

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias de la Vida

Uso de microorganismos endófitos como estrategia de biocontrol para
enfermedades de *Theobroma cacao*: avances y perspectivas.

Proyecto de Titulación

Previo la obtención del Título de:

Magíster en Sanidad Vegetal

Presentado por:

María Angela Vera Flores

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A mi madre Alba, que aunque ya no esté físicamente, su amor, enseñanzas y todo lo que hizo por mí, siguen guiando mis pasos. Gracias por ser mi fuerza silenciosa desde el cielo.

A mi padre Dick, este logro académico refleja el esfuerzo, sacrificio y compromiso que siempre tuvo con mi educación. Su ejemplo constancia y apoyo han sido fundamentales en mi formación. Gracias por ser guía y faro en mi camino.

Agradecimientos

Para empezar, agradezco a Dios por ser mi guía, mi refugio y mi protector durante todo este trayecto.

A mi madre, por las enseñanzas que me dejó en vida. Aunque no soy perfecta, he sabido esforzarme y seguir el camino del bien, y gracias a sus valores y ejemplo, hoy he alcanzado una meta más.

A mi padre, por impulsarme constantemente a alcanzar mis metas. Gracias a tu esfuerzo y apoyo incondicional durante todo el proceso; sin ti, no lo habría logrado. Eres mi pilar y mi motor para continuar.

A las familias Martínez Márquez, Martínez Bustos, Mina Romero, por abrirme las puertas de sus hogares y acompañarme con generosidad en esta travesía; así como a mis amigos y tíos, por su constante aliento a lo largo de esta maestría.

A mi tutora, la Dra. Daynet Sosa por su invaluable apoyo en la elaboración de este proyecto, así como a mis docentes y al cuerpo administrativo, quienes me guiaron y acompañaron durante todo el proceso académico.

Declaración Expresa

Yo, María Angela Vera Flores acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, _____ del 2025.

María Angela Vera Flores

Autor 1

Evaluadores

Adriana Patricia Santos Ordoñez, PhD.

Profesor de Materia

Daynet Sosa del Castillo

Tutor de proyecto

Resumen

El cultivo de *Theobroma cacao* enfrenta desafíos fitosanitarios importantes debido a enfermedades fúngicas como la moniliasis, escoba de bruja y pudrición negra del fruto. Este proyecto analiza, mediante una revisión sistemática, el potencial de los microorganismos endófitos —hongos, bacterias y levaduras— como agentes de biocontrol en el manejo sostenible de estas enfermedades. Se parte de la hipótesis de que los endófitos poseen mecanismos eficaces para suprimir patógenos, reduciendo así a la dependencia de agroquímicos. Se recopilaron y analizaron artículos científicos publicados entre 2008 y 2025, en bases de datos especializadas. La información se clasificó según tipo de microorganismo, patógeno objetivo, mecanismos de acción, tipo de estudio, país o región de origen y resultados principales. Los resultados revelan que cepas de *Trichoderma spp.* y *Bacillus spp.* destacan por inhibir el crecimiento de *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora spp.* mediante antibiosis, micoparasitismo e inducción de resistencia sistémica. Se concluye que los microorganismos endófitos representan una estrategia ecológica prometedora para el manejo de enfermedades del cacao, con potencial para ser incorporada en programas de agricultura sostenible.

Palabras clave: Biocontrol, endófitos, enfermedades fúngicas, sostenibilidad agrícola, *Theobroma cacao*

Abstract

The cultivation of *Theobroma cacao* faces major phytosanitary challenges due to fungal diseases such as frosty pod rot (*Moniliophthora roreri*), witches' broom (*Moniliophthora perniciosa*), and black pod rot (*Phytophthora spp.*). This project analyzes, through a systematic review, the potential of endophytic microorganisms—fungi, bacteria, and yeasts—as biocontrol agents for the sustainable management of these diseases. The hypothesis is that endophytes possess effective mechanisms to suppress pathogens, thereby reducing dependence on agrochemicals. Scientific articles published between 2008 and 2025 were collected and analyzed from specialized databases. The information was categorized according to the type of microorganism, target pathogen, mode of action, type of study, country or region of origin, and main findings. Results reveal that strains of *Trichoderma spp.* and *Bacillus spp.* are particularly effective in inhibiting the growth of *Moniliophthora roreri* and *Phytophthora spp.* through antibiosis, mycoparasitism, and induction of systemic resistance. It is concluded that endophytic microorganisms represent a promising ecological strategy for the management of cacao diseases, with strong potential for integration into sustainable agriculture programs.

Keywords: *Biocontrol, endophytes, fungal diseases, agricultural sustainability, Theobroma cacao*

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general.....	III
Abreviaturas	V
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del Problema	2
1.3 Justificación del Problema	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5 Marco Teórico	5
1.5.1 Importancia de la sanidad vegetal en cacao y su sostenibilidad	5
1.5.2 Definición y características de los microorganismos endófitos.....	6
1.5.3 Principios generales de biocontrol y su aplicación en agricultura.....	7
1.5.4 Uso de endófitos para el control de enfermedades en cacao.....	9
1.5.5 Perspectivas y enfoques multidisciplinarios en biocontrol	10
Capítulo 2.....	12
2. Metodología.....	13
2.1 Formulación y selección de alternativas de solución al problema.....	13
2.2 Estrategia de búsqueda	13
2.3 Criterios de inclusión y exclusión	15
2.4 Selección y análisis de la información.....	16
2.5 Consideraciones éticas y de rigor científico	16
2.6 Identificación de efectos casuales en los datos	17
2.7 Enfoque multidisciplinario y aportes desde la sanidad vegetal	17
Capítulo 3.....	19

3.	Resultados y discusión.....	20
3.1	Síntesis de la evidencia científica sobre microorganismos endófitos con actividad biocontroladora en cacao.....	20
3.2	Mecanismos de acción de los microorganismos endófitos en el control de enfermedades de <i>Theobroma cacao</i>	21
3.3	Eficacia frente a moniliasis, escoba de bruja y pudrición negra en diversas regiones y condiciones.....	23
3.3.1	Enfermedades mejor controladas mediante endófitos.....	23
3.3.2	Comparación entre resultados en laboratorios, invernadero y campo..	24
3.4	Oportunidades y desafíos para su integración en programas sostenibles del manejo del cacao.	24
3.4.1	Vacíos de conocimiento y oportunidades de investigación.....	25
3.4.2	Limitaciones técnicas, regulatorias y sociales	26
3.4.3	Potenciales efectos adversos y consideraciones ecológicas.....	27
3.4.4	Perspectivas y tendencias futuras	28
	Capítulo 4.....	30
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	31
4.1	Conclusiones.....	31
4.2	Recomendaciones	32
	Referencias	34

Abreviaturas

AGORA	<i>Access to Global Online Research in Agriculture</i> (Acceso a la Investigación Global en Línea en Agricultura)
EFE	<i>Ethylene Forming Enzyme</i> (Enzima formadora de etileno)
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i> (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
PAL	<i>Phenylalanine Ammonia Lyase</i> (Fenilalanina Amonio Liasa)
PR1	<i>Pathogenesis-Related protein 1</i> (Proteína relacionada con la patogénesis 1)

Capítulo 1

1.1 Introducción

El cultivo de *Theobroma cacao* es fundamental a nivel global por su valor económico, social, cultural y ambiental. Originario de América tropical, se cultiva en más de 50 países, con unas 6,5 millones de hectáreas (Akintelu *et al.*, 2019). Ecuador destaca como líder en cacao fino de aroma, concentrando el 63 % de las exportaciones mundiales; en 2024 exportó 471.157 toneladas, un 14,7 % más que el año anterior, principalmente a EE. UU., Países Bajos, Malasia, Indonesia y Alemania (Redacción El Oriente, 2025).

Sin embargo, la producción enfrenta graves amenazas sanitarias por enfermedades como moniliasis (*Moniliophthora roreri*), escoba de bruja (*M. perniciosa*) y pudrición negra (*Phytophthora* spp.), que ocasionan pérdidas del 30 % al 80 % según el manejo (Cobos Mora *et al.*, 2024). En Colombia, las pérdidas alcanzan el 40 %, equivalentes a 28.000 toneladas métricas (Correa *et al.*, 2014).

Los métodos tradicionales de control, basados en fungicidas y prácticas culturales, han perdido eficacia y plantean riesgos ambientales y sanitarios (Deberdt *et al.*, 2008; Hanada, 2010). Como alternativa sostenible destacan los endófitos, microorganismos que colonizan tejidos vegetales sin dañarlos y que actúan a través de diferentes mecanismos (Mejía *et al.*, 2008; Santoyo *et al.*, 2016).

Esta revisión analiza los avances en el uso de endófitos como biocontrol en cacao, sus mecanismos, eficacia frente a enfermedades específicas y perspectivas para sistemas productivos sostenibles.

1.2 Descripción del Problema

El manejo de enfermedades en cacao sigue siendo un desafío crítico para la agricultura tropical, especialmente en Ecuador, donde el cultivo es estratégico por su valor económico, social y cultural. Estas enfermedades generan pérdidas superiores al 50 % y, en casos extremos, hasta el 90 % (Ortíz *et al.*, 2015). En Colombia, la incidencia de moniliasis

alcanza el 22,8 % de las plantaciones y la escoba de bruja hasta el 95,1 % (Pabón *et al.*, 2016). En Ecuador, las pérdidas han llegado al 60 % de la cosecha y una incidencia en mazorcas del 64,7 % (MAG/IICA, 2001; Sánchez-Mora *et al.*, 2011). A nivel global, *Phytophthora* spp. causa pérdidas anuales estimadas en 423 millones de dólares (Ramírez, 2016).

Las estrategias convencionales, basadas en fungicidas y prácticas culturales, han demostrado ser insostenibles a largo plazo por la resistencia de los patógenos, su impacto ambiental, riesgos para la salud y altos costos (Hanada, 2010; Adu-Yeboah *et al.*, 2023).

En este escenario, los endófitos surgen como una alternativa ecológica e innovadora, gracias a mecanismos como competencia, antibiosis, micoparasitismo e inducción de defensas (Crozier, 2006; Mejía *et al.*, 2008). No obstante, su adopción aún es limitada debido a la falta de sistematización e integración entre la investigación científica y su aplicación práctica. Consolidar el conocimiento disponible resulta fundamental para avanzar en su implementación efectiva en los sistemas de producción de cacao.

1.3 Justificación del Problema

El control eficaz de las enfermedades fúngicas en *Theobroma cacao* es esencial para preservar la viabilidad económica, ambiental y social del cultivo en los países productores. En el caso de Ecuador, donde el cacao representa un patrimonio cultural y un componente clave de la economía rural, resulta fundamental impulsar estrategias de manejo menos dependientes de agroquímicos y más coherentes con principios agroecológicos y de bajo impacto ambiental.

Los microorganismos endófitos ofrecen una alternativa innovadora y ecológica al control convencional. Su capacidad para interactuar con la planta y suprimir patógenos mediante mecanismos naturales los posiciona como una herramienta clave en programas de manejo integrado, con potencial para reducir el impacto ambiental, los riesgos sanitarios y los

costos productivos. Además, su desarrollo está en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al promover prácticas agrícolas responsables, resilientes al cambio climático y basadas en bioinsumos locales.

No obstante, la adopción de los endófitos en campo es todavía incipiente, limitada por brechas en la sistematización de conocimientos, falta de validación en condiciones reales y escaso desarrollo tecnológico para su aplicación masiva.

Por ello, esta revisión es pertinente para consolidar la evidencia científica, identificar oportunidades de innovación y aportar lineamientos que faciliten su integración en sistemas productivos de cacao sostenibles y competitivos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar el potencial de hongos, bacterias y levaduras endófitas como agentes de biocontrol de enfermedades en *Theobroma cacao*, en diversos contextos agroclimáticos, a partir de una revisión sistemática de literatura científica.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Resumir la evidencia a partir de literatura científica disponible sobre hongos, bacterias y levaduras endófitas con actividad biocontroladora en el cultivo de cacao.
2. Describir y comparar los mecanismos de acción reportados para estos microorganismos endófitos en relación con su efecto sobre patógenos del cacao.
3. Evaluar la eficacia relativa de los endófitos frente a enfermedades como la moniliasis, la escoba de bruja y la pudrición negra, en distintos contextos agroclimáticos.
4. Identificar oportunidades, limitaciones y desafíos para su integración en estrategias de manejo integrado de enfermedades del cacao.

1.5 Marco Teórico

1.5.1 Importancia de la sanidad vegetal en cacao y su sostenibilidad

La sanidad vegetal aplicada al cultivo de cacao es un elemento esencial para garantizar su productividad, calidad y sostenibilidad a largo plazo. Este enfoque busca prevenir y minimizar las pérdidas causadas por plagas y enfermedades, las cuales afectan tanto el rendimiento como el valor comercial del cultivo, desde la etapa de campo hasta el almacenamiento y transporte (Jiménez *et al.*, 2023).

Las enfermedades representan uno de los principales factores de pérdida en la producción mundial de cacao. Se estima que, dependiendo de la variedad y de la región, pueden llegar a ocasionar hasta un 38% de pérdidas globales en este cultivo (Kongor *et al.*, 2024). Esta magnitud subraya la necesidad de estrategias eficaces de manejo fitosanitario que contribuyan a asegurar el rendimiento potencial del cacao en función de sus condiciones ecológicas y productivas específicas (Jiménez *et al.*, 2023).

La sanidad vegetal no solo busca proteger el cultivo de amenazas biológicas, sino también hacerlo dentro de un marco sostenible. En este sentido, se promueve el manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE), orientado a reducir el uso de productos químicos y a proteger el medio ambiente y la fertilidad del suelo (Kongor *et al.*, 2024). Esta estrategia es coherente con la necesidad de prácticas agrícolas más sostenibles, que garanticen la salud del agroecosistema cacao a mediano y largo plazo.

Además, el desarrollo de árboles de cacao genéticamente más resistentes a las principales limitaciones fitosanitarias se plantea como una vía complementaria para fortalecer la sostenibilidad del cultivo. La generación y uso de variedades mejoradas, fuertes y resilientes, permitiría enfrentar de forma más eficaz los retos sanitarios y climáticos del futuro, contribuyendo así a un sistema de producción de cacao más estable y exitoso (Cilas y Bastide, 2020).

1.5.2 Definición y características de los microorganismos endófitos

Los microorganismos endófitos son microbiomas que habitan en el interior de los tejidos vegetales sin causarles daño aparente. Establecen una relación simbiótica con las plantas hospedadoras, a las cuales ofrecen beneficios como la mejora del crecimiento vegetal, protección frente a patógenos y mayor tolerancia al estrés abiótico, a cambio de alimento, hospedaje y protección (Gonzales *et al.*, 2024; Anand *et al.*, 2023).

Según Vandana *et al.* (2021), estos microorganismos penetran en la planta a través de las raíces y colonizan espacios intercelulares, lo que les permite propagarse internamente y permanecer activos en diversos entornos. Han sido aislados de raíces y otros órganos de una gran diversidad de plantas, incluyendo algas, musgos, helechos, gimnospermas y angiospermas (Wen *et al.*, 2022).

Gonzales *et al.* (2024) proponen una clasificación amplia de los microorganismos endófitos en tres grupos:

Grupo 1: microorganismos que coexisten de forma estable dentro de la planta;

Grupo 2: organismos que pueden habitar cualquier tejido (encima y debajo del suelo);

Grupo 3: endófitos restringidos a raíces y tejidos por encima del suelo.

En particular, los hongos endófitos destacan por su capacidad para colonizar los tejidos vegetales sin inducir síntomas de enfermedad. Esta característica les permite contribuir positivamente al crecimiento de plantas en condiciones adversas, e incluso favorecer su desarrollo en suelos contaminados o degradados (Anand *et al.*, 2023; Gonzales *et al.*, 2024).

La relación mutualista entre hongos endófitos y plantas puede traducirse en diversos beneficios agronómicos y ecológicos como pueden ser la estimulación del crecimiento vegetal, la inhibición del desarrollo de patógenos, promueven la fitorremediación de suelos y aumentan la tolerancia a condiciones de estrés abiótico como salinidad, sequía y temperatura

extrema. Además, brindan protección frente a fitopatógenos, insectos y nematodos parásitos (Akram *et al.*, 2023).

Desde una perspectiva funcional, los endófitos juegan un papel esencial tanto a escala microscópica, participando en procesos metabólicos y fisiológicos de la planta, como a nivel macroscópico, influyendo en su aptitud, ecología y evolución (Chen *et al.*, 2023).

Por otro lado, la clasificación de los endófitos también puede realizarse en función de su estilo de vida. Anand *et al.* (2023) describen los siguientes tipos:

Endófitos oportunistas: bacterias que ingresan a las plantas para satisfacer sus propias necesidades;

Endófitos pasajeros: bacterias que entran por casualidad, sin establecer una relación duradera;

Endófitos obligados: microorganismos que dependen completamente de la vida dentro de una planta;

Endófitos facultativos: bacterias que pueden vivir tanto dentro de una planta como en otros ambientes.

Esta diversidad morfofuncional y ecológica de los endófitos, en conjunto, los convierte en aliados clave para el manejo sostenible de cultivos como el cacao, especialmente frente a los desafíos sanitarios y climáticos actuales.

1.5.3 Principios generales de biocontrol y su aplicación en agricultura

El control biológico, o biocontrol, se define como el uso de organismos vivos o sus productos para reducir la población de plagas microorganismos e insectos (fundamentalmente), aprovechando mecanismos naturales como la depredación, el parasitismo, la competencia y la producción de metabolitos antagonistas (Thilagam *et al.*, 2023; Pobozniak y Olczyk, 2025). Esta estrategia busca mantener el equilibrio ecológico de

los agroecosistemas y sustituir, total o parcialmente, el uso de agroquímicos, cuya aplicación intensiva ha provocado graves consecuencias para el ambiente y la salud humana.

Dwivedi y Tomer (2021) destacan que el biocontrol constituye una vía rápida y factible para establecer asociaciones microbianas equilibradas antes de la aparición de patógenos, lo que lo convierte en una herramienta clave dentro de las prácticas agrícolas sostenibles. En este marco, la agricultura contemporánea procura maximizar la productividad de los cultivos mediante estrategias que minimicen la degradación del suelo, la contaminación hídrica y la pérdida de biodiversidad.

La base ecológica del biocontrol se apoya en la estructura de la pirámide trófica, es decir, en las relaciones alimenticias entre organismos dentro de un ecosistema. Desde esta perspectiva, el control biológico se fundamenta en la introducción o estimulación de enemigos naturales que atacan y suprimen poblaciones de organismos fitopatógenos o insectos plaga (Dwivedi y Tomer, 2021). Los agentes de biocontrol pueden actuar a través de varios mecanismos, como la competencia por espacio y nutrientes, el parasitismo directo, la antibiosis (producción de sustancias antimicrobianas) y la inducción de respuestas defensivas en las plantas hospedadoras (Parra *et al.*, 2024).

Según Thilagam *et al.* (2023), los beneficios de aplicar el control biológico en agricultura se agrupan en tres grandes dimensiones:

Ecológicos: preservación de la biodiversidad y mejora de la resiliencia de los agroecosistemas.

Económicos: reducción de costos asociados al uso de pesticidas químicos.

Sociales: disminución de la exposición de los agricultores y consumidores a compuestos tóxicos.

Las técnicas de biocontrol son diversas e incluyen el uso de depredadores, parasitoides, patógenos y otros organismos benéficos (Pobozniak y Olczyk, 2025). Los

depredadores (como mariquitas, crisopas, arañas y ciertos ácaros) cazan y consumen directamente a sus presas. Los parasitoides, como las avispas del género *Trichogramma*, se desarrollan dentro de un hospedador, al que finalmente eliminan. Por su parte, bacterias, virus, hongos y nemátodos se emplean como patógenos específicos para suprimir poblaciones de plagas.

Asimismo, la estructura del paisaje agrícola influye en la eficacia del biocontrol. Prácticas como la diversificación de cultivos, la presencia de corredores biológicos y la reducción de monocultivos intensivos favorecen la permanencia y efectividad de los enemigos naturales (Pobozniak y Olczyk, 2025).

En este contexto, el biocontrol no solo representa una alternativa técnica al manejo convencional de plagas, sino también un pilar esencial para la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles, resilientes y ecológicamente funcionales.

1.5.4 Uso de endófitos para el control de enfermedades en cacao.

Los microorganismos endófitos son una alternativa prometedora y sostenible para el manejo fitosanitario del cacao. Su capacidad de colonizar tejidos y su diversidad de mecanismos de acción los posicionan como herramientas clave frente a diferentes enfermedades (Mejía *et al.*, 2008; Cobos Mora *et al.*, 2024). Se ha identificado una notable diversidad de endófitos en cacao, especialmente *Bacillus* spp., *Pseudomonas fluorescens*, *Trichoderma* spp., *Clonostachy* spp. y *Colletotrichum* spp., con capacidad para suprimir patógenos mediante antibiosis, competencia, micoparasitismo e inducción de defensas sistémicas (Vera *et al.*, 2018; Santoyo *et al.*, 2016).

De ahí que los endófitos no solo son una opción viable para reducir agroquímicos: también fortalecen la resiliencia del cacao y contribuyen a una bioeconomía más verde y justa.

1.5.5 Perspectivas y enfoques multidisciplinarios en biocontrol

Históricamente, la agricultura ha dependido en gran medida del uso intensivo de productos químicos para el control de plagas y enfermedades, con el objetivo de evitar pérdidas en el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, esta estrategia ha generado impactos ambientales adversos y resistencia en patógenos, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas más sostenibles. En este contexto, se han propuesto mecanismos biológicos para el manejo de fitopatógenos, entre ellos el uso de hongos filamentosos, cuya susceptibilidad al mejoramiento genético abre nuevas posibilidades para potenciar sus capacidades de control (Reza *et al.*, 2024).

En América Latina, los estudios sobre biocontrol han demostrado la efectividad de diversos enemigos naturales, como arañas, tijeretas, hormigas, crisopas, carábidos, estafilínidos y coccinélidos. Según Cividanes (2021), los escarabajos, en particular, han mostrado una incidencia destacada en la reducción de poblaciones de plagas en estudios de campo, lo que subraya el potencial del enfoque ecológico en contextos tropicales y subtropicales.

Otro avance relevante en este ámbito es el empleo de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, siglas en inglés de "Plant Growth-Promoting Rhizobacteria"), las cuales no solo actúan como agentes de biocontrol, sino que también mejoran aspectos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y metabólicos de las plantas. Espinosa *et al.* (2025) resaltan que las PGPR han dado lugar a una gama emergente de bioproductos agrícolas, incluyendo bioplaguicidas, biofertilizantes, bioinoculantes, biorremediadores y bioestimulantes. No obstante, aún persisten retos asociados a la comprensión del mecanismo de acción, eficacia en diferentes contextos agroclimáticos y escalabilidad tecnológica.

La implementación efectiva del biocontrol en una agricultura sostenible enfrenta diversos desafíos. Aunque esta estrategia representa una opción prometedora frente al uso de

agroquímicos, su aplicación demanda conocimientos más complejos, tanto en términos ecológicos como técnicos. En este sentido, la consolidación de bancos de germoplasma microbianos con propiedades antagónicas puede facilitar el desarrollo de bioproductos específicos y adaptados a las condiciones locales (Pino *et al.*, 2024).

Para avanzar en este campo, es necesario identificar agentes de biocontrol que presenten alta eficacia, capacidad de producción a escala, vida útil prolongada y compatibilidad con otras estrategias de manejo integrado. Además, se debe evaluar su impacto potencial sobre el microbioma del suelo y de las plantas, a fin de garantizar la sostenibilidad ecológica de su aplicación. En el contexto del cambio climático, Tyagi *et al.* (2024) advierten que las condiciones ambientales extremas pueden disminuir la efectividad de los agentes biológicos, lo que hace imprescindible el desarrollo de cepas resilientes que mantengan su funcionalidad en escenarios de estrés climático.

CAPÍTULO 2

2. Metodología.

2.1 Formulación y selección de alternativas de solución al problema

Durante la fase inicial del proyecto, se identificaron diversas alternativas metodológicas para abordar el problema relacionado con el uso de microorganismos endófitos como estrategias de biocontrol de enfermedades en *Theobroma cacao*. Entre las opciones consideradas se encontraron: (1) la ejecución de ensayos experimentales en condiciones controladas de laboratorio o invernadero; (2) el análisis de bases de datos provenientes de ensayos de campo realizados por entidades académicas o de producción agrícola; y (3) la realización de una investigación documental (revisión bibliográfica) de la literatura científica especializada en el tema.

Tras evaluar las ventajas, limitaciones, recursos disponibles y la naturaleza del programa académico, se optó por la tercera alternativa. Esta opción resultó ser la más pertinente, al permitir una síntesis estructurada y crítica del estado actual del conocimiento en el tema, además de identificar vacíos de información y oportunidades futuras de aplicación, todo dentro del marco de un estudio con enfoque profesionalizante.

La revisión bibliográfica sistemática permitió recopilar, comparar y sintetizar información relevante del tema, facilitando el análisis comparativo entre diferentes grupos de microorganismos endófitos (hongos, bacterias, levaduras), sus mecanismos de acción, su efectividad y viabilidad en distintas regiones productoras de cacao; permitiendo identificar tendencias, vacíos de investigación y oportunidades de aplicación.

2.2 Estrategia de búsqueda

La búsqueda de información se llevó a cabo entre febrero y abril de 2025, mediante el acceso a los siguientes recursos:

- Scopus, base de datos bibliográfica

- ScienceDirect, plataforma en línea
- SpringerLink, plataforma en línea
- Google Scholar, motor de búsqueda para literatura académica y científica
- Redalyc, sistema de indización
- SciELO, plataforma en línea (para estudios regionales)
- AGORA, base de datos
- FAO Document Repository, depósito digital de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (para literatura gris y documentos técnicos).

Se utilizaron combinaciones de palabras clave (en español e inglés), empleando operadores booleanos (AND, OR) para refinar los resultados.

Algunos términos empleados fueron:

- endófitos AND cacao
- biocontrol AND *Theobroma cacao*
- endophytic microorganisms AND plant pathogens
- *Trichoderma* AND *Moniliophthora*
- biological control AND cacao diseases
- cacao AND sustainable agricultura

Para gestionar la información se empleó el gestor de citas bibliográficas Zotero, el cual facilitó la organización por año de publicación, microorganismo, enfermedad abordada, mecanismo de acción y ubicación geográfica del estudio.

Asimismo, se emplearon herramientas digitales basadas en inteligencia artificial, como Elicit.org y Research Rabbit, que facilitaron la identificación de artículos relevantes y la visualización de redes de citación científica. Su integración en el proceso permitió

optimizar la búsqueda bibliográfica, reducir sesgos de selección y ampliar la cobertura temática del estudio.

2.3 Criterios de inclusión y exclusión

Se emplearon criterios de inclusión y exclusión que nos permitieron asegurar la utilidad, relevancia y uso ético de las fuentes de información primarias seleccionadas.

Criterios de inclusión:

- Artículos científicos, revisiones, tesis, libros y documentos técnicos publicados entre 2008 y 2025.
- Estudios enfocados en el uso de microorganismos endófitos en cacao y su relación con el control de enfermedades causadas por hongos y oomicetos.
- Documentos en español e inglés con texto completo disponible.
- Investigaciones desