.1128/AEM.60.12.4364-4370.1994>

Seidl-Seiboth, V., Ihrmark, K., Druzhinina, I., & Karlsson, M. (2014). Molecular Evolution of

Trichoderma Chitinases. *Biotechnology and Biology of Trichoderma*, 67–78.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59576-8.00005-9>

Shoresh, M., Harman, G. E., & Mastouri, F. (2010). Induced Systemic Resistance and Plant

Responses to Fungal Biocontrol Agents. *Annual Review of Phytopathology*, 48, 21–43.

<https://doi.org/10.1146/ANNUREV-PHYTO-073009-114450>

Silva, R. N., Monteiro, V. N., Steindorff, A. S., Gomes, E. V., Noronha, E. F., & Ulhoa, C. J.

(2019). *Trichoderma*/pathogen/plant interaction in pre-harvest food security. *Fungal*

Biology, 123(8), 565–583. <https://doi.org/10.1016/J.FUNBIO.2019.06.010>

- Singh, J., Aggarwal, R., Saini, D. K., Kashyap, R., Kumar, S., Chopra, Y., Sandhu, K. S., & Goraya, M. (2022). Omics technologies for agricultural microbiology research. *Trends of Applied Microbiology for Sustainable Economy*, 343–394. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91595-3.00015-X>
- Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteiwiy, M. S., Ramakrishnan, M., Landi, M., Araniti, F., & Sharma, A. (2020). Trichoderma: The “Secrets” of a Multitalented Biocontrol Agent. *Plants* 2020, Vol. 9, Page 762, 9(6), 762. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9060762>
- Subramaniam, S., Maziah, M., Sariah, M., Puad, M. P., & Xavier, R. (2006). Bioassay method for testing Fusarium wilt disease tolerance in transgenic banana. *Scientia Horticulturae*, 108(4), 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.028>
- Sudantha, H. (2021). Characterization and virulence of Fusarium oxysporum f. sp. cubense cause wilt disease in banana plants and its biological control using endophytic fungi Trichoderma spp. at West Nusa Tenggara, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 886(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/886/1/012016>
- Sun, D., Lu, X., Hu, Y., Li, W., Hong, K., Mo, Y., Cahill, D. M., & Xie, J. (2013). Methyl jasmonate induced defense responses increase resistance to Fusarium oxysporum f. sp. cubense race 4 in banana. *Scientia Horticulturae*, 164, 484–491. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.10.011>
- Swarupa, V., Pavitra, K., Shivashankara, K. S., & Shivashankara, K. S. (2016). Omics–driven approaches in plant–microbe interaction. *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity: Vol. 1: Research Perspectives*, 61–84. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2647-5_4/COVER

- Taribuka, J., Wibowo, A., M Widyastuti, S., & Sumardiyono, C. (2017). Potency of six isolates of biocontrol agents endophytic *Trichoderma* against fusarium wilt on banana. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 4(2), 723–731.
<https://doi.org/10.15243/JDMLM.2017.042.723>
- Thambugala, K. M., Daranagama, D. A., Phillips, A. J. L., Kannangara, S. D., & Promputtha, I. (2020a). Fungi vs. Fungi in Biocontrol: An Overview of Fungal Antagonists Applied Against Fungal Plant Pathogens. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 10.
<https://doi.org/10.3389/FCIMB.2020.604923/FULL>
- Thambugala, K. M., Daranagama, D. A., Phillips, A. J. L., Kannangara, S. D., & Promputtha, I. (2020b). Fungi vs. Fungi in Biocontrol: An Overview of Fungal Antagonists Applied Against Fungal Plant Pathogens. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 10, 718.
<https://doi.org/10.3389/FCIMB.2020.604923/BIBTEX>
- Thangavelu, R., & Gopi, M. (2015). Combined application of native *Trichoderma* isolates possessing multiple functions for the control of *Fusarium* wilt disease in banana cv. Grand Naine. [Http://Dx.Doi.Org/10.1080/09583157.2015.1036727](http://Dx.Doi.Org/10.1080/09583157.2015.1036727), 25(10), 1147–1164.
<https://doi.org/10.1080/09583157.2015.1036727>
- Torres, E., Bebbler, D. P., & Studholme, D. J. (2021). Taxonomic Revision of the Banana *Fusarium* Wilt TR4 Pathogen Is Premature. *Phytopathology*, 111(12), 2141–2145.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-21-0089-LE>
- 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/S1>

