

Metabolitos secundarios de *Trichoderma* spp.: importancia en la industria agrícola, farmacéutica y alimentaria

Secondary metabolites of *Trichoderma* spp.: importance in agricultural, pharmaceutical, and food industries

Lina Suarez Medina¹, Valentín Murcia-Torrejano¹, Maily Rivas López¹, Alonso Pinto Antonio¹, Nikol Muñoz Otero¹, Jonatan Valencia-Payán¹, William Ochoa¹ y Dayana Moreno-Ortega²

¹ Centro de Formación Agroindustrial, lsuarezm@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0005-6837-9445>

¹ Centro de Formación Agroindustrial, vamurcia@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-2063-4452>

¹ Centro de Formación Agroindustrial, mrivas@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0005-4800-665X>

¹ Centro de Formación Agroindustrial, armapinto@soy.sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0009-2593-9077>

Autor para correspondencia, lsuarezm@sena.edu.co

Como citar:

Suarez Medina, L., Murcia-Torrejano, V., Rivas López, M., Pinto Antonio, A., Nikol Muñoz Otero, A., Valencia-Payán, J., Ochoa, W., & Moreno-Ortega, D. (2024). Metabolitos secundarios de *Trichoderma* spp.: importancia en la industria agrícola, farmacéutica y alimentaria. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 10(3), 35-55. ISSN: 2422-0493.



Resumen

El género de hongos *Trichoderma* spp., ha generado gran interés en la investigación y la industria debido a su versatilidad. Su distribución cosmopolita y rápido crecimiento lo convierten en una biofábrica de compuestos químicos con relevancia en la agricultura, la farmacéutica y la industria alimentaria. En el ámbito agrícola, *Trichoderma* actúa como biocontrolador, promotor del crecimiento vegetal y degradador de materiales lignocelulósicos aportando significativamente en el mejoramiento de la salud y la calidad del suelo, y siendo además, una estrategia crucial para afrontar los efectos del cambio climático. En farmacología, sus propiedades anticancerígenas, antiinflamatorias y antienvjecimiento son fundamentales para el desarrollo y la formulación tanto de fármacos como de alimentos funcionales y nutraceuticos. Además, en la industria alimentaria, se destaca por sus

funciones antioxidantes y antifúngicas, esenciales para la conservación e inocuidad de los alimentos. Estas aplicaciones son posibles debido a la producción de metabolitos secundarios por parte del hongo, entre los cuales destacan el ácido harziánico, alameticinas, harziandione, tricoteceno, tricodermin, harzianum A, tricholinas, peptaiboles, 6-pentil- α -pirona, gliovirina, ácido heptéldico, aldehído fórmico, gliotóxina y viridina. Además, las cepas más estudiadas incluyen *T. harzianum* T22 y P66, *T. atroviride* S361, *T. virens*, *T. pertersensii*, *T. hamatum*, así como, las cepas *T. reesei* QM6a y RUT C-30 (modelos metabólicos) y *T. lignorum* UAMH 50681. Todos estos beneficios son posibles gracias a la producción de estos compuestos químicos, así como a la facilidad de producción controlada y a la adaptabilidad de las especies de este género, lo cual las convierte en una estrategia eficiente para el beneficio económico, ambiental y farmacéutico. En el presente documento se discuten las diversas aplicaciones de *Trichoderma*, sus metabolitos más relevantes y las cepas más estudiadas en los ámbitos agrícola, alimentario y farmacéutico.

Palabras claves: Actividad biológica, biocontrolador, biofábrica, compuestos volátiles, conservación de alimentos, crecimiento vegetal.

Abstract

The fungal genus *Trichoderma* spp. has generated great interest in research and industry due to its versatility. Its cosmopolitan distribution and rapid growth make it a biofactory of chemical compounds with relevance in agriculture, pharmaceuticals and the food industry. In agriculture, *Trichoderma* acts as a biocontroller, plant growth promoter and degrader of lignocellulosic materials, contributing significantly to the improvement of soil health and quality and being a crucial strategy to cope with the effects of climate change. In pharmacology, its anti-cancer, anti-inflammatory and anti-ageing properties are fundamental for the development and formulation of pharmaceuticals, functional foods and nutraceuticals. Furthermore, in addition, in the food industry, it stands out for its

antioxidant and antifungal functions, essential for food preservation and safety. These applications are possible due to the production of secondary metabolites by the fungus, including harzanic acid, alamethicins, harziandione, trichothecene, trichodermin, harzianum A, tricholins, peptaibols, 6-pentyl- α -pyrone, gliovirin, heptadecanoic acid, formic aldehyde, glyoxin and viridin. In addition, the most studied strains include *T. harzianum* T22 and P66, *T. atroviride* S361, *T. virens*, *T. pertersensii*, *T. hamatum*, as well as *T. reesei* strains QM6a and RUT C-30 (metabolic models) and *T. lignorum* UAMH 50681. All these benefits are possible thanks to the production of these chemical compounds, as well as the ease of controlled production and the adaptability of the species of this genus, which makes them an efficient strategy for economic, environmental and pharmaceutical benefit. This paper discusses the various applications of Trichoderma, its most relevant metabolites and the most studied strains in the agricultural, food and pharmaceutical fields.

Keywords: biocontroller, biofactory, biological activity, food preservation, plant growth, volatile compounds.

Introducción

Los hongos del género *Trichoderma* spp. actúan como endófitos en las plantas, demostrando ser auténticos bioquímicos capaces de sintetizar una variedad de metabolitos secundarios MS, con aplicaciones significativas en la agricultura, la industria farmacéutica y la producción de alimentos (Hernández-Ochandía et al., 2015). Asimismo, son verdaderos polifacéticos en el mundo microbiano, considerados cosmopolitas debido a su amplia distribución en diversos ambientes, como suelos, madera en descomposición y fuentes de agua, incluyendo agua de mar, como es el caso de *T. citrinoviride* A-WH-20-3 y *T. harzianum* X-5 y *T. lentiforme* aislada de manglares (Hernández-Melchor et al., 2019; Yin et al., 2023). Su versatilidad también se manifiesta en la producción de enzimas, compuestos promotores de crecimiento vegetal y compuestos volátiles (Hernández-Melchor et al., 2019; Patil et al., 2016; Rashad & Abdel-Azeem, 2020; Soto Alanis et al., 2017). Para la producción a gran escala de estos compuestos se usan biofábricas, producción bajo condiciones controladas, como en el caso de *Trichoderma*, que se utiliza para expresar proteínas y rutas metabólicas heterólogas con aplicaciones farmacéuticas e industriales (Hernández-Melchor et al., 2019).

