



Biocontrol de *Moniliophthora roreri* en cultivos de *Theobroma cacao* en Latinoamérica, una revisión del estado actual 2020-2023

Biocontrol of *Moniliophthora roreri* in *Theobroma cacao* crops in Latin America, a review of the current status 2020-2023

Mónica Alejandra Rodríguez-Aristizábal ¹,
María Angélica Basto-Álvarez ²,
Yohana Katherine Ojeda-Grijalba ²



DOI: 10.19053/uptc.01228420.v21.n2.2024.17938


RESUMEN: La moniliasis del cacao, causada por *Moniliophthora roreri*, es una de las principales enfermedades que limita la productividad y calidad del cacao (*Theobroma cacao* L.) en América Latina, ocasionando pérdidas que pueden superar el 80 % si no se implementa un manejo integrado. Esta revisión tuvo como objetivo sintetizar la evidencia reciente (2020-2023) sobre estrategias de biocontrol en Latinoamérica, identificando los principales agentes microbianos, su eficacia y viabilidad para el manejo sostenible de la enfermedad. Para ello, se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica y gris en bases de datos regionales e internacionales, evaluando mecanismos de acción, resultados en condiciones de laboratorio y campo, y las limitaciones para su implementación. Se identificó que hongos como *Trichoderma* spp. y bacterias como *Bacillus* spp. son los biocontroladores más estudiados, actuando mediante micoparasitismo, antibiosis e inducción de resistencia. Sin embargo, se evidencian brechas en la transferencia tecnológica, escasa validación en campo y falta de análisis económico de las estrategias. Esta revisión contribuye a orientar la investigación aplicada y las políticas de manejo integrado, destacando la necesidad de estudios comparativos y evaluaciones costo-beneficio que fortalezcan el uso del biocontrol frente a la dependencia de fungicidas químicos.


PALABRAS CLAVE: moniliasis, biocontrol, América Latina, sostenibilidad agrícola, *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp.

ABSTRACT: Cocoa moniliasis, caused by *Moniliophthora roreri*, is one of the most important diseases limiting cocoa (*Theobroma cacao* L.) productivity and quality in Latin America, causing yield losses of up to 80% without integrated management. This review aimed to synthesize recent evidence (2020–2023) on biocontrol strategies in Latin America, identifying the main microbial agents, their effectiveness, and their feasibility for sustainable disease management. A systematic literature search of scientific and gray sources from regional and international databases was conducted, evaluating mechanisms of action, performance under laboratory and field conditions, and barriers to implementation. Findings show that fungi such as *Trichoderma* spp. and bacteria such as *Bacillus* spp. are the most studied biocontrol agents, acting through mycoparasitism, antibiosis, and resistance induction. However, significant gaps remain in technology transfer, large-scale field validation, and economic feasibility assessments. This review contributes to guiding applied research and integrated management policies, emphasizing the need for comparative studies and cost–benefit analyses to strengthen biocontrol adoption and reduce reliance on chemical fungicides.

KEYWORDS: moniliasis, biocontrol, Latin America, agricultural sustainability, *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp.

FECHA DE RADICACIÓN: 30 de julio de 2024 FECHA DE ACEPTACIÓN: 09 de septiembre de 2024 FECHA DE PUBLICACIÓN: 31 de diciembre de 2024

¹ Universidad Central , Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Bogotá, Colombia

² Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca , Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico, Bogotá, Colombia

* Autor de correspondencia: monica_nal@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El cacao, (*Theobroma cacao*), es originario de América del Sur. Este cultivo requiere temperaturas entre 26 y 27 °C y precipitaciones anuales entre 1300 y 2800 mm para lograr una mayor producción y una menor proliferación de plagas y enfermedades. De las semillas de este cultivo se obtiene el chocolate y derivados. Su producción emplea a alrededor de 6 millones de agricultores en todo el mundo, y en particular entre 2019 y 2020 produjo 0,9 millones de toneladas en América Latina, los principales productores Ecuador, Brasil, Perú y Colombia (Jaimes-Suárez et al., 2022; Valenzuela-Cobos et al., 2023). Se cultiva principalmente en zonas tropicales debido a su importancia económica y ecosistémica, por sus características organolépticas y nutricionales también se usa en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética (Soto Chochocca et al., 2022).

Uno de los principales factores que han contribuido a la disminución de la producción de cacao y al deterioro de la calidad del producto final son los problemas fitosanitarios. En Latinoamérica, las enfermedades más relevantes son la moniliasis del cacao, causada por *Moniliophthora roreri*, y la escoba de bruja, ocasionada por *Moniliophthora perniciosa*, que atacan tejidos, frutos, cojines florales y yemas de la planta. En ausencia de un manejo adecuado, estas enfermedades pueden alcanzar incidencias superiores al 80 % (Maridueña-Zavala et al., 2021; Díaz-Valderrama et al., 2022; Jiménez et al., 2022; Valenzuela-Cobos et al., 2023). Estos patógenos tienen una distribución geográfica limitada y no son considerados endémicos de otras regiones productoras.

Existen diferentes alternativas para el control y prevención de estas enfermedades. Tradicionalmente, se ha recurrido al uso de pesticidas químicos, los cuales tienen un impacto negativo en la salud humana y en el ambiente, ocasionando contaminación del suelo y del agua (Morais et al., 2022). No obstante, en la actualidad se ha promovido la búsqueda de estrategias más ecológicas y menos perjudiciales para el medio ambiente (Serrano et al., 2021). Dentro de estas alternativas se encuentra el control biológico, que incluye el uso de agentes benéficos como *Trichoderma* spp. para inhibir el desarrollo de *M. roreri* y *M. perniciosa*. Asimismo, se han implementado estrategias de control cultural, basadas en prácticas agronómicas tradicionales que facilitan la prevención y disminuyen la incidencia de patógenos en campo (Anzules-Toala et al., 2022; Espinoza-Lozano et al., 2022; Soto Chochocca et al., 2022).

Por otra parte, el control biológico no se limita al uso de *Trichoderma* spp., sino que también contempla bacterias y otros hongos con mecanismos de acción directos, como la competencia por nutrientes y espacio, e indirectos, mediante la producción de metabolitos secundarios que inhiben el crecimiento patogénico (Valenzuela-Cobos et al., 2023). Estos microorganismos han

demostrado capacidad para reducir la incidencia de la moniliasis, contribuyendo a un manejo más sostenible del cultivo.

En este contexto, esta revisión se enfoca en las estrategias de biocontrol contra la moniliasis del cacao que han sido más utilizadas en Latinoamérica en los últimos años. Se resalta la importancia económica del cultivo en países como Colombia, Ecuador, México, Perú y Brasil, ya que esta enfermedad no solo ocasiona millonarias pérdidas de dinero, sino que representa un problema fitosanitario que incluso podría afectar otros cultivos. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo sistematizar la información disponible sobre los agentes microbianos de biocontrol y sus mecanismos de acción, con el fin de contribuir al diseño de estrategias biológicas que fortalezcan el manejo integrado de la moniliasis del cacao.

LA ECONOMÍA DEL CACAO

Como otros sistemas agrícolas, el cacao está expuesto a la infección de potenciales patógenos —virus, bacterias, hongos y otros macroorganismos— que pueden ocasionar daños y pérdidas económicas. Frente a esta situación, la primera opción de muchos productores sigue siendo el uso de pesticidas químicos para intentar dar una solución inmediata; sin embargo, se sabe que a largo plazo el uso continuo de estos productos puede generar resistencias en los patógenos, afectar gravemente la salud humana y el ambiente, y comprometer la sostenibilidad del cultivo (Guzmán-Guzmán et al., 2023). A pesar de su importancia socioeconómica y ambiental, la producción de cacao en Latinoamérica se ha visto altamente amenazada por agentes fitopatógenos como *Phytophthora* spp., *Moniliophthora perniciosa*, *M. roreri*, *Ceratocystis cacaofunesta* y el virus del brote hinchado del cacao, los cuales, al encontrar hospederos susceptibles y ambientes favorables, son capaces de establecer interacciones complejas que afectan drásticamente la productividad del cultivo (Bekele & Phillips-Mora, 2019; Menezes et al., 2022).