Verma, M., Brar, S. K., Tyagi, R. D., Surampalli, R. Y., & Valéro, J. R. (2007). Antagonistic fungi, *Trichoderma* spp.: Panoply of biological control. *Biochemical Engineering Journal*, 37(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2007.05.012>

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>

Viterbo, A., & Horwitz, BA. (2010). Mycoparasitism. In E. D. (ed) In Borkovich KA (Ed.), *Cellular and Molecular Biology of Filamentous Fungi* (pp. 676–693). ASM Press. <https://doi.org/10.1128/9781555816636.ch42>

Viterbo, A., Ramot, O., Chernin, L., & Chet, I. (2002). Significance of lytic enzymes from *Trichoderma* spp. in the biocontrol of fungal plant pathogens. *Antonie van Leeuwenhoek* 2002 81:1, 81(1), 549–556. <https://doi.org/10.1023/A:1020553421740>

Waite, B. H., & Dunlap, C. V. (1953). Preliminary host range studies with *Fusarium oxysporum* f.sp. cubense. *Plant Disease Reporter*, 37, 79–80. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20057008257>

Wang, Q., Zhou, L., Jin, H., Cong, B., Yang, H., & Wang, S. (2022). Investigating the Responses of Microbial Communities to Banana Fusarium Wilt in Suppressive and Conducive Soils Based on Soil Particle-Size Differentiation. *Agronomy*, 12(2), 229. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12020229/S1>

- Wang, Z., Jia, C., Li, J., Huang, S., Xu, B., & Jin, Z. (2015). Activation of salicylic acid metabolism and signal transduction can enhance resistance to *Fusarium* wilt in banana (*Musa acuminata* L. AAA group, cv. Cavendish). *Functional and Integrative Genomics*, *15*(1), 47–62. <https://doi.org/10.1007/s10142-014-0402-3>
- Weindling, R. (1934). Studies on a lethal principle effective in the parasitic action of *Trichoderma lignorum* on *Rhizoctonia solani* and other soil fungi. *Phytopath*, *24*(11), 1153–1179. <https://readpaper.com/paper/3163876211>
- Wu, Y. L., Yi, G. J., & Peng, X. X. (2010). Rapid screening of *Musa* species for resistance to *Fusarium* wilt in an in vitro bioassay. *European Journal of Plant Pathology*, *128*(3), 409–415. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9669-y>
- Yang, P. (2017). The gene *task1* is involved in morphological development, mycoparasitism and antibiosis of *Trichoderma asperellum*. *Biocontrol Sci*, *27*(5), 620–635. <https://doi.org/10.1080/09583157.2017.1318824>
- Zeilinger, S., & Omann, M. (2007). *Trichoderma* Biocontrol: Signal Transduction Pathways Involved in Host Sensing and Mycoparasitism. *Gene Regulation and Systems Biology*, *1*, 234. <https://doi.org/10.4137/GRSB.S397>
- Zeilinger, S., Gruber, S., Bansal, R., & Mukherjee, P. K. (2016). Secondary metabolism in *Trichoderma* – Chemistry meets genomics. *Fungal Biology Reviews*, *30*(2), 74–90. <https://doi.org/10.1016/J.FBR.2016.05.001>
- Zhang, H., Mallik, A., & Zeng, R. S. (2013). Control of Panama Disease of Banana by Rotating and Intercropping with Chinese Chive (*Allium Tuberosum* Rottler): Role of Plant Volatiles.

Journal of Chemical Ecology 2013 39:2, 39(2), 243–252. <https://doi.org/10.1007/S10886-013-0243-X>

Zhang, L., Yuan, T., Wang, Y., Zhang, D., Bai, T., Xu, S., Wang, Y., Tang, W., & Zheng, S. J. (2018). Identification and evaluation of resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4 in *Musa acuminata* Pahang. *Euphytica*, 214(106), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S10681-018-2185-4>

Zheng, S. J., García-Bastidas, F. A., Li, X., Zeng, L., Bai, T., Xu, S., Yin, K., Li, H., Fu, G., Yu, Y., Yang, L., Nguyen, H. C., Douangboupha, B., Khaing, A. A., Drenth, A., Seidl, M. F., Meijer, H. J. G., & Kema, G. H. J. (2018). New geographical insights of the latest expansion of *Fusarium oxysporum* f. sp. Cubense tropical race 4 into the greater mekong subregion. *Frontiers in Plant Science*, 9, 457. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2018.00457/BIBTEX>

Zin, N. A., & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168–178. <https://doi.org/10.1016/J.AOAS.2020.09.003>

Anexos

Tabla 1.