Hasta 2023, se han identificado alrededor de 200 compuestos derivados de *Trichoderma* spp., incluyendo terpenoides, policétidos y péptidos, entre otros (Hernández-Melchor et al., 2019; Lakhdari et al., 2023; Stoppacher et al., 2010). Entre los principales MS producidos por *Trichoderma* se encuentran: ácido harziánico, alameticinas, harziandione, tricoteceno, tricondermin, harzianum A, tricholinas, peptaiboles, 6-pentil- α -pirona, gliovirina, ácido heptéldico, aldehído fórmico, gliotóxina y viridina (Mesa Vanegas et al., 2020).

La funcionalidad y producción de los MS en el hongo *Trichoderma* depende en gran medida de la especie, la cepa y diversas variables ambientales, sugiriendo entonces que los aislados de la misma especie de *Trichoderma* pueden tener comportamientos distintos frente a un mismo organismo fitopatógeno (Michel-Aceves et al., 2020). Entre las especies más estudiadas se encuentran *T. harzianum* T22 y P66, *T. atroviride*, *T. virens*, *T. pertersensii*, *T. hamatum*, así como, las cepas *T. reesei* QM6a y RUT C-30 (modelos metabólicos), *T. lignorum* UAMH 5068 y *T. atroviride* S361 (Mesa Vanegas et al., 2020). De lo anterior, se evidencia el amplio potencial de los MS producidos por *Trichoderma* en diversas aplicaciones. Sin embargo, a pesar de los avances logrados, aún existen numerosos vacíos en el conocimiento sobre su biosíntesis y mecanismos de acción. Esta revisión compila una lista de 81 compuestos identificados en la literatura

científica reciente (2006-2023), lo cual constituye una valiosa herramienta para futuras investigaciones. Los hallazgos aquí presentados pueden contribuir al desarrollo de productos biológicos basados en *Trichoderma* para la agricultura sostenible en un contexto de cambio climático, las industrias farmacéutica y alimentaria, con base en la línea estrategia del Plan Tecnológico 2020 – 2030 del Centro de Formación Agroindustrial SENA Regional Huila.

Importancia de *Trichoderma* spp.

La diversidad metabólica de *Trichoderma* es notable, con la producción de una amplia gama de compuestos bioactivos, incluyendo péptidos no ribosomales, sideróforos, terpenos y pironas, que le confieren a *Trichoderma* propiedades antifúngicas y promotoras del crecimiento, producidos por más del 50% de las especies de este género, siendo *T. asperellum*, *T. viride*, *T. virens* y *T. harzianum* las más populares, lo que lo convierte en un organismo de gran interés en agricultura y biotecnología (Cortés Hernández et al., 2023). Estos metabolitos incluyen antioxidantes, antifúngicos, antibióticos, enzimas, azúcares, bioetanol y polifenoles, obtenidos a partir de la conversión de biomasa vegetal (Lakhdari et al., 2023; Mesa Vanegas et al., 2020; Salwan et al., 2019).

Además de sus MS, *Trichoderma* produce un conjunto enzimático que le permite llevar a cabo diversas funciones biológicas, como es el caso de las quitinasas y glucanasas, las cuales degradan la pared celular de hongos fitopatógenos, mientras que las proteasas participan en la regulación del crecimiento y desarrollo y, junto con otros factores, contribuyen a la capacidad de *Trichoderma* para promover el crecimiento vegetal y controlar enfermedades (Cortés Hernández et al., 2023). Adicionalmente, produce la enzima 1-aminociclopropano-1-carboxílico ácido desaminasa (ACCD), específicamente la especie *T. hamatum*, que interfiere en la biosíntesis del etileno y promueve el desarrollo vegetal a través de las giberelinas y a su vez *T. hamatum* actúa como potencial agente de control biológico mediante la expresión de sus MS (Brotman et al., 2013).

Dentro de este género, se encuentran compuestos llamados peptaiboles, como las tricorzaninas y tricovirinas, junto con la enzima peptaibol sintetasa. En 1932, se aislaron los primeros MS de *Trichoderma*, específicamente de la cepa *T. lignorum* UAMH 5068, siendo estos compuestos el viridino y la gliotoxina, ambos con actividad fungicida (Mesa Vanegas et al., 2020). Estos compuestos han captado la atención de científicos e investigadores debido a su potencial para formular nuevos productos beneficiosos para la salud, con una mayor vida útil, y por su importancia en la implementación de

estrategias ecoeficientes amigables con los ecosistemas, gracias a sus actividades bioactivas (González-León et al., 2022).

Metabolitos secundarios (MS) de importancia en la agricultura y biotecnología

Actualmente, la agricultura convencional enfrenta serios problemas medioambientales debido al uso indiscriminado de agroquímicos para controlar fitopatógenos, lo que provoca el deterioro de los suelos (afectando su calidad y salud) y la contaminación de fuentes hídricas, lo que conduce a la eutrofización (Hernández-Melchor et al., 2019; Reyes Palomino & Cano Ccoa, 2022). En este ámbito, *Trichoderma* spp. se ha consolidado como un aliado natural en la lucha contra los patógenos de las plantas. Estos hongos secretan una variedad de metabolitos con propiedades nematicidas, antibióticas, y antimicrobianas, inhibiendo el crecimiento de otros microorganismos y actuando como micoparásitos al debilitar y destruir hongos fitopatógenos (d'Errico et al., 2022; Z. Yang et al., 2012; Z. S. Yang et al., 2010). Además, estimula el crecimiento vegetal al mejorar la absorción de nutrientes y aumentar la tolerancia al estrés ambiental (Hernández-Melchor et al., 2019). También desempeña un papel crucial como agente biorremediador, adsorbiendo metales pesados y contribuyendo a la mitigación de la contaminación ambiental (Lakhdari et al., 2023; Mesa Vanegas et al., 2020; Pesántez & Castro, 2016).