El cultivo de cacao tiene especial relevancia para Latinoamérica. Países como México, Colombia, Ecuador, Perú y Brasil generan importantes ingresos económicos derivados de su exportación. Solo en Ecuador se producen alrededor de 410.000 toneladas de cacao en grano, lo que representa apenas el 5 % de la producción mundial; sin embargo, en ese porcentaje se concentra el 70 % de la producción mundial de cacao fino de aroma, siendo este país el primer lugar en calidad de este tipo de cacao. En Colombia, el cacao tiene gran importancia socioeconómica para las zonas rurales, donde aproximadamente 52.000 hogares rurales dependen directamente de este cultivo, el cual se maneja principalmente en sistemas agroforestales, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad (Hernández-Núñez et al., 2020; Sornoza Vélez et al., 2022).

Esta dinámica productiva y su relación con las principales enfermedades fitosanitarias en Latinoamérica se resume en la figura 1, donde se muestra la distribución de estudios recientes sobre biocontrol de *Moniliophthora roreri* entre 2020 y 2023, destacando la producción y relevancia económica en países como Ecuador, Perú, México, Colombia y Brasil, así como los principales agentes microbianos empleados y sus mecanismos de acción.

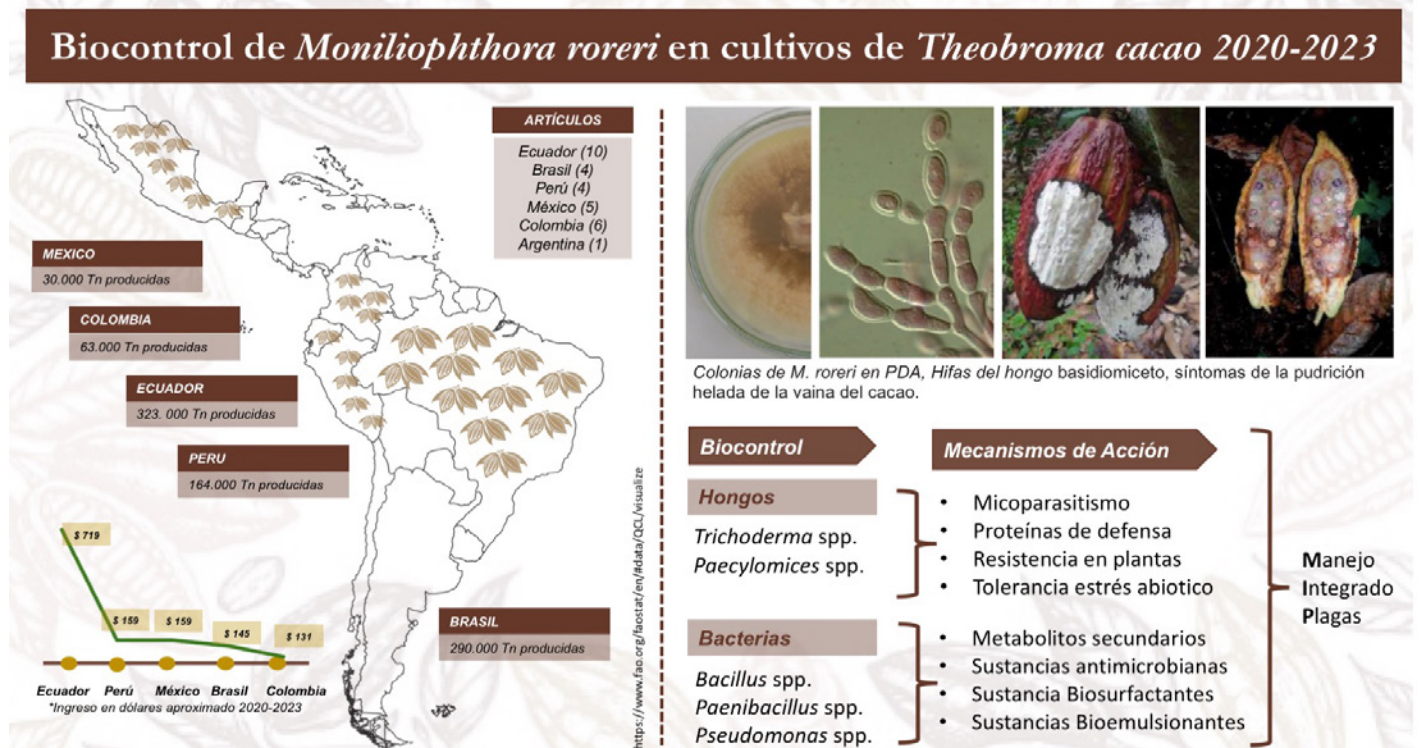


FIGURA 1. Biocontrol de *Moniliophthora roreri* en cultivos de cacao *Theobroma cacao*, en Latinoamérica, revisión estado actual 2020-2023. Fuente: elaboración propia.

En Perú, *Theobroma cacao* es el segundo cultivo perenne más grande, con aproximadamente 144.200 hectáreas cultivadas. En la región Amazónica es uno de los cultivos más representativos. México ocupa el puesto número 8 en la producción mundial y Brasil el número 7, evidenciando que se trata de un cultivo estratégico para América Latina. A nivel continental, *Theobroma cacao* genera ingresos significativos y representa un producto clave para el desarrollo rural, ya que América Latina produce cerca del 17 % del cacao mundial, contribuyendo tanto a la economía como a la conservación ambiental mediante sistemas agroforestales (Hernández-Núñez et al., 2020).

En la Figura 1 se visualiza el valor aproximado de los ingresos y la producción de cacao para los principales países de la región, junto con el número de registros fitosanitarios asociados. En total se han documentado 160 registros de patógenos, distribuidos principalmente en Ecuador (66), Perú (10), Colombia (38) y México (31) (Oporto-Peregrino et al., 2020; Plasencia-Vázquez et al., 2022). Entre estos patógenos, *Moniliophthora roreri* se considera uno de los

más representativos por su distribución y el impacto económico que genera en los cultivos de cacao en toda Latinoamérica.

Moniliophthora roreri, un patógeno conocido

La moniliasis ocasionada por el hongo *Moniliophthora roreri*, es uno de los principales problemas fitosanitarios que afectan al cultivo de cacao; este es un hongo basidiomiceto, que puede crecer en diversos ambientes y que ocasiona la pudrición helada de la vaina del cacao (Figura 1), una enfermedad destructiva y de difícil control debido a su patogenicidad, muy extendida geográficamente y que causa pérdidas que pueden superar el 80 % de la producción anual (Amaya-Márquez et al., 2021; Ramos Calderón et al., 2022). Los síntomas de la enfermedad incluyen abultamientos, amarillamiento o maduración prematura y manchas aceitosas y necróticas, que provocan la pérdida total de las semillas o una disminución de su calidad organoléptica; posteriormente, se puede observar una mancha marrón oscuro con un borde irregular que cubre completamente la vaina (Figura 1), malformación de la vaina y daño interno caracterizado por un polvo fino (esporas) de color marrón oscuro sobre los granos y la pulpa del cacao (Soto Chochocca et al., 2022; Valenzuela-Cobos et al., 2023). El hongo *M. roreri* puede crecer en diferentes condiciones ambientales provocando diferentes síntomas en un ciclo completo de unos 183 días, en ocasiones las mazorcas parecen estar sanas, pero internamente están infectadas y desarrollan síntomas de enfermedad más adelante en el desarrollo (Maridueña-Zavala et al., 2021; Monteiro Galvão et al., 2022; Valenzuela-Cobos et al., 2023). Otro aspecto importante es la presencia y expresión de proteínas, entre ellas las ceratoplataninas y altos niveles de expresión de quitina sintasas, esto sin duda es un problema pues podría ayudar a los hongos a superar las defensas del huésped, en ese sentido el control de este patógeno es un gran desafío en el cultivo de cacao (Novais et al., 2023).