Biofungicidas comerciales a base de Trichoderma que están disponibles en el mercado mundial

Nombre comercial	Ingrediente activo	Concentración	Fabricante	Presentación	País	Referencia
Trichofus WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	2 * 10 ⁸ Conidias/g	Sanitex S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Trichox WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	1.0 * 10 ⁸ UFC	Semillas valle S.A	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Trichodex 25	<i>Trichoderma harzianum</i> T-39	1 * 10 ⁹ UFC/G	Proficol S.A	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Mycobac WP	<i>Trichoderma lignorum</i>	2 * 10 ⁷ Conidias viables/g	Laverlam S.A	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Tricho D. WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁸ Esporas /g	Biotech-orius S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Bioregulax WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁸ Esporas viables/g	Biotech-orius S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Biofungo WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁸ Esporas/g 20%	Biotech-orius S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Trichogen WP	<i>Trichoderma lignorum</i>	1 * 10 ⁹ Conidias viables/g	Yaser S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Trifisol 1000 WP	<i>Trichoderma viride</i>	1 * 10 ⁷ Conidias/g	Biocultivos S.A	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Trifisol 1000 SC	<i>Trichoderma viride</i>	1 * 10 ⁷ Conidias/g	Biocultivos S.A	Suspensión concentrada	Colombia	(ICA, 2021)
Antagon WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁸ Conidias/g	Bioecologicos S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Trichodermus	<i>Trichoderma harzianum</i>	9 * 10 ⁸ Conidias/g 50%	Biológicos y ecológicos de Colombia LTDA	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Agroguard®	<i>Trichoderma harzianum</i> DSM 14944	5 * 10 ⁸ Conidias viables/g	Live systems technology S.A. "LST S.A"	Gránulos dispersables	Colombia	(ICA, 2021)
Trichobiol WP	<i>Trichoderma lignorum</i>	1 * 10 ⁹ Conidias/g	Arturo Orlando Mora Jaramillo "Biocontrol"	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Trichollanos WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	10 * 10 ⁹ Conidias/g	Laboratorio biológico la avispa	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)

Trifisol SC	<i>Trichoderma viride</i>	1 * 10 ⁷ UFC/ML	Biocultivos S.A	Suspensión concentrada	Colombia	(ICA, 2021)
Foliguard SC	<i>Trichoderma harzianum</i> CEPA DSM 14944	5 * 10 ⁸ conidias viables/ml	Live systems technology S.A. "LST S.A"	Suspensión concentrada	Colombia	(ICA, 2021)
Prqكتور WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	2 * 10 ⁸ UFC viables/g 50%	Bio-Crop S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Trichoinpro WP	<i>Trichoderma atroviride</i>	1 * 10 ⁹ Esporas/g	Inproarroz LTDA	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Bioderma	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ¹⁰ CONIDIAS/g	Biotropical S.A	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Tribiol WG	<i>Trichoderma harzianum</i>	5 * 10 ⁹ Esporas/g	Bioprotección S.A.S	Gránulos dispersables	Colombia	(ICA, 2021)
Biotricho WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ¹⁰ UFC/g* 30%	Biocultivares S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Fitobac®	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ³ UFC/ml	Organización pajonales S.A.S	Emulsión aceite en agua ew	Colombia	(ICA, 2021)
Aegis-P ®	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁷ UFC/g	Bionexus S.A.S	Polvo mojable	Chile	(ICA, 2021)
Trichosym BIO	<i>Trichoderma harzianum</i>	5 * 10 ⁸ UFC/ML	Agroadviser S.A.S	Suspensión concentrada	España	(ICA, 2021)
Trichoplanta	<i>Trichoderma harzianum</i>	1* 10 ⁸ UFC/mL* 99.63% V/V	Agrobiológicos planta S.A.S	Concentrado soluble	Colombia	(ICA, 2021)
Agroint-T	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁹ Esporas viables/g 4%	Edgar Yamil Acosta Lopez Propietario de agroinsumos biológicos	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Blinder SC Mycros	<i>Trichoderma harzianum</i> CEPA BTH003	5 * 10 ⁸ Conidias viables/g	Mycros internacional S.A.S	Suspensión concentrada	Colombia	(ICA, 2021)
Fungigrasp WP	<i>Trichoderma harzianum</i>	2.0 * 10 ⁸ UFC	Core biotechnology S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Safersoil WP	<i>Trichoderma asperellum</i>	5 * 10 ⁸ conidas/gramo	Safer agrobiológicos S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
BIO-T	<i>Trichoderma harzianum</i> (LCB-TH01)	3 * 10 ⁷ UFC/ml	P.L.A. Biológicos	Concentrado soluble	Colombia	(ICA, 2021)
Tricotec® WP	<i>Trichoderma koningiopsis</i>	1 * 10 ⁹ UFC/g Viales 3.3%	Corporación colombiana de investigación	Polvo mojable	Colombia Brasil	(ICA, 2021)