Los MS producidos por *Trichoderma* spp. desempeñan un papel fundamental en la agricultura y la biotecnología, debido a que estos tienen múltiples funciones, como el biocontrol (Cruz Cardeñoso et al., 2015) y la supresión de patógenos mediante actividades antimicrobianas (antifúngicas, antibacterianas y antimicroalgas) (Chiboga P. et al., 2015), la promoción del crecimiento vegetal a través de reguladores del crecimiento y la degradación de residuos lignocelulósicos, su uso de compuestos volátiles y no volátiles lo cual lo convierte en un aliado valioso para el control de patógenos y la sostenibilidad del suelo (Hernández-Melchor et al., 2019).

Bio-control y supresión de patógenos

Trichoderma es ampliamente utilizado en la lucha contra hongos fitopatógenos. Su eficacia se basa en la síntesis de compuestos antimicrobianos y su empleo mediante mecanismos como antibiosis, parasitismo y competencia por espacio y nutrientes (Hernández-Melchor et al., 2019). En particular, dentro del contexto de la antibiosis, *Trichoderma* produce una variedad de sustancias en la zona de la rizosfera, entre las

cuales se destacan los compuestos antimicrobianos o antagonicos (López-Ferrer et al., 2017), que inhiben directamente el crecimiento de patógenos, incluyendo entre estos, proteínas, enzimas y antibióticos que actúan contra otros hongos (Cortés Hernández et al., 2023). Asimismo, induce respuestas locales y en algunos casos, la necrosis en los patógenos circundantes, mostrando ciertos productos derivados de los genes de virulencia de *Trichoderma* que actúan como activadores de los mecanismos de defensa en las plantas (González-León et al., 2022). Ataca directamente a otros hongos patógenos compitiendo por espacio, nutrientes y liberando enzimas que degradan las paredes celulares de los patógenos, mediante el mecanismo micoparasitismo, como es el caso de la fuerte actividad antifúngica mostrada por *T. harzianum* contra los hongos *Sclerotinia sclerotiorum*, *Alternaria* sp., y *Fusarium solani* (Mesa Vanegas et al., 2020). *Trichoderma* también es capaz de producir elicitores que inducen la defensa vegetal contra patógenos e insectos (Cortés Hernández et al., 2023). Dentro de esta función, los principales MS de *Trichoderma* son el ácido harziánico, acetaldehídos, alamicinas, tricholinas, peptaiboles, antibióticos, massolactona, gliovirina, glisoperonas, ácido heptéldico, aldehído fórmico, gliotoxina, harzianolide (PUBCHEM, 2024m), konigininas, 6-Pentyl-2Hpyran-2-one, trichokoninas, viridina, ácido salicílico, ácido jazmónico y compuestos orgánicos volátiles (COVs) entre otros (Cortés Hernández et al., 2023; Keswani et al., 2014) (tabla 1).

Promoción del crecimiento vegetal

Este hongo simbiote, produce compuestos que pueden promover el crecimiento y desarrollo de las plantas, llamados promotores o reguladores de crecimiento vegetal (CPGV), como es el caso de los elicitores, auxinas, geberelinas y ácidos orgánicos como el glucónico, fumárico, y cítrico, los cuales benefician a las plantas estimulando el crecimiento de raíces y brotes mediante la disminución del pH del suelo y propiciando la solubilidad de fosfatos, magnesio Mg, hierro Fe y manganeso Mn, vitales para el metabolismo vegetal, optimizando así, la tolerancia al estrés abiótico, y a su vez, mejorando la salud y fertilidad del suelo, así como, la productividad de los cultivos (Cortés Hernández et al., 2023; Hernández-Melchor et al., 2019). Por otra parte, este hongo ha demostrado ser una alternativa ante el estrés hídrico por carencia de agua, debido a la liberación de ácido trans-abscísico, una hormona procedente de isoprenoide que regula el cierre estomático impidiendo la pérdida del agua y, por ende, la eliminación de humedad en las plantas (Cortés Hernández et al., 2023).

Degradación de residuos lignocelulósicos

Trichoderma es un hongo metabólicamente versátil, siendo capaz de usar una amplia variedad de biomasa vegetal, incluyendo oligosacáridos como sucralosa, rafinosa y polisacáridos como la celulosa (por sus enzimas con propiedades celulolíticas) (Hernández-Melchor et al., 2019), inulina, pectina y almidón, así como sustratos más complejos como suero de leche, hidrocarburos del petróleo, plaguicidas, siendo capaz incluso de utilizar y degradar residuos lignocelulósicos constituidos de celulosa (40-55%), hemicelulosa (25-50%), y lignina (10-40%), para la generación de metabolitos útiles como el etanol (Fernandes Primo, 2020; Hernández-Melchor et al., 2019).

Biorremediación

La biorremediación de suelos contaminados con xenobióticos, compuestos químicos extraños al medio ambiente, como pesticidas y metales pesados, debido a su capacidad de degradar compuestos tóxicos y mejorar la calidad del suelo, son cruciales para la agricultura sostenible y la protección del medio ambiente. Es de tener en cuenta que el MS (3H)-benzoxazolinone, ha demostrado una fuerte actividad en el control de arvenses por lo que es considerado un herbicida (Keswani et al., 2014) Tabla 1.