En 2016, Tirado-Gallego et al. publicaron una revisión sistemática que compiló estrategias de control para *Moniliophthora roreri* y *M. perniciosa*, abarcando estudios hasta ese año. Aunque constituyó una referencia clave, desde entonces se han registrado avances significativos, especialmente en el desarrollo y evaluación de nuevos agentes de biocontrol y combinaciones de estrategias en distintos países latinoamericanos. Además, entre 2020 y 2023 se incrementaron los estudios aplicados y se generaron reportes técnicos y literatura gris no incluidos en revisiones previas, fundamentales para comprender el estado actual del biocontrol en la región (Tirado-Gallego et al., 2016; Arvelo Sánchez et al., 2017; FONTAGRO et al., 2019).

Por ello, este trabajo actualiza el estado del arte de las estrategias de control de *M. roreri* en América Latina, con énfasis en las investigaciones recientes sobre biocontrol, identificando los principales microorganismos estudiados,

sus mecanismos de acción, la evidencia de eficacia en condiciones de laboratorio y campo, así como las barreras para su implementación a gran escala. A diferencia de la revisión de Tirado-Gallego et al. (2016), esta actualización integra literatura más reciente, además de discutir las brechas de investigación, la transferencia tecnológica y las perspectivas de aplicación para pequeños productores. Para alcanzar este objetivo, se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica y gris en bases de datos regionales e internacionales, siguiendo criterios de inclusión y exclusión para garantizar la relevancia de los estudios.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta revisión se realizó bajo un enfoque sistemático narrativo, adaptando lineamientos de la guía PRISMA para revisiones de literatura (Page et al., 2021), con el fin de garantizar transparencia y reproducibilidad en el proceso de búsqueda, selección y análisis de la información. En relación con la estrategia de búsqueda y bases de datos, se consultaron artículos de investigación originales, experimentales y de revisión publicados entre 2020 y 2023, en inglés, español y portugués. Las búsquedas se realizaron en las bases de datos Sincé Direct, Scopus, ProQuest, Springer, Nature, Agrosavia y Google Académico.

Se emplearon cinco palabras clave principales, Biocontrol, *Theobroma cacao*, Latinoamérica, *Moniliophthora roreri*, Biological control, combinadas mediante operadores booleanos “AND”, “OR”, “NOT”. Con base en esta búsqueda, se incluyeron estudios que cumplieran con los siguientes criterios, a) evaluar estrategias de biocontrol o manejo integrado frente a *Moniliophthora roreri* en países latinoamericanos, b) describir claramente los agentes biológicos utilizados (hongos, bacterias, extractos vegetales) y sus mecanismos de acción, c) reportar resultados en condiciones de laboratorio, invernadero o campo, d) publicaciones revisadas por pares y literatura gris con respaldo institucional (reportes técnicos, tesis o documentos de organismos de investigación). Por otra parte, se excluyeron artículos duplicados en diferentes bases de datos, enfocados solo en *M. pernicioso* u otros patógenos no relacionados con moniliasis, sin datos experimentales o sin acceso a texto completo. La figura 2 muestra el algoritmo del proceso de búsqueda, cribado y selección de artículos incluidos para esta revisión.

Inicialmente se identificaron 87 artículos, de los cuales 53 fueron eliminados por duplicidad o por no cumplir los criterios de inclusión, resultando 34 artículos válidos para el análisis final, estos fueron clasificados según el año de publicación, país donde se realizó el estudio, tipo de agente biocontrolador (hongos, bacterias, extractos vegetales), condición de evaluación (*in vitro*, *in vivo*, en campo) y mecanismo de acción reportado (micoparasitismo, antibiosis, resistencia inducida).

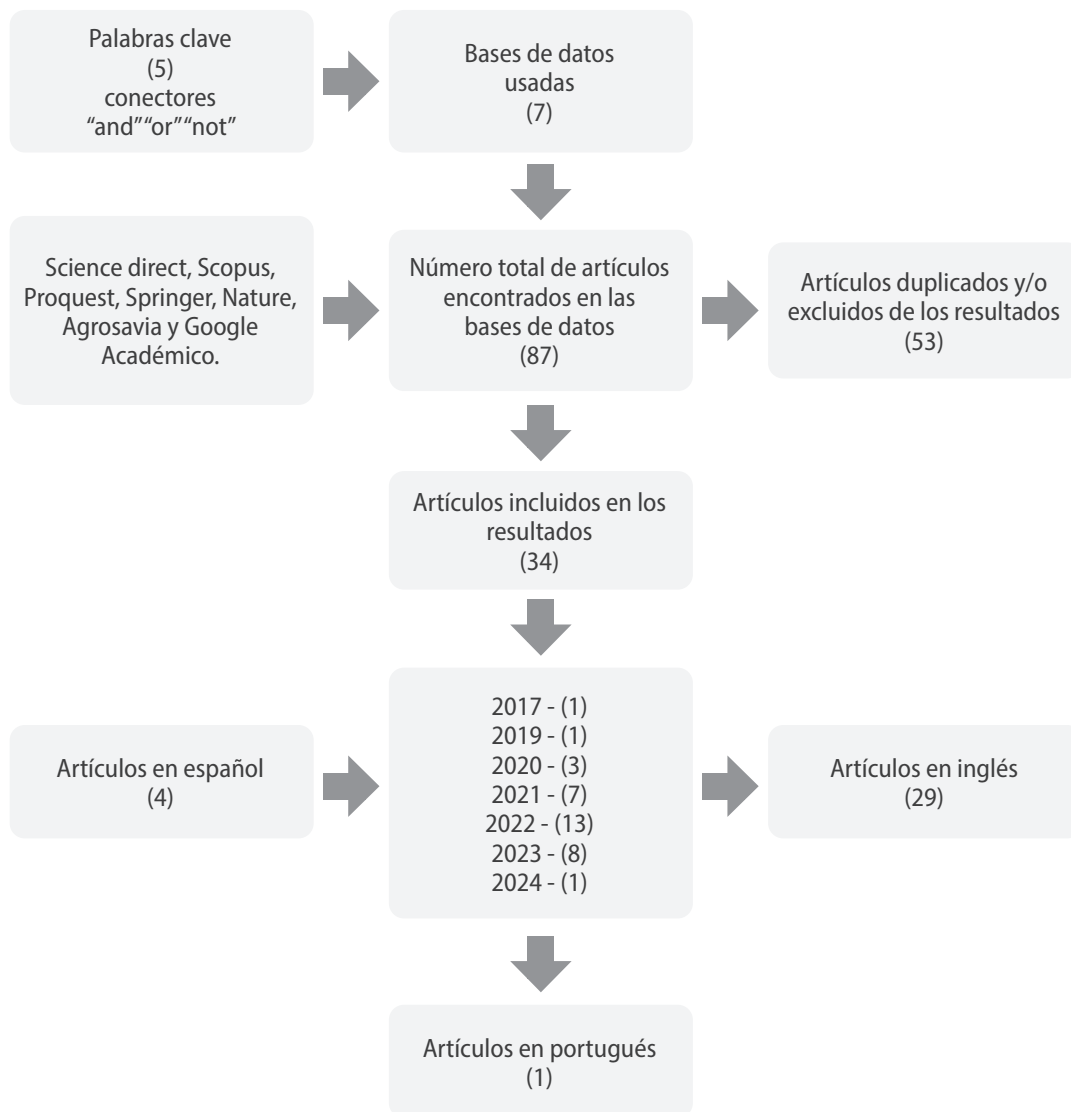


FIGURA 2. Algoritmo resultado de la búsqueda de información y obtención de resultados para la revisión.