			agropecuaria - agrosavia			
Natucontrol Mezfer	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁷ UFC/g	Mezfer andina SAS	Polvo mojable	México	(ICA, 2021)
Pro-Root	<i>Trichoderma viride</i>	1 * 10 ⁸ Conidias viables/g	Q-biol calidad biologica S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
Asperello T34 Biocontrol	<i>Trichoderma asperellum</i>	1 * 10 ⁹ UFC/g	Biocontrol Technologies	Polvo mojable	Canadá	(CABI, 2020)
Trianum-P	<i>Trichoderma harzianum</i>	1x10 ⁹ esporas/g	koppert	Gránulos dispersables	Canadá Kenia Marruecos Portugal Uganda	(CABI, 2020)
RootShield® HC	<i>Trichoderma harzianum</i> cepa T-22 (KRL-AG2)	1 * 10 ⁷ UFC * g	BioWorks	Polvo mojable	Canadá	(CABI, 2020)
Trianum DS	<i>Trichoderma harzianum</i> cepa T-22	1 * 10 ⁸ UFC * g	Koppert do Brasil Holding LTDA	Granulo dispersable	Brasil	(CABI, 2020)
Walker	<i>Trichoderma harzianum</i> cepa T-22	1 * 10 ⁸ UFC * g	Koppert do Brasil Holding LTDA	Granulo dispersable	Brasil	(CABI, 2020)
Harztop	<i>Trichoderma harzianum</i> cepa T-22	1 * 10 ⁸ UFC/ml	Biogram	Formulación líquida	Chile	(CABI, 2020)
T34 Biocontrol	<i>Trichoderma asperellum</i> cepa T34	1 * 10 ¹² UFC*Kg	Bio Control Technologies	Polvo mojable	Francia Portugal España Reino unido	(CABI, 2020)
Tri-Soil	<i>Trichoderma atroviride</i> cepa I-1237	1 * 10 ⁸ UFC * g	Agrauxine	Polvo mojable	Francia	(CABI, 2020)
Trianum-G	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁷ UFC * g	Koppert Biological Systems	Granulo dispersable	Francia España Reino unido	(CABI, 2020)
Trianum-P	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁷ UFC * g	Koppert Biological Systems	Polvo mojable	Francia España Reino unido	(CABI, 2020)
Xilon	<i>Trichoderma asperellum</i> Stamm T34	N/I	Kwizda Agro GmbH	Polvo mojable	Alemania	(CABI, 2020)

Anoohya	<i>Trichoderma harzianum</i>	N/I	Jyothiraditya Bio Solutions, Mysore	Polvo mojable	India	(CABI, 2020)
Derma WHP	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁸ UFC/ml	Sun Agro Bio System, Chennai	Liquido	India	(CABI, 2020)
Tricho-HR	<i>Trichoderma harzianum</i>	N/I	Sumitomo	Polvo mojable	India	(CABI, 2020)
Tricho Green	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Trichoderma viride</i>	1 * 10 ⁸ Esporas/g	The Grama Karshaka	Polvo mojable	India	(CABI, 2020)
Trieco	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁸ Esporas/g	Ecosense	Polvo mojable	India	(CABI, 2020)
Ecosom-TH	<i>Trichoderma harzianum</i>	2 * 10 ⁶ UFC/g	Afri Life	Polvo mojable	India	(CABI, 2020)
Hariz	<i>Trichoderma harzianum</i>	N/I	Varsha Bio Science and Technology, Hyderabad	Polvo mojable	India	(CABI, 2020)
Patanjali Tricho	<i>Trichoderma harzianum</i>	N/I	Patanjali	N/I	India	(CABI, 2020)
Peak Trico-H	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁹ UFC/ml	Peak Chemical Industries	Líquido	India	(CABI, 2020)
Dermacon H	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁹ UFC/ml	TARI Bio-Tech	Liquido	India	(CABI, 2020)
Bioharz	<i>Trichoderma harzianum</i>	N/I	IPL	Liquido	India	(CABI, 2020)
Tricost	<i>Trichoderma viride</i>	N/I	AF Chem Sofaco	Polvo mojable	Costa de marfil	(CABI, 2020)
Trichotech	<i>Trichoderma asperellum</i>	4 * 10 ⁹ UFC/g	Dudutech Integrated Pest Management Limited	Polvo mojable	Kenia	(CABI, 2020)
Bio-cure F	<i>Trichoderma viride</i>	2 * 10 ⁶ UFC/g	T. Stanes & Company	Polvo mojable	Kenia	(CABI, 2020)
Rootgard	<i>Trichoderma harzianum</i>	N/I	J.H. Biotech	Suspensión concentrada	Kenia	(CABI, 2020)
Eco-T	<i>Trichoderma harzianum</i>	2 * 10 ⁹ UFC/g	Plant Health Products (Pty) , South Africa	Polvo humectable	Kenia	(CABI, 2020)
Tricho-D	<i>Trichoderma harzianum</i>	1 * 10 ⁸ esporas viables/g	Orius Biotecnologia	Polvo humectable	Perú	(CABI, 2020)
Triconova	<i>Trichoderma harzianum</i>	4 * 10 ⁹ UFC/ml	Novagri	Liquido	Perú	(CABI, 2020)