Metabolitos secundarios de importancia en la industria alimentaria

En la industria alimentaria, los MS de *Trichoderma* se utilizan como conservantes naturales, prolongando la vida útil de los alimentos y mejorando su calidad sensorial y nutricional (Lakhdari et al., 2023). Dentro de este contexto, se destaca por sus propiedades antimicrobianas y antioxidantes, lo que lo convierte en un ingrediente clave en el desarrollo de tecnologías de conservación de alimentos. Por ejemplo, enzimas hidrolíticas, como las celulasas y xilasas, se utilizan en la producción de productos alimenticios, en la formulación de biofilms, en los recubrimientos comestibles y en la producción de compuestos con propiedades funcionales, como antioxidantes y saborizantes naturales (García Díaz et al., 2022). Además, los compuestos bioactivos como los flavonoides, terpenoides y alcaloides pueden ser usados en la formulación de alimentos funcionales, ofreciendo mayor vida útil, efectos saludables, así como ecoeficiencia al hacer uso de biofábricas para su producción controlada (Hernández-Melchor et al., 2019). Dado que las micotoxinas producidas por

Alternaria spp. contaminan una amplia variedad de alimentos, desde frutas y hortalizas hasta productos procesados, es necesario controlar la presencia de este hongo en los cultivos (Pavón Moreno et al., 2012). *Trichoderma* se presenta como una alternativa biológica para reducir la contaminación por micotoxinas, mejorando así la calidad y seguridad de los alimentos que consumimos (Hernández-Melchor et al., 2019)

Metabolitos secundarios de importancia en la industria farmacéutica

Los MS han demostrado ser una fuente invaluable de compuestos bioactivos con aplicaciones en la industria farmacéutica. Dentro de este campo, destacan por su actividad antimicrobiana (antibacteriana y antifúngica), propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, así como por su potencial anticancerígeno (Lakhdari et al., 2023; Mesa Vanegas et al., 2020; Salwan et al., 2019).

En este contexto, *Trichoderma* se destaca como un organismo productor de una amplia gama de compuestos de interés (polifenoles, flavonoides y alcaloides) con propiedades antimicrobianas, antioxidantes y anticancerígenas (Mesa Vanegas et al., 2020). Su potencial para la biosíntesis de moléculas bioactivas lo posiciona como una herramienta en la búsqueda de nuevos fármacos (Lakhdari et al., 2023; Mesa Vanegas et al., 2020; Salwan et al., 2019). La gliotoxina (Tabla 1) es un metabolito secundario de particular interés debido a su amplia gama de actividades biológicas. Entre sus propiedades destacan la inmunosupresión, la inducción de apoptosis en células inmunitarias, la inhibición de la farnesil transferasa y del proteasoma 20S, confiriéndole a la gliotoxina características antibióticas, antifúngicas, antivirales y antitumorales. (Keswani et al., 2014; Mesa Vanegas et al., 2020). Además, se ha evaluado *in vitro* la capacidad de *T. harzianum* para producir MS con potencial biotecnológico. Los compuestos derivados de esta especie podrían reemplazar a los sintéticos en la formulación de diversos productos, considerando la eficacia demostrada de esta cepa contra patógenos como *S. sclerotiorum*, *Alternaria* sp. y *F. solani*. (Lakhdari et al., 2023). La exposición a micotoxinas producidas por *Alternaria* sp. puede causar diversas enfermedades en humanos y animales, incluyendo rinitis alérgica, asma y rinosinusitis crónica, debido a que estas toxinas han demostrado tener efectos nocivos a nivel celular, incluyendo genotoxicidad, mutagenicidad, carcinogenicidad y citotoxicidad (Pavón Moreno et al., 2012). La queratitis fúngica causada por *F. solani* (Mena et al., 2015) es una infección ocular grave que requiere un tratamiento especializado. Por otro lado, el peptaibol paracelsina A, aislado de *T. reesei* y *T. asperellum*, ha demostrado una

prometedora actividad antibiótica contra bacterias Gram positivas (Michel-Aceves et al., 2020), como se muestra en la Tabla 1.

Los anteriores hallazgos sugieren un potencial terapéutico para el tratamiento de infecciones bacterianas. Unos de los compuestos más interesantes encontrados dentro de esta revisión, son las konigininas A – B, a las cuales se les demostró actividad antimicrobiana, anticancerígena, inmunosupresora y antiofídica, siendo esta última de suma importancia a la hora de tratar mordeduras de serpientes (Fernandes Primo, 2020).

Tabla 1.

*MS producidos por el género **Trichoderma** spp. con sus respectivas fórmulas y especies.*

No.	Nombre	Fórmula	Especies de <i>Trichoderma</i>	Referencia
1	(10E)-isocyclonerotriol	C15H28O3	<i>T. citrinoviride</i> A-WH-20-3	(Zhang et al., 2021)
2	(10Z)-isocyclonerotriol	C15H28O3	<i>T. citrinoviride</i> A-WH-20-3	(Zhang et al., 2021)
3	(3H)-benzoxazolinone	C7H5NO2	<i>Trichoderma</i> spp.	(Keswani et al., 2014)
4	(Methyldisulfanyl) methane	C4H12S3	<i>Trichoderma</i> spp.	(PUBCHEM, 2024n; Salwan et al., 2019)
5	(Z)-11-Hexadecenal	C16H30O	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
6	2-heptanone	C7H14O	<i>T. atroviride</i> ATCC 74058	(PUBCHEM, 2024c; Stoppacher et al., 2010)
7	11-methoxy-9-cyclone- ren-3,7-diol	C16H30O3	<i>T. harzianum</i> X-5	(Zhang et al., 2021)
8	14-Methyl-8-hexadecyn- 1-ol	C17H32O	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
9	1-octen-3-ol	C8H16O	<i>T. atroviride</i> ATCC 74058	(Stoppacher et al., 2010)
10	3-Carene	C10H16	<i>Trichoderma</i> spp.	(Salwan et al., 2019)
11	2-Methoxy-3- methylpyrazine	C6H8N2O	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
12	Trichodermol	C15H22O3	<i>T. asperellum</i>	(Cheng et al., 2009)
13	3-Méthyl mercaptopropanal	C4H8OS	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)