Cada estudio incluido fue evaluado teniendo en cuenta, la claridad del diseño experimental, el tamaño de muestra y validez estadística, el nivel de validación (laboratorio vs. campo) y la descripción de los mecanismos de acción del agente de biocontrol. Esto permitió identificar las limitaciones metodológicas de cada investigación, aspecto que se discute en la sección de resultados y discusión. Además, se incluyó literatura gris relevante, como el informe de FONTAGRO La cadena de valor del cacao en América Latina y el Caribe: perspectiva 2030–2050 (FONTAGRO et al., 2019) y el documento técnico de Agrosavia Ofertas tecnológicas para el manejo de la monilia y la pudrición parda en cacao (*Theobroma cacao*) (Rodríguez Polanco et al., 2024), que aportan información socioeconómica y de aplicabilidad de las estrategias de control. La información recolectada se organizó en tablas de síntesis y se analizó mediante estadística descriptiva para identificar tendencias en el uso

de agentes biológicos, distribución geográfica de los estudios y mecanismos de acción más reportados. Aunque no se realizó un meta-análisis cuantitativo por la heterogeneidad de los datos.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El uso de estrategias de biocontrol contra la moniliasis en Latinoamérica ha sido ampliamente estudiado. En este contexto, los microorganismos antagonistas se presentan como una alternativa prometedora, ya que algunos hongos endofíticos son capaces de proteger a sus huéspedes de la acción de los patógenos y, además, pueden contribuir a mejorar la producción de cacao (Pilaloo David et al., 2021; Ramos Calderón et al., 2022 ; Fuentes-Estrada et al., 2023; Crisostomo-Panuera et al., 2024).

Se identificaron inicialmente 87 artículos relacionados con las palabras clave en diferentes combinaciones mediante los operadores booleanos definidos. Tras la depuración, 53 estudios fueron excluidos por duplicidad o por no cumplir los criterios de inclusión, quedando 34 artículos para el análisis final. La búsqueda incluyó documentos en inglés (29), español (4) y portugués (1), publicados principalmente entre 2020 y 2023 (la Figura 2 presenta el algoritmo que resume el proceso de búsqueda, cribado y selección de los artículos incluidos para esta revisión).

La distribución temporal de las publicaciones evidenció un incremento en las investigaciones sobre biocontrol de *Moniliophthora roreri* en América Latina durante los últimos años. El 2022 concentró la mayor cantidad de publicaciones (13 artículos), seguido de 2021 (7 artículos), 2023 (8 artículos) y 2020 (3 artículos). Este aumento coincide con la creciente necesidad de estrategias sostenibles para reducir el uso de fungicidas químicos y las pérdidas económicas generadas por la moniliasis (Ramos Calderón et al., 2022; Valenzuela-Cobos et al., 2023). Ahora bien, en términos geográficos, Ecuador concentró el mayor número de investigaciones (10 estudios), seguido de Colombia, Brasil, Perú y México. Este predominio refleja la relevancia productiva del país, que concentra el 70 % del cacao fino de aroma exportado mundialmente (Sornoza Vélez et al., 2022). En Perú y Colombia también se reportaron avances relevantes, especialmente en regiones amazónicas y zonas productoras de cacao asociadas a sistemas agroforestales (Hernández-Núñez et al., 2020).

En relación con los tipos de agentes biológicos evaluados, del total de estudios analizados, la mayoría se enfocó en hongos antagonistas (60 %), destacándose *Trichoderma* spp. por su capacidad de micoparasitismo y antibiosis (Ferreira & Musumeci, 2021; Delgado-Ramírez et al., 2023; Valenzuela-Cobos et al., 2023). Un 30 % de los artículos evaluaron bacterias endofíticas, principalmente del género *Bacillus* spp., conocidas por producir compuestos

volátiles con actividad antifúngica (De la Cruz-Ricardez et al., 2020; Guillén-Navarro et al., 2023). En menor proporción, se reportaron levaduras como *Hannaella* spp. y extractos vegetales, como aceites esenciales y compuestos fitoquímicos (Maridueña-Zavala et al., 2021; Ramos Calderón et al., 2022). Por otra parte, los mecanismos de acción más reportados fueron el micoparasitismo directo, con penetración y lisis de la pared celular del patógeno, la competencia por espacio y nutrientes, y la producción de metabolitos antifúngicos secundarios como micosubtilina y bacilisina (Salwan et al., 2022; Guzmán-Guzmán et al., 2023). Algunos estudios destacaron la inducción de resistencia sistémica en plantas, mediada por compuestos volátiles y la activación de vías de defensa dependientes del ácido salicílico y el ácido jasmónico (Peñaherrera Villafuerte et al., 2020; Avilés et al., 2023). En la tabla 1, se presenta un resumen de los microorganismos de biocontrol y mecanismos de acción más usados contra *Moniliophthora roreri*.

Adicionalmente, es importante resaltar que los agentes de biocontrol fúngico no solo protegen contra patógenos, sino que también contribuyen a la tolerancia frente a estrés abiótico, como altas temperaturas y concentraciones elevadas de sal. Estos microorganismos son considerados potenciadores del sistema de defensa de las plantas, lo que en general se traduce en un aumento del rendimiento de los cultivos (Anzules et al., 2019; Guzmán-Guzmán et al., 2023).

TABLA 1. Microorganismos más utilizados en estudios de biocontrol contra *Moniliophthora roreri* (2020–2023).

Microorganismo	Tipo	Mecanismo predominante	Nº estudios
<i>Trichoderma</i> spp.	Hongo	Micoparasitismo, antibiosis, resistencia inducida	12
<i>Bacillus</i> spp.	Bacteria	Compuestos volátiles y metabolitos antifúngicos	6
<i>Clonostachys</i> spp.	Hongo	Micoparasitismo combinado	3
Bacterias endofíticas	Bacteria	Producción de compuestos volátiles	2
<i>Paenibacillus polymyxa</i>	Bacteria	Producción de antibióticos naturales	1
<i>Hannaella</i> spp. (levaduras)	Levadura	Competencia por nutrientes, formación de biopelículas	1
Extractos vegetales (<i>Capsicum</i> spp., <i>Siparuna guianensis</i>)	Fitoquímicos	Inhibición directa del crecimiento micelial	4
Compost tea / té de compost	Mezcla microbiana	Inhibición biológica general	1

Además de *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp., se han reportado otros agentes con potencial antagónico frente a *M. roreri*, como *Paecilomyces* spp., que

parasita hongos mediante penetración mecánica con apresorios y secreción de enzimas líticas como quitinasa, glucanasa, proteasa y lipasas, además de metabolitos secundarios como alcaloides, compuestos fenólicos y terpenoides con efecto antimicrobiano (De la Cruz-Ricardez et al., 2020; Moreno-Gavira et al., 2020). De igual forma, bacterias como *Paenibacillus* spp. y *Pseudomonas* spp. inducen resistencia sistémica o producen enzimas como celulasas y quitinasas que dañan la pared celular de oomicetos y hongos patógenos (Chávez-Ramírez et al., 2021; Venturi, 2022). Recientemente, levaduras como *Hannaella* spp. han demostrado actividad antagonista por competencia, producción de compuestos volátiles y biopelículas, ofreciendo una alternativa promisorio para estudios futuros (Madbouly et al., 2020; Estrela Junior et al., 2022).

Con base en este contexto, aunque *Trichoderma* spp. es el microorganismo más ampliamente estudiado con eficacia comprobada en ensayos *in vitro*, pocos trabajos han avanzado a evaluaciones en campo. En contraste, los bioinoculantes comerciales basados en *Bacillus* spp. muestran mayor aplicabilidad para escalas productivas, pero requieren estudios complementarios para determinar su efectividad bajo diferentes condiciones agroecológicas (Leiva et al., 2022; Reyes et al., 2023). Esta heterogeneidad evidencia la necesidad de estrategias integradas en programas de manejo de enfermedades (Pilaloa David et al., 2021).

Además de los artículos científicos, también se integraron documentos técnicos como el informe de FONTAGRO (FONTAGRO et al., 2019) y el documento de Agrosavia, Ofertas tecnológicas para el manejo de la monilia y la pudrición parda en cacao (Rodríguez Polanco et al., 2024), que aportan un enfoque socioeconómico relevante para comprender las barreras de adopción tecnológica en pequeños productores.

Paralelamente, se han desarrollado métodos de diagnóstico temprano, como trampas de esporas y técnicas qPCR para cuantificar las cargas de *M. roreri* en campo, lo que facilita estrategias de control más oportunas (Jiménez-Zapata et al., 2023). En resumen, aunque los agentes biológicos muestran ventajas claras, su implementación efectiva requiere un enfoque de manejo integrado de enfermedades (MIE), combinando cultivares resistentes, prácticas culturales como podas y cosechas oportunas, fertilización balanceada y el uso racional de bioinsumos (Leiva et al., 2020; Pilaloa David et al., 2021; Ramos Calderón et al., 2022). La tabla 2 resume los artículos analizados, organizados por país, agente biológico, año de publicación, tipo de estudio y principales hallazgos.