Tusal	<i>Trichoderma asperellum</i> cepa T25; <i>Trichoderma atroviride</i> cepa T11	1 * 10 ⁸ UFC/ g	Timac Agro España	Polvo mojable	España	(CABI, 2020)
Sustain	<i>Trichoderma asperellum</i>	N/I	Real IPM Uganda	Líquido	Uganda	(CABI, 2020)
Bio-cure F	<i>Trichoderma viride</i>	Líquida (1 * 10 ⁹ * ml) polvo 2 * 10 ⁶ * g	T. Stanes & Company	Líquido y polvo	Uganda	(CABI, 2020)
Bio-tan	<i>Trichoderma asperellum</i> (ICC 012), <i>Trichoderma gamsii</i> (ICC 080)	3 * 10 ⁷ UFC * g	ISAGRO SpA	Polvo mojable	Alemania	(CABI, 2020)
Binab T Pellet GR	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Trichoderma polysporum</i>	10.000 ufc/g	Binab Ab Bio-Innovation Ab	Granulo dispersable	Chile	(CABI, 2020)
Binab-T WP	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Trichoderma polisporum</i>	10.000 ufc/g	Binab Ab Bio-Innovación Ab	Polvo mojable	Chile	(CABI, 2020)
Bio-Fit	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Trichoderma spp.</i> <i>Trichoderma viride</i>	N/I	Bio Mycota	N/I	Chile	(CABI, 2020)
3 Tac-I/Beta	<i>Trichoderma harzianum</i> Cepa T-22, <i>Trichoderma longibrachiatum</i> Cepa T-397, <i>Trichoderma viride</i> Cepa T-26	>25 x 10 ³ c.f.u. g-1	Avance Biotechnologies	Polvo mojable	Chile	(CABI, 2020)
Trichonativa Hortalizas	<i>Tichoderma harzianum</i> cepa Queule, <i>Trichoderma virens</i> cepa Sherwood y	1 * 10 ⁹ UFC/ml	Bio Insumos Nativa	Suspensión concentrada	Chile	(CABI, 2020)

	<i>Trichoderma parceramosum</i> cepa Trailes					
Rootshield Plus WP	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Trichoderma virens</i>	1 * 10 ⁷ UFC	BioWorks	Polvo mojable	EE. UU.	(CABI, 2020)
Rootshield Granules	<i>Trichoderma harzianum</i> , cepa T-22	1 * 10 ⁷ UFC	BioWorks	Gránulos	Canadá	(CABI, 2020)
Trichotropico WP	<i>Trichoderma harzianum</i> & <i>Trichoderma koningii</i>	1 * 10 ⁸ Esporas/g	Soluciones microbianas del trópico S.A.S	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)
TrichogeL® GL	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Trichoderma koningii</i>	1 * 10 ⁸ Esporas viables /g 20%	Soluciones microbianas del trópico S.A.S	Gel emulsionable	Colombia	(ICA, 2021)
Fitotripen WP	<i>Trichoderma harzianum</i> <i>Trichoderma koningii</i> <i>Trichoderma viride</i>	1 * 10 ⁸ Esporas viables/g	Natural control S.A	Polvo mojable	Colombia	(ICA, 2021)

Nota: N/I la empresa productora no reporta la información