No.	Nombre	Fórmula	Especies de <i>Trichoderma</i>	Referencia
14	6-pentil-a-piron (6PP)	C10H14O2	<i>T. harzianum</i> M10, <i>T. atroviride</i> P1, <i>T. harzianum</i> (T12)	(Mesa Vanegas et al., 2020)
15	3-octanol	C8H18O	<i>T. atroviride</i> ATCC 74058	(Stoppacher et al., 2010)
16	8-acoren-3,11-diol	C15H26O2	<i>T. harzianum</i> X-5	(Zhang et al., 2021)
17	Bisorbicilinol	C28H32O8	<i>Trichoderma</i> spp.	(Fernandes Primo, 2020; PUBCHEM, 2024d)
18	p-Cymene	C10H14	<i>Trichoderma</i> spp.	(Salwan et al., 2019)
19	Allyl 2-Nitrophenylpyruvate Oxime	C12H12N2O5	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
20	Aspergillazine A	C20H20N2O8S	<i>T. harzianum</i> D13	(Sun et al., 2016; Zhao et al., 2020)
21	9,17-Octadecadienal, (Z)	C18H32O	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
22	Biperiden	C21H29NO	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
23	Methyl stearate	C19H38O2	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
24	Cedrene	C15H24	<i>Trichoderma</i> spp.	(PUBCHEM, 2024b; Salwan et al., 2019)
25	Pentadecanoic acid	C15H30O2	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
26	Koninginin U	C12H18O3	<i>T. koningiopsis</i> QA-3	(Fernandes Primo, 2020)
27	Koninginin V	C20H34O6	<i>T. koningiopsis</i> QA-3	(Fernandes Primo, 2020)
28	Limonene/(+)-Limonene	C10H16	<i>Trichoderma</i> spp.	(Salwan et al., 2019)
29	Linoleic acid	C18H32O2	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
30	Monolinolein TMS	C27H54O4Si2	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
31	Microsphaeropsis B	C15H20O4	<i>Trichoderma</i> sp. 307	(Zhang et al., 2021)
32	Nafuredin C	C22H34O4	<i>T. harzianum</i> D13	(Zhao et al., 2020)
33	Heptelídic acid/Koningic acid	C15H20O5	<i>T. koningii</i> M3947	(Mesa Vanegas et al., 2020)
34	Hexan-1-ol	C6H14O	<i>Trichoderma</i> spp.	(Salwan et al., 2019)
35	Hexanoic acid/caproic acid	C6H12O2	<i>Trichoderma</i> spp.	(Salwan et al., 2019)
36	Methyl linolelaidate	C19H34O2	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)

No.	Nombre	Fórmula	Especies de <i>Trichoderma</i>	Referencia
37	Massoia lactone	C10H16O2	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
38	Methyl dihydrojasmonate	C13H22O3	<i>Trichoderma</i> spp.	(PUBCHEM, 2024i; Salwan et al., 2019)
39	Emodin	C15H10O5	<i>T. polysporum</i> , <i>T. viride</i>	(Keswani et al., 2014; PUBCHEM, 2024l)
40	Camphor	C10H16O	<i>Trichoderma</i> spp.	(PUBCHEM, 2024e; Salwan et al., 2019)
41	Myrcene	C10H16	<i>Trichoderma</i> spp.	(PUBCHEM, 2024j; Salwan et al., 2019)
42	Nafuredin A	C22H32O4	<i>T. harzianum</i> D13.	(Zhao et al., 2020)
43	Homoharzianic acid	C20H29NO6	<i>Trichoderma</i> spp.	(Fernandes Primo, 2020; PUBCHEM, 2024h)
44	Gliotoxin	C13H14N2O4S2	<i>T. lignorum</i> UAMH 5068	(Keswani et al., 2014; Mesa Vanegas et al., 2020)
45	Erucylamide	C22H43NO	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
46	Ethyl linoleate	C20H36O2	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
47	Ethylene	C2H4	<i>T. hamatum</i>	(Ghisalberti EL & Rowland CY, 1993; González-León et al., 2022)
48	Ethylene sulfate	C2H4O4S	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
49	Carbolic acid/Fenol	C6H6O	<i>Trichoderma</i> spp.	(PUBCHEM, 2024a; Salwan et al., 2019)
50	Copaene	C15H24	<i>Trichoderma</i> spp.	(Salwan et al., 2019)
51	Paracelsin A	C88H145N23O24	<i>T. reseei</i> Simmon, <i>T. asperellum</i>	(Michel-Aceves et al., 2020; PUBCHEM, 2024f; Ritieni A et al., 1995)
52	Palmitic acid, methyl ester	C17H34O2	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
53	Octacosane	C28H58	<i>Trichoderma</i> spp.	(PUBCHEM, 2024k; Salwan et al., 2019)
54	Cyclonerodiol	C15H28O2	<i>T. harzianum</i>	(Keswani et al., 2014; PUBCHEM, 2024f)
55	Nafuredin C	C22H34O4	<i>T. harzianum</i> D13	(Zhao et al., 2020)
56	Harzianoic acid A	C14H20O5	<i>T. harzianum</i> LZDX-32-08	(Zhang et al., 2021)
57	Glycerol 1-oleate, diacetate	C25H48O8	<i>T. harzianum</i>	(Lakhdari et al., 2023)
58	Harzianic acid (HA)	C19H27NO6	<i>T. harzianum</i> M10, <i>T. atroviride</i> P1, <i>T. harzianum</i> (T12)	(García et al., 2006)
59	(-) trichodermadione A	Sin información	<i>T. atroviride</i> S361	(Kong et al., 2018)

No.	Nombre	Fórmula	Especies de <i>Trichoderma</i>	Referencia
60	Harzianolide	C13H18O3	<i>T. Cerinum</i> , <i>T. harzianum</i>	(Keswani et al., 2014)
61	Nonanal	C9H18O	<i>Trichoderma</i> spp.	(PUBCHEM, 2024g; Salwan et al., 2019)
62	Harzianol F	C20H32O2	<i>T. atroviride</i> B7 de <i>C. coccinea</i> var. <i>Mollis</i>	(Zhang et al., 2021)
63	Harzianol G	C20H34O2		(Zhang et al., 2021)
64	Harzianol H	C20H34O2		(Zhang et al., 2021)
65	Harzianol I	C20H34O		(Zhang et al., 2021)
66	Harzianol J	C20H30O2		(Zhang et al., 2021)
67	Himachalene	C15H24	<i>Trichoderma</i> spp.	(Salwan et al., 2019)
68	Harzianum A	C23H28O6	<i>T. harzianum</i> , <i>T. arundinaceum</i> , <i>T. brevicompactum</i> (CGMCC19618)	(Sun et al., 2016)
69	Harziphilone	C15H18O4	<i>T. harzianum</i>	(Keswani et al., 2014; PUBCHEM, 2024f)
70	Heptane	C7H16	<i>Trichoderma</i> spp.	(Salwan et al., 2019)
71	Koninginin A, B, C	C16H28O4	<i>T. koningii</i> , <i>T. koningiopsis</i> , <i>T. neokoningii</i> , <i>T. aureoviride</i> , <i>T. ovalisporum</i>	(Fernandes Primo, 2020)
72	koninginin D, F, H	C16H26O5		(Fernandes Primo, 2020)
73	koninginin E	C16H26O4		(Fernandes Primo, 2020)
74	Koninginin G	C16H30O5		(Fernandes Primo, 2020)
75	Koninginin I, J, S	C16H24O5		(Fernandes Primo, 2020)
76	Koninginin K	C16H24O6		(Fernandes Primo, 2020)
77	Koninginin L, M, N, O	C16H24O4		(Fernandes Primo, 2020)
78	Koninginin P	C16H26O5	<i>Trichoderma</i> spp.	(Fernandes Primo, 2020)
79	Koninginin Q	C17H28O5	<i>Trichoderma</i> spp.	(Fernandes Primo, 2020)
80	Koninginin R	C18H28O6	<i>Trichoderma</i> spp.	(Fernandes Primo, 2020)
81	Koninginin T	C17H28O6	<i>T. koningiopsis</i> QA-3	(Fernandes Primo, 2020)

Además, nueve de los MS encontrados presentan actividad antifúngica, siendo los más relevantes Gliotoxina, 6-pentil- α -piron (6PP) y el ácido harziánico, también se encontraron 6 promotores y reguladores del crecimiento de plantas, entre estos los más relevantes vuelven a ser 6-pentil- α -piron (6PP) y el ácido harziánico junto con el etileno, la cual es una hormona clave en la regulación de diversos procesos de crecimiento y desarrollo como la maduración de fruta, la senescencia de hojas y respuesta al estrés (Tabla 1).

Además de los compuestos ya mencionados, *Trichoderma* produce otros MS con actividad antimicrobiana y defensa vegetal, como son los polifenoles, flavonoides, taninos, alcoholes, y compuestos volátiles, diterpenos tetracíclicos (harziandiona) y sesquiterpenos (Hernández-Melchor et al., 2019). Dentro de los MS mas importantes producidos por *Trichoderma* están, el ácido harziánico y el 6-pentil-a-piron (6PP) los cuales han evidenciado propiedades antifúngicas, dónde *T. harzianum* (T12) mostró una alta capacidad antagónica contra los hongos *Rhizoctonia solani*, *S. cepivorum*, *Sclerotium rolsii*, *Fusarium* sp., *P. brassicae* y *Phytohthora* sp., logrando reducciones de la incidencia de estas enfermedades en dependencia de ellas y de las condiciones ambientales (Tabla 1).

T. harzianum T22 y *T. harzianum* P66 también mostraron control de la enfermedad causada por *R. solani*, este tipo de MS muestra dos de las actividades biológicas relevantes de *Trichoderma*, su actividad antioxidante y antifúngica, lo que le confiere un rol de alta importancia a la hora de generar productos benéficos para la agricultura, la salud, inocuos y con una vida útil garantizada. Otros compuestos con actividades biológicas de interés: (-) trichodermadiona A, cepa *T. atroviride* S361, el paracelsin A de *T. reseei* Simmon y *T. asperellum* (Kong et al., 2018; PUBCHEM, 2024k).

La Tabla 1 muestra un compilado con 81 metabolitos secundarios de interés, entre los cuales se destacan, gracias a sus propiedades, los MS ácido harziánico, alameticinas, harziandione, tricoteceno, tricodermin, harzianum A, tricholinas, peptaiboles, 6-pentil- α -pirona, gliovirina, ácido heptéldico, aldehído fórmico, gliotóxina y viridina los cuales se caracterizan por sus actividades de antibiosis y micoparasitismo. Esta tabla aporta información básica de cada MS que ha sido reportada con alguna actividad biológica a partir del género de hongos *Trichoderma*, no obstante, esta lista representa una riqueza de recursos bioactivos diversos que sugieren que este género es extremadamente versátil y que se adapta a diferentes entornos. La variedad de actividades biológicas reportadas, desde propiedades antimicrobianas hasta los efectos en el crecimiento vegetal, destaca la importancia de

estos en múltiples campos. Como se trató anteriormente, algunos de los MS reportados podrían ser la base para el desarrollo de nuevos medicamentos y tratamientos, a su vez, su potencial como agentes de biocontrol y promotores del crecimiento vegetal puede revolucionar prácticas agrícolas sostenibles, por último, podría enriquecer productos funcionales con beneficios para la salud.

Conclusiones

El género *Trichoderma* spp. emerge como un organismo modelo en el campo de la biotecnología, con un amplio rango de aplicaciones en agricultura, los alimentos y la salud. Su capacidad para producir metabolitos secundarios bioactivos y su papel como agente de biocontrol lo convierten en una herramienta prometedora para el desarrollo de soluciones sostenibles y eficaces para combatir enfermedades de las plantas y promover el crecimiento vegetal.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia, ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este documento en este artículo.

Agradecimientos

Los autores brindan su continuo reconocimiento y agradecimiento al Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del SENA, SENNOVA, por financiar este artículo de investigación mediante el proyecto de investigación aplicada y semilleros de investigación SGPS 12255 - 2024.

Declaración de la IA Generativa y las tecnologías asistidas por IA en el proceso de redacción

Durante la preparación de este artículo, los autores utilizaron Microsoft Copilot (GPT-4) para la edición lingüística del manuscrito. Tras utilizar esta herramienta/servicio, los autores revisaron y editaron el contenido según fuera necesario y asumieron la plena responsabilidad del contenido de la publicación.

Referencias bibliográficas

- Brotman, Y., Landau, U., Cuadros-Inostroza, Á., Takayuki, T., Fernie, A. R., Chet, I., Viterbo, A., & Willmitzer, L. (2013). Trichoderma-Plant Root Colonization: Escaping Early Plant Defense Responses and Activation of the Antioxidant Machinery for Saline Stress Tolerance. *PLoS Pathogens*, 9(3). HYPERLINK “<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003221>”<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1003221>
- Cheng, J. L., Zhou, Y., Lin, F. C., Zhao, J. H., & Zhu, G. N. (2009). Trichodermol (4-hydroxy-12,13-epoxy-trichothec-9-ene). *Acta Crystallographica Section E: Structure Reports Online*, 65(11). <https://doi.org/10.1107/S1600536809044080>
- Chiboga P., H., Gómez B., G., & Garcés E., K. (2015). Protocolos para formulación y aplicación del bio-insumo: *Trichoderma spp.* para el control biológico de enfermedades. *Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura - OEA*.
- Cortés Hernández, F. del C., Alvarado Castillo, G., & Sánchez Viveros, G. (2023). Trichoderma spp., una alternativa para la agricultura sostenible: una revisión. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 25(2), 62–76. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v25n2.111384>
- Cruz Cardeñosa, M., Matín, R., Chamorro, I., Rubio, B., Alonso, A., Carrero, I., Pardal, J. A., Hermosa, R., de Medeiros, H., Poveda, J., Pérez, E., & Monte, E. (2015). Trichoderma y su aplicación en agricultura como agente de control biológico y como hongo beneficioso para las plantas. *Microbiología de plantas. Instituto Hispano-Luso de Investigaciones Agrarias CIALE*, 54–55.
- d’Errico, G., Greco, N., Vinale, F., Marra, R., Stillittano, V., Davino, S. W., Woo, S. L., & D’Addabbo, T. (2022). Synergistic Effects of Trichoderma harzianum, 1,3 Dichloropropene and Organic Matter in Controlling the Root-Knot Nematode *Meloidogyne incognita* on Tomato. *Plants*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/plants11212890>
- Fernandes Primo, R. K. (2020). *Estudo químico e biológico de linhagens de Trichoderma da Amazônia*.
- García Díaz, E., Valenzuela_Quintanar, A. I., Troncoso-Rojas, R., Gonzalez-Mendoza, D., & Tiznado-Hernández, M. E. (2022). Metabolitos Bioactivos de Trichoderma para el Control de Hongos Postcosecha en Frutas y Hortalizas. Capítulo 14. Metabolitos bioactivos de Trichoderma para el control de hongos postcosecha en frutas y hortalizas. En L. C. Montoya Ballesteros, M. E. Tiznado Hernández, T. J. Madera Santana, J. F. Ayala Zabala, & G. A. González Aguilar (Eds.), *Tecnología, Ingeniería y Biotecnología de Alimentos de origen vegetal: aprovechamiento de sus subproductos*.

- García, R., Riera, R., Zambrano, C., & Gutiérrez, L. (2006). Desarrollo de un fungicida biológico a base de una cepa del hongo *Trichoderma harzianum* proveniente de la región andina venezolana. *Fitosanidad*, 10(2), 115-121. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209116102005>
- Ghisalberti EL, & Rowland CY. (1993). Antifungal metabolites from *Trichoderma harzianum*. *Journal of Natural Products*, 56(10), 1799–1804. <https://doi.org/10.1021/np50100a020>.
- González-León, Y., Ortega-Bernal, J., Anducho-Reyes, M. A., Mercado-Flores, Y., González-León, Y., Ortega-Bernal, J., Anducho-Reyes, M. A., & Mercado-Flores, Y. (2022). *Bacillus subtilis* y *Trichoderma*: Características generales y su aplicación en la agricultura. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.520>
- Hernández-Melchor, D. J., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2019). *Trichoderma*: importancia agrícola, biotecnológica, y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(1), 98-112. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000205>
- Hernández-Ochandía, D., Rodríguez, M. G., Peteira, B., Miranda, I., Arias, Y., & Martínez, B. (2015). Efecto de cepas de *Trichoderma asperellum* Samuels, Lieckfeldt y Nirenberg sobre el desarrollo del tomate y *Meloidogyne incognita* (Kofoid Y White) Chitwood. *Rev. Protección Veg*, 30(2), 139–147. https://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1010-27522015000200008&script=sci_arttext&tlng=en
- Keswani, C., Mishra, S., Sarma, B. K., Singh, S. P., & Singh, H. B. (2014). Unraveling the efficient applications of secondary metabolites of various *Trichoderma* spp. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(2), 533–544. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5344-5>
- Kong, Z., Jing, R., Wu, Y., Guo, Y., Geng, Y., Ji, J., Qin, L., & Zheng, C. (2018). *Trichoderma* A and B from the solid culture of *Trichoderma atroviride* S361, an endophytic fungus in *Cephalotaxus fortunei*. *Fitoterapia*, 127, 362–366. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fitote.2018.04.004>
- Lakhdari, W., Benyahia, I., Bouhenna, M. M., Bendif, H., Khelafi, H., Bachir, H., Ladjal, A., Hammi, H., Mouhoubi, D., Khelil, H., Alomar, T. S., AlMasoud, N., Boufafa, N., Boufahja, F., & Dehliz, A. (2023). Exploration and Evaluation of Secondary Metabolites from *Trichoderma harzianum*: GC-MS Analysis, Phytochemical Profiling, Antifungal and Antioxidant Activity Assessment. *Molecules*, 28(13). <https://doi.org/10.3390/molecules28135025>

- López-Ferrer, U. del C., Brito-Vega, H., López-Morales, D., Salaya-Dominguez, J. M., & Gómez-Méndez, E. (2017). PAPEL DE Trichoderma EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES - CACAOTAL COMO UN AGENTE ANTAGÓNICO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(1), 91–100. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93950595003>
- Mena, R., Carrasco, E., Godoy-Martínez, P., Stchigel, A. M., Cano-Lira, J. F., & Zaror, L. (2015). Un caso de queratitis micótica por Fusarium solani en Valdivia, Chile. *Revista Iberoamericana de Micología*, 32(2), 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2013.12.001>
- Mesa Vanegas, A. M., Marín Pavas, D. A., & Calle Osorno, J. (2020). Metabolitos secundarios en Trichoderma spp. y sus aplicaciones biotecnológicas agrícolas. *Actualidades Biológicas*, 41(111), 1–13. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v41n111a02>
- Michel-Aceves, A. C., Hernández-Morales, Javier., Toledo-Aguilar, Rocío., Sabino López, J. E., & Romero-Rosales, Teolincacihuatl. (2020). CAPACIDAD ANTAGÓNICA DE Trichoderma spp. NATIVA CONTRA Phytophthora parasitica Y Fusarium oxysporum AISLADOS DE CULTIVOS DE JAMAICA. *SciELO. Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(3).
- Patil, A. S., Patil, S. R., & Paikrao, H. M. (2016). Trichoderma Secondary Metabolites: Their Biochemistry and Possible Role in Disease Management. En D. K. Choudhary & A. Varma (Eds.), *Microbial-mediated Induced Systemic Resistance in Plants* (pp. 69–102). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0388-2_6
- Pavón Moreno, M. Á., González Alonso, I., Martín de Santos, R., & García Lacarra, T. (2012). Importancia del género Alternaria como productor de micotoxinas y agente causal de enfermedades humanas. En *Nutrición Hospitalaria* (Vol. 27, Número 6, pp. 1772–1781). <https://doi.org/10.3305/nh.2012.27.6.6017>
- Pesántez, M., & Castro, R. (2016). Potencial de cepas de Trichoderma spp. para la biorremediación de suelos contaminados con petróleo. *Biotecnología Vegetal. Instituto de Biotecnología Vegetal*, 16(4), 251–256.
- PUBCHEM. (2024a). Carboic acid/Fenol. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Phenol>
- PUBCHEM. (2024b). Cedrene. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cedrene>

- PUBCHEM. (2024c). Compound Summary for 2-Heptanone COMPOUND_CID_8051. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2-Heptanone>
- PUBCHEM. (2024d). Compound Summary for Bisorbicilinol. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Bisorbicillinol>
- PUBCHEM. (2024e). Compound Summary for Camphor. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Camphor>
- PUBCHEM. (2024f). Compound Summary for Cyclonerodiol. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cyclonerodiol>
- PUBCHEM. (2024g). Compound Summary for Harziphilone. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Harziphilone>
- PUBCHEM. (2024h). Compound Summary for Homoharzianic acid. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Homoharzianic-acid>
- PUBCHEM. (2024i). Compound Summary for Methyl dihydrojasmonate. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methyl-dihydrojasmonate>
- PUBCHEM. (2024j). Compound Summary for Myrcene. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Myrcene>
- PUBCHEM. (2024k). Compound Summary for Paracelsin A. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/16132361>
- PUBCHEM. (2024l). Emodin. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Emodin>
- PUBCHEM. (2024m). Harzianolide. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Harzianolide>
- PUBCHEM. (2024n). (Methyldisulfanyl)methane. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information.* <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/12232>

- PUBCHEM. (2024o). Nonanal. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Nonanal>
- PUBCHEM. (2024p). Octacosane. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Octacosane>
- Rashad, Y. M., & Abdel-Azeem, A. M. (2020). Recent Progress on Trichoderma Secondary Metabolites. En A. E.-L. Hesham, R. S. Upadhyay, G. D. Sharma, C. Manoharachary, & V. K. Gupta (Eds.), *Fungal Biotechnology and Bioengineering* (pp. 281–303). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41870-0_12
- Reyes Palomino, S. E., & Cano Ccoa, D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 24(1), 53–64. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Ritieni A, Fogliano V, Nanno D, Randazzo G, Altomare C, Perrone G, Bottalico A, Maddau L, & Marras F. (1995). Paracelsin E, a new peptaibol from *Trichoderma saturnisporum*. *J Nat Prod*, 58(11), 1745–1748. <https://doi.org/10.1021/np50125a017>. PMID: 8594152.
- Salwan, R., Rialch, N., & Sharma, V. (2019). Bioactive volatile metabolites of *Trichoderma*: An overview. En *Secondary Metabolites of Plant Growth Promoting Rhizomicroorganisms: Discovery and Applications* (pp. 87–111). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5862-3_5
- Soto Alanis, K., Jiménez Hernández, N., & Chávez Avilés, M. N. (2017). Análisis del efeto de los compuestos orgánicos volátiles producidos por *Trichoderma* spp, para el biocontrol de mancha en red en *Hordeum vulgare*, ocasionada por el fitopatógeno *Dreschelera teres*. *Jóvenes en la Ciencia*, 3.
- Stoppacher, N., Kluger, B., Zeilinger, S., Krska, R., & Schuhmacher, R. (2010). Identification and profiling of volatile metabolites of the biocontrol fungus *Trichoderma atroviride* by HS-SPME-GC-MS. *Journal of Microbiological Methods*, 81(2), 187–193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mimet.2010.03.011>
- Sun, J., Pei, Y., Li, E., Li, W., Hyde, K. D., Yin, W. B., & Liu, X. (2016). A new species of *Trichoderma hypoxylon* harbours abundant secondary metabolites. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep37369>
- Yang, Z. S., Li, G. H., Zhao, P. J., Zheng, X., Luo, S. L., Li, L., Niu, X. M., & Zhang, K. Q. (2010). Nematicidal activity of *Trichoderma* spp. and isolation of an active compound.

- World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26(12), 2297–2302. <https://doi.org/10.1007/s11274-010-0410-y>
- Yang, Z., Yu, Z., Lei, L., Xia, Z., Shao, L., Zhang, K., & Li, G. (2012). Nematicidal effect of volatiles produced by *Trichoderma* sp. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 15(4), 647–650. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2012.08.002>
- Yin, Y., Tan, Q., Wu, J., Chen, T., Yang, W., She, Z., & Wang, B. (2023). The Polyketides with Antimicrobial Activities from a Mangrove Endophytic Fungus *Trichoderma lentiforme* ML-P8-2. *Marine Drugs*, 21(11). <https://doi.org/10.3390/md21110566>
- Zhang, J. L., Tang, W. L., Huang, Q. R., Li, Y. Z., Wei, M. L., Jiang, L. L., Liu, C., Yu, X., Zhu, H. W., Chen, G. Z., & Zhang, X. X. (2021). *Trichoderma*: A Treasure House of Structurally Diverse Secondary Metabolites With Medicinal Importance. En *Frontiers in Microbiology* (Vol. 12). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.723828>
- Zhao, D. L., Zhang, X. F., Huang, R. H., Wang, D., Wang, X. Q., Li, Y. Q., Zheng, C. J., Zhang, P., & Zhang, C. S. (2020). Antifungal Nafuredin and Epithiodiketopiperazine Derivatives From the Mangrove-Derived Fungus *Trichoderma harzianum* D13. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01495>