TABLA 2. Resultados de la revisión. Control biológico de *Moniliophthora roreri* en cultivos de *Theobroma cacao* en Latinoamérica, una revisión del estado actual 2020-2023.

ARGENTINA			
Autor / Año	Agente biológico	Mecanismo de acción	Hallazgos
(Ferreira & Musumeci, 2021)	<i>Trichoderma</i> spp.	Micoparasitismo, antibiosis	Revisión sobre potencial y desafíos de <i>Trichoderma</i> spp. en el manejo sostenible de enfermedades vegetales; relevante para mejorar eficacia en cacao. Biocontrol indirecto aplicable a <i>M. roreri</i>
BRASIL			
Autor / Año	Agente biológico	Mecanismo de acción	Hallazgos
Reyes et al., 2023	Secuenciación de ARN y viroma asociado	Análisis transcriptómico	Estudio de microbiota asociada a esporas de <i>M. roreri</i> para identificar virus y microorganismos en etapas de esporulación. Diagnóstico indirecto para entender la biología de <i>M. roreri</i>
Morais et al., 2022	<i>Trichoderma</i> spp. endofíticos	Micoparasitismo	Ensayos en laboratorio con cepas endofíticas aisladas del Cerrado-Caatinga; mostraron potencial como biocontroladores. Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>
Menezes et al., 2022	Genómica aplicada a cacao resistente	Resistencia genética	Identificación de genotipos usados en programas de mejoramiento como clones y progenitores resistentes. Control indirecto mediante resistencia genética a <i>M. roreri</i>
Novais et al., 2023	<i>Trichoderma</i> spp. extractos	Metabolitos antifúngicos	Caracterización química de extractos con actividad antifúngica contra patógenos de cacao. Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>
COLOMBIA			
Autor / Año	Agente biológico	Mecanismo de acción	Hallazgos
Hernández-Núñez et al., 2020	Análisis agronómico	Condiciones de cultivo	Relación entre condiciones de cultivo y capital productivo rural; identifica vulnerabilidad frente a patógenos como <i>M. roreri</i> . Contexto indirecto para manejo integrado
Fuentes-Estrada et al., 2023	<i>Clonostachys</i> spp. + <i>Trichoderma</i> spp.	Micoparasitismo combinado	Ensayos en campo; mezclas de hongos redujeron significativamente la pudrición helada en cacao. Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>
Ramos Calderón et al., 2022	Aceite esencial de <i>Siparuna guianensis</i>	Actividad antifúngica directa	Ensayos in vitro; inhibición del 80% del crecimiento de <i>M. roreri</i> en mazorcas infectadas. Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>
Jiménez-Zapata et al., 2023	Spore traps + qPCR	Detección ambiental	Desarrollo de técnica molecular para cuantificar esporas de <i>M. roreri</i> en plantaciones. Diagnóstico indirecto para manejo de <i>M. roreri</i>
Jaimes-Suárez et al., 2022	Biocontroladores nativos en agroforestería	Regulación ecológica natural	Evaluación de incidencia de biocontroladores en sistemas agroforestales; reducción natural de <i>M. roreri</i> . Control indirecto mediante agroecosistema

ECUADOR			
Autor / Año	Agente biológico	Mecanismo de acción	Hallazgos
Amaya-Márquez et al., 2021	Fungicida flutolanil	Inhibición micelial	Se determinó la respuesta diferencial de aislados de <i>M. roreri</i> de regiones Amazónica y Costa del Ecuador al fungicida flutolanil, inhibiendo su crecimiento micelial
Maridueña-Zavala et al., 2021	Té de compost	Inhibición biológica	Ensayos in vitro y en campo evidenciaron sensibilidad media-alta de <i>M. roreri</i> al té de compost, inhibiendo su crecimiento micelial y esporulación
Pilaloa David et al., 2021)	<i>Bacillus</i> spp.	Producción de metabolitos y competencia	Ensayos en campo demostraron que biofungicidas de <i>Bacillus</i> spp. combinados con podas sanitarias redujeron significativamente la incidencia de moniliasis provocada por <i>M. roreri</i>
Serrano et al., 2021)	<i>Bacillus</i> spp. (biosurfactantes)	Lipopeptidos antifúngicos	Biosurfactantes producidos por cepas endofíticas de <i>Bacillus</i> inhibieron el crecimiento de <i>M. roreri</i> y <i>M. pernicioso</i> , reduciendo su capacidad infectiva en cacao
Espinoza-Lozano et al., 2022	Azoxistrobina + bioinoculantes	Sensibilidad a fungicidas estrobilurinas	Ensayos en campo mostraron alta sensibilidad de aislamientos ecuatorianos de <i>M. roreri</i> a azoxistrobina; manejo químico complementario para controlar el patógeno
Plasencia-Vázquez et al., 2022	Cambio climático (modelos ecológicos)	Proyección de distribución	Evaluación del nicho ecológico del cultivo de cacao y <i>M. roreri</i> para predecir áreas de coexistencia cultivo-patógeno bajo escenarios de cambio climático
Anzules-Toala et al., 2022	<i>Bacillus subtilis</i> QST713 (Serenade®)	Competencia y producción de metabolitos	Ensayos en campo combinados con labores culturales y fertilizantes redujeron significativamente la incidencia de moniliasis causada por <i>M. roreri</i> , demostrando biocontrol directo
Sornoza Vélez et al., 2022	Clones resistentes tipo Nacional	Mejora genética y adaptabilidad	Revisión de clones y programas de mejoramiento reveló resistencia parcial a plagas y enfermedades, incluyendo <i>M. roreri</i> , como estrategia indirecta de control
Valenzuela-Cobos et al., 2023	<i>Trichoderma</i> spp.	Micoparasitismo y antibiosis	Ensayos in vitro y en campo redujeron un 60 % la incidencia de <i>Moniliophthora roreri</i> en plantaciones de cacao fino de aroma, demostrando biocontrol directo contra este patógeno
Chóez-Guaranda et al., 2023	Extractos de <i>Trichoderma</i> spp.	Metabolitos antifúngicos	Los extractos de <i>Trichoderma</i> spp. presentaron actividad antifúngica contra patógenos de cacao, inhibiendo directamente el desarrollo de <i>M. roreri</i>
MÉXICO			
Autor / Año	Agente biológico	Mecanismo de acción	Hallazgos
Chávez-Ramírez et al., 2021	<i>Paenibacillus polymyxa</i> NMA1017	Producción de antibióticos naturales	Ensayos en campo; potencial agente de biocontrol para la pudrición negra de vaina con relevancia indirecta para moniliasis. Biocontrol indirecto complementario para <i>M. roreri</i> .
De la Cruz-López et al., 2022	Bacterias endofíticas de cacao	Compuestos volátiles	Ensayos in vitro; seis cepas de bacterias endofíticas inhibieron crecimiento micelial de <i>M. roreri</i> . Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>
Delgado-Ramírez et al., 2023	<i>Trichoderma</i> spp.	Micoparasitismo y antibiosis	Revisión sobre uso de <i>Trichoderma</i> como bioinoculante; alta relevancia para control biológico en Latinoamérica. Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>
Korobeinikova et al., 2023	<i>Bacillus subtilis</i> subsp. <i>spizizenii</i>	Biosurfactantes y metabolitos antifúngicos	Ensayos in vitro demostraron inhibición de <i>M. roreri</i> y otros fitopatógenos tropicales. Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>
Guzmán-Guzmán et al., 2023	<i>Trichoderma</i> spp.	Micoparasitismo	El micoparasitismo se considera un importante mecanismo de biocontrol de <i>M. roreri</i> ; estudios previos demuestran este método de acción en sistemas de cacao

PERÚ			
Autor / Año	Agente biológico	Mecanismo de acción	Tipo de estudio, hallazgos y relación con <i>M. roreri</i>
De la Cruz-Ricardez et al., 2020	Extractos de <i>Capsicum</i> spp.	Actividad antifúngica	Ensayos <i>in vitro</i> con extractos metanólicos de <i>Capsicum</i> inhibieron el crecimiento de <i>M. roreri</i> . Biocontrol directo contra el patógeno
Leiva et al., 2020	<i>Trichoderma</i> spp. cepas nativas Bagua	Micoparasitismo	Ensayos <i>in vitro</i> demostraron capacidad antagónica frente a la podredumbre helada. Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>
Soto Chochocca et al., 2022	<i>Zingiber officinale</i> , <i>Aloe vera</i> , <i>Trichoderma</i> sp.	Actividad antifúngica	Ensayos en campo en Huánuco, Perú; las mezclas de extractos y hongos disminuyeron la incidencia de la pudrición helada causada por <i>M. roreri</i> . Biocontrol directo
Leiva et al., 2022	<i>Trichoderma</i> spp. nativos	Micoparasitismo y antibiosis	Evaluación de 234 cepas recuperadas del suelo rizosfera de cacao; mostraron antagonismo significativo contra <i>M. roreri</i> . Biocontrol directo contra <i>M. roreri</i>

Aunque la investigación sobre métodos alternativos para controlar las enfermedades fúngicas se ha desarrollado ampliamente, se requiere la implementación integrada de varios métodos, esto se conoce como manejo integrado de enfermedades y entre estos métodos se encuentran el uso de cultivares resistentes a enfermedades y control genético, manejo adecuado del agua y del suelo, uso de preparados minerales sintéticos y orgánicos, fertilización, rotación de cultivos, prácticas culturales, como purgas, podas y cosechas oportunas y agentes de control biológico, con el objetivo de mantener o aumentar la producción agrícola con una aplicación reducida de agentes químicos (Leiva et al., 2020; Pilaloe David et al., 2021; Leiva et al., 2022; Lopes et al., 2022; Ramos Calderón et al., 2022; Valenzuela-Cobos et al., 2023).

De forma complementaria, se han explorado alternativas como aceites esenciales y extractos fitoquímicos, que por su origen natural y baja toxicidad muestran potencial como agentes de biocontrol en cacao, inhibiendo patógenos como *M. roreri* (Chitiva-Chitiva et al., 2021; Maridueña-Zavala et al., 2021; Ramos Calderón et al., 2022). También se ha señalado que la eficacia de las bioformulaciones en campo depende no solo de su desempeño técnico, sino de factores socioambientales, incluida la aceptación por parte de los agricultores y su comparación con fertilizantes y pesticidas químicos, lo que representa un desafío clave para reducir el uso de agroquímicos (Sornoza Vélez et al., 2022; Guzmán-Guzmán et al., 2023).

En comparación con la revisión sistemática de Tirado-Gallego et al. (2016), esta actualización (2020–2023) evidencia novedades relevantes: (i) un incremento notable de publicaciones aplicadas en campo, especialmente en Ecuador y Perú; (ii) la evaluación de nuevos agentes biológicos, como levaduras (*Hannaella* spp.) y bacterias endofíticas adicionales (*Paenibacillus* spp., *Pseudomonas* spp.), no reportados en 2016; (iii) mayor caracterización de los mecanismos bioquímicos y enzimáticos, incluyendo metabolitos como

micosubtilina, bacilisina y compuestos fenólicos; y (iv) la integración de diagnóstico molecular temprano (*spore traps* y qPCR) como herramienta complementaria para el manejo. Además, mientras que Tirado-Gallego et al. se centraron en estrategias generales de biocontrol y control químico, esta revisión incorpora literatura gris reciente y analiza la aceptación socioambiental y los retos de adopción tecnológica, aspectos ausentes en la revisión previa.

Finalmente, es importante precisar que, debido a la heterogeneidad en los diseños experimentales (ensayos *in vitro*, invernadero y campo), condiciones de evaluación y tipos de agentes biológicos, no fue posible realizar un meta-análisis cuantitativo. Por ello, se optó por presentar los hallazgos como síntesis narrativa y análisis descriptivo.

CONCLUSIONES

Esta revisión actualizó el estado del arte sobre las estrategias de biocontrol de *Moniliophthora roreri* en América Latina, abarcando el periodo 2020–2023. Se evidenció un incremento notable de investigaciones aplicadas, especialmente en Ecuador y Perú, así como la evaluación de nuevos agentes biológicos, incluyendo levaduras como *Hannaella* spp. y bacterias endofíticas como *Paenibacillus* spp. y *Pseudomonas* spp., que no habían sido reportados. Además, se avanzó en la caracterización de mecanismos bioquímicos y enzimáticos, y en el desarrollo de métodos de diagnóstico temprano mediante trampas de esporas y qPCR, herramientas que complementan las estrategias de biocontrol.

A nivel práctico, los hongos del género *Trichoderma* spp. y las bacterias del género *Bacillus* spp. continúan siendo los agentes más estudiados y con mayor potencial para el manejo sostenible de la moniliasis, aunque su adopción en campo sigue limitada por factores socioambientales y económicos. Esto resalta la necesidad de implementar un manejo integrado de enfermedades, combinando agentes biológicos con prácticas culturales, mejoramiento genético y diagnóstico oportuno para reducir el uso de fungicidas químicos.

Finalmente, persisten vacíos importantes como la validación a gran escala de bioinoculantes, la evaluación económica de las estrategias y la transferencia tecnológica hacia pequeños productores. Futuros estudios deberán priorizar ensayos en condiciones de campo, análisis costo-beneficio y estrategias que faciliten la aceptación y adopción de estas alternativas por parte de las comunidades productoras.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés que pudiera influir en los resultados o interpretación de este estudio.

Contribución de autoría

Mónica Alejandra Rodríguez Aristizábal: Conceptualización del estudio, análisis y síntesis de la información, redacción del manuscrito y edición final.

Yohana Katherine Ojeda Grijalba: Búsqueda bibliográfica, depuración, redacción y organización inicial de los artículos.

María Angélica Basto Álvarez: Búsqueda bibliográfica, depuración, redacción y organización inicial de los artículos.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o sin ánimo de lucro.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles previa solicitud al autor de correspondencia.

Uso de inteligencia artificial

Se utilizó IA generativa (ChatGPT) únicamente como apoyo en la revisión de estilo; todas las interpretaciones, análisis y organización de la información fueron verificados por las autoras.

REFERENCIAS

- Amaya-Márquez, D. J., Espinoza-Lozano, R. F., Villavicencio-Vásquez, M. E., Sosa del Castillo, D., & Pérez-Martínez, S. (2021). Inhibition and stimulation of mycelial growth of *Moniliophthora roreri* by flutolanil in populations of Ecuador. *Acta Agronómica*, 70(3), 240–248. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n3.88905>
- Anzules, V., Borjas, R., Alvarado, L., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2019). Control cultural, biológica y químico de *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora* spp. en *Theobroma cacao* 'CCN-51'. *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 511–520. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.08>
- Anzules-Toala, V., Pazmiño-Bonilla, E., Alvarado-Huamán, L., Borjas-Ventura, R., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. M. (2022). Control of cacao (*Theobroma cacao*) diseases in Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), artículo 45939. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.45939>
- Arvelo Sánchez, M. Á., González León, D., Maroto Arce, S., Delgado López, T., & Montoya López, P. (2017). *Manual técnico del cultivo de cacao prácticas latinoamericanas*. IICA.
- Avilés, D., Espinoza, F., Villao, L., Álvarez, J., Sosa, D., Santos-Ordóñez, E., & Galarza, L. (2023). Application of microencapsulated *Trichoderma* spp. against

- Moniliophthora roreri* during the vegetative development of cocoa. *Scientia Agropecuaria*, 14(4), 539–547. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.045>
- Bekele, F., & Phillips-Mora, W. (2019). Cacao (*Theobroma cacao* L.) breeding. En J. Al-Khayri, S. Jain, & D. Johnson (Eds.), *Advances in plant breeding strategies: industrial and food crops* (pp. 409–487). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23265-8_12
- Chávez-Ramírez, B., Rodríguez-Velázquez, N. D., Mondragón-Talonia, C. M., Avendaño-Arrazate, C. H., Martínez-Bolaños, M., Vásquez-Murrieta, M. S., & Estrada de los Santos, P. (2021). *Paenibacillus polymyxa* NMA1017 as a potential biocontrol agent of *Phytophthora tropicalis*, causal agent of cacao black pod rot in Chiapas, México. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 114(1), 55–68. <https://doi.org/10.1007/s10482-020-01498-z>
- Chitiva-Chitiva, L. C., Ladino-Vargas, C., Cuca-Suárez, L. E., Prieto-Rodríguez, J. A., & Patiño-Ladino, O. J. (2021). Antifungal activity of chemical constituents from *Piper pesaresanum* C. DC. and derivatives against phytopathogen fungi of cocoa. *Molecules*, 26(11), artículo 3256. <https://doi.org/10.3390/molecules26113256>
- Chóez-Guaranda, I., Espinoza-Lozano, F., Reyes-Araujo, D., Romero, C., Manzano, P., Galarza, L., & Sosa, D. (2023). Chemical characterization of *Trichoderma* spp. extracts with antifungal activity against cocoa pathogens. *Molecules*, 28(7), artículo 3208. <https://doi.org/10.3390/molecules28073208>
- Crisostomo-Panuera, J. S., Nieva, A. S. V., Ix-Balam, M. A., Díaz-Valderrama, J. R., Alvarez-Gutierrez, E., Oliva-Cruz, S. M., & Cumpa-Velásquez, L. M. (2024). Diversity and functional assessment of indigenous culturable bacteria inhabiting fine-flavor cacao rhizosphere: Uncovering antagonistic potential against *Moniliophthora roreri*. *Heliyon*, 10(7), artículo e28453. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28453>
- De la Cruz-López, N., Cruz-López, L., Holguín-Meléndez, F., Guillén-Navarro, G. K., & Huerta-Palacios, G. (2022). Volatile organic compounds produced by cacao endophytic bacteria and their inhibitory activity on *Moniliophthora roreri*. *Current Microbiology*, 79(2), artículo 35.
- De la Cruz-Ricardez, D., Ortiz-García, C. F., Lagunes-Espinoza, L. C., & Torres-de la Cruz, M. (2020). Efecto antifúngico *in vitro* de extractos metanólicos de *Capsicum* spp. en *Moniliophthora roreri*. *Agrociencia*, 54(6), 813–824. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i6.2186>
- Delgado-Ramírez, C. S., Sepúlveda, E., Rangel-Montoya, E. A., Valenzuela-Solano, C., & Hernandez-Martinez, R. (2023). Heritage grapevines as sources of biological control agents for *Botryosphaeria dieback* pathogens. *Phytopathologia Mediterranea*, 62(2), 115–134. <https://doi.org/10.36253/phyto-14154>
- Díaz-Valderrama, J. R., Zambrano, R., Cedeño-Amador, S., Córdova-Bermejo, U. Casas, G. G., García-Zurita, N., Sánchez-Arévalo, J. A. J., Arévalo-Gardini, E., Dávila, D., Ruiz, J., Pinchi-Dávila, X., Quispe-Chacón, Z. R., Chia-Wong, J. A., Hurtado-Gonzales, O. P., Rodríguez-Callañupa, C. A., Maldonado-Fuentes, C., Pérez-Callizaya, E., Leiva-Espinoza, S., Oliva-Cruz, M., ... Aime, M. C. (2022). Diversity in the invasive cacao pathogen *Moniliophthora roreri* is shaped by agriculture. *Plant Pathology*, 71(8), 1721–1734. <https://doi.org/10.1111/ppa.13603>
- Espinoza-Lozano, F., Amaya-Márquez, D., Pinto, C. M., Villavicencio-Vásquez, M., Sosa del Castillo, D., & Pérez-Martínez, S. (2022). Multiple introductions of

- Moniliophthora roreri* from the Amazon to the Pacific region in Ecuador and shared high azoxystrobin sensitivity. *Agronomy*, 12(5), artículo 1119. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051119>
- Estrela Junior, A. S., Solís, K., Pimenta Neto, A. A., Vera, D. I., Garzón, I., Peñaherrera, S., Diorato, V. S., Gramacho, K. P., & Laranjeira, D. (2022). Effect of antagonistic yeast from cacao tissues on controlling growth and sporulation of *Moniliophthora roreri*. *Biological Control*, 172, artículo 104956. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104956>
- Ferreira, F. V., & Musumeci, M. A. (2021). *Trichoderma* as biological control agent: Scope and prospects to improve efficacy. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 37(5), artículo 90. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03058-7>
- FONTAGRO, ESPOL, & INIAP. (2019). *Plataforma multiagencia de cacao para América Latina y el Caribe: Cacao 2030-2050 (Fondo Semilla)*. https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Informe_CACAO_linea_base.pdf
- Fuentes-Estrada, M., Jiménez-González, A., Duarte, D., Saavedra-Barrera, R., Areche, C., Stashenko, E., Pino Benítez, N., Bárcenas-Pérez, D., Cheel, J., & García-Beltrán, O. (2023). GC/MS profile and antifungal activity of *Zanthoxylum caribaeum* Lam essential oil against *Moniliophthora roreri*, a pathogen of *Theobroma cacao* crops. *Chemosensors*, 11(8), artículo 447. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11080447>
- Guillén-Navarro, K., López-Gutiérrez, T., García-Fajardo, V., Gómez-Cornelio, S., Zarza, E., De la Rosa-García, S., & Chan-Bacab, M. (2023). Broad-spectrum antifungal, biosurfactants and bioemulsifier activity of *Bacillus subtilis* subsp. *Spizizenii*, a potential biocontrol and bioremediation agent in agriculture. *Plants*, 12(6), artículo 1374. <https://doi.org/10.3390/plants12061374>
- Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de Los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Orozco-Mosqueda, M. C., Fadiji, A. E., Hyder, S., Babalola, O. O. & Santoyo, G. (2023). *Trichoderma* species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases, a review. *Plants*, 12(3), artículo 432. <https://doi.org/10.3390/plants12030432>
- Hernández-Núñez, H. E., Gutiérrez-Montes, I., Sánchez-Acosta, J. R., Rodríguez-Suárez, L., Gutiérrez-García, G. A., Suárez-Salazar, J. C., & Casanoves, F. (2020). Agronomic conditions of cacao cultivation: Its relationship with the capitals endowment of Colombian rural households. *Agroforestry Systems*, 94(6), 2367–2380. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00556-9>
- Jaimes-Suárez, Y. Y., Carvajal-Rivera, A. S., Galvis-Neira, D. A., Carvalho, F. E. L., & Rojas-Molina, J. (2022). Cacao agroforestry systems beyond the stigmas: biotic and abiotic stress incidence impact. *Frontiers in Plant Science*, 13, artículo 921469. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921469>
- Jiménez, D. L., Álvarez, J. C., & Mosquera, S. (2022). Frosty pod rot: a major threat to cacao plantations on the move. *Tropical Plant Pathology*, 47(2), 187–200. <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00472-y>
- Jiménez-Zapata, D. L., Quiroga-Pérez, M., Quiroz-Yepes, M., Marulanda-Tobón, A., Álvarez, J. C., & Mosquera-López, S. (2023). Development of a method for detecting and estimating *Moniliophthora roreri* spore loads based on spore traps and qPCR. *Journal of Fungi*, 9(1), artículo 47. <https://doi.org/10.3390/jof9010047>

- Korobeinikova, A., Laalami, S., Berthy, C., & Putzer, H. (2023). RNase y autoregulates its synthesis in *Bacillus subtilis*. *Microorganisms*, 11(6), artículo 1374. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061374>
- Leiva, S., Oliva, M., Hernández, E., Chuquibala, B., Rubio, K., García, F., & Torres de la Cruz, M. (2020). Assessment of the potential of *Trichoderma* spp. strains native to Bagua (Amazonas, Perú) in the biocontrol of frosty pod rot (*Moniliophthora roreri*). *Agronomy*, 10(9), artículo 1376. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091376>
- Leiva, S., Rubio, K., Díaz-Valderrama, J. R., Granda-Santos, M., & Mattos, L. (2022). Phylogenetic affinity in the potential antagonism of *Trichoderma* spp. against *Moniliophthora roreri*. *Agronomy*, 12(9), artículo 2052. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092052>
- Lopes, U. V., Pires, J. L., Gramacho, K. P., & Grattapaglia, D. (2022). Genome-wide SNP genotyping as a simple and practical tool to accelerate the development of inbred lines in outbred tree species: An example in cacao (*Theobroma cacao* L.). *PLoS One*, 17(10), artículo e0270437. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270437>
- Madbouly, A. K., Abo Elyousr, K. A. M., & Ismail, I. M. (2020). Biocontrol of *Monilinia fructigena*, causal agent of brown rot of apple fruit, by using endophytic yeasts. *Biological Control*, 144, artículo 104239. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104239>
- Maridueña-Zavala, M. G., Jimenez Feijoo, M. I., & Cevallos-Cevallos, J. M. (2021). Pathogenicity of *Moniliophthora roreri* isolates from selected morphology groups in harvested cacao pods and *in vitro* sensitivity to compost tea. *Bionatura*, 6(1), 1569–1574. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.19>
- Menezes, F. S., Mucherino-Muñoz, J. J., Ferreira, C. A., Chaves, S. F. S., Barbosa, C., Lima Lemos, L. S., Jordana, N., Carvalho, M., Pires, J. L., Silva, R. J. S., Gramacho, K. P., Alves, R. M., Corrêa, R. X., & Micheli, F. (2022). Genomic Designing for Biotic Stress Resistant Cocoa Tree. In: Kole, C. (eds) *Genomic designing for biotic stress resistant technical crops* (pp. 49–113). Springer. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09293-0_2
- Monteiro Galvão, Í, Silva Pereira, G., & Sentelhas, P. C. (2022). Climatic risk zoning for potential occurrence of cacao moniliasis disease in northeastern Brazil under the influence of ENSO phases. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1–2), 557–567. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04060-1>
- Morais, E. M., Silva, A. A. R., Sousa, F.W. A., Azevedo, I. M. B., Silva, H. F., Santos, A. M. G., Beserra Júnior, J. E. A., Carvalho, C. P., Eberlin, M. N., Porcari, A. M. & Araújo, F. D. S. (2022). Endophytic *Trichoderma* strains isolated from forest species of the Cerrado-Caatinga ecotone are potential biocontrol agents against crop pathogenic fungi. *PLoS One*, 17(4), e0265824. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265824>
- Moreno-Gaviria, A., Huertas, V., Diáñez, F., Sánchez-Montesinos, B., & Santos, M. (2020). *Paecilomyces* and its importance in the biological control of agricultural pests and diseases. *Plants*, 9(12), artículo 1746. <https://doi.org/10.3390/plants9121746>
- Novais, D. P. S., Batista, T. M., Costa, E. A., & Pirovani, C. P. (2023). Genomic and pathogenicity mechanisms of the main *Theobroma cacao* L. eukaryotic

- pathogens: A systematic review. *Microorganisms*, 11(6), artículo 1567. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061567>
- Oporto-Peregrino, S., Hidalgo-Mihart, M. G., Collado-Torres, R. A., Castro-Luna, A. A., Gama-Campillo, L. M., & Arriaga-Weiss, S. L. (2020). Effects of land tenure and urbanization on the change of land use of cacao (*Theobroma cacao*) agroforestry systems in southeast Mexico. *Agroforestry Systems*, 94(3), 881–891. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00453-w>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, artículo n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Peñaherrera Villafuerte, S., Cedeño García, G., Solórzano Alcívar, F., Cedeño-García, G. A., & Terrero Yépez, P. (2020). Eficacia de mezclas de *Trichoderma* spp. y aceite de palma en el manejo de *Moniliophthora roreri* Cif & Par en cacao. *Centro Agrícola*, 47(2), 5–15. <https://doaj.org/article/3dfc86d59e9a4594b5d65694c48723da>
- Pilaloo David, W., Alvarado Aguayo, A., Pérez Vaca, D., & Torres Sánchez, S. (2021). Manejo agroecológico de la moniliasis en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) mediante la utilización de biofungicidas y podas fitosanitarias en el cantón La Troncal. *Revista Alfa*, 5(15). <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.129>
- Plasencia-Vázquez, A. H., Vilchez-Ponce, C. R., Ferrer-Sánchez, Y., & Veloz-Portillo, C. E. (2022). Efecto del cambio climático sobre la distribución potencial del hongo *Moniliophthora roreri* y el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en Ecuador continental. *Terra Latinoamericana*, 40, 1–14. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1151>
- Ramos Calderón, P. F., Rodríguez Pérez, W., Castrillon Rivera, B., Ramos Rodríguez, F. A., & Suárez Salazar, J. C. (2022). Potential use of *Siparuna guianensis* essential oil for the control of *Moniliophthora roreri* in cacao. *Acta Agronómica*, 70(2), 178–185. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n2.90056>
- Reyes, B. M. D., Fonseca, P. L. C., Heming, N. M., Conceição, L. B. A., Nascimento, K. T. S., Gramacho, K. P., Arevalo-Gardini, E., Pirovani, C. P., & Aguiar, E. R. G. R. (2023). Characterization of the microbiota dynamics associated with *Moniliophthora roreri*, causal agent of cocoa frosty pod rot disease, reveals new viral species. *Frontiers in Microbiology*, 13, artículo 1053562. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1053562>
- Rodríguez Polanco, E., Navarro Niño, D. A., Bermeo Fúquene, P. A., & Parra Alferes, E. B. (2024). *Ofertas tecnológicas para el manejo de la monilia y la pudrición parda en cacao (Theobroma cacao L.)*. Colecciones prácticas agropecuarias. Editorial Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7406825>
- Salwan, R., Sharma, A., Kaur, R., Sharma, R., & Sharma, V. (2022). The riddles of *Trichoderma*-induced plant immunity. *Biological Control*, 174, artículo 105037. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.105037>
- Serrano, L., Moreno, A. S., Castillo, D. S., Bonilla, J., Romero, C. A., Galarza, L. L., & Coronel-León, J. R. (2021). Biosurfactants synthesized by endophytic *Bacillus* strains as control of *Moniliophthora pernicioso* and *Moniliophthora roreri*. *Scientia Agrícola*, 78(suppl 1). <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2020-0172>

- Sornoza Vélez, L., Valencia Carreño, L., Corozo-Quiñónez, L., Sánchez Mora, F., Salas-Macías, C., & Peña Monserrate, G. (2022). Recursos genéticos de cacao tipo Nacional en Ecuador: una revisión sistemática. *Ciencia y Tecnología*, 15(2), 30–42. <https://doi.org/10.18779/cyt.v15i2.582>
- Soto Chochocca, R. R., Gonzales Avila, E., Fernandez Rojas, J. H., Angeles Suazo, J. M., Huamán De La Cruz, A. R., & Hadi Mohamed, M. M. (2022). Antifungal effect from *Zingiber officinale*, *Aloe vera* and *Trichoderma* sp. for control of *Moniliophthora roreri* in *Theobroma cacao* in Huánuco, Peru. *Revista Facultad Nacional De Agronomía Medellín*, 75(1), 9823–9830. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v75n1.95804>
- Tirado-Gallego, M., Lopera-Álvarez, A., & Ríos-Osorio, L. (2016). Estrategias de control de *Moniliophthora roreri* y *Moniliophthora perniciosa* en *Theobroma cacao* L.: revisión sistemática. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 417–430. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:517
- Valenzuela-Cobos, J. D., Guevara-Viejó, F., Vicente-Galindo, P., & Galindo-Villardón, P. (2023). Eco-friendly biocontrol of moniliasis in Ecuadorian cocoa using biplot techniques. *Sustainability*, 15(5), artículo 4223. <https://doi.org/10.3390/su15054223>
- Venturi, V. (2022). T4BSS-dependent biocontrol by plant-beneficial *Pseudomonas*. *Nature Microbiology*, 7(10), 1508-1509. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01232-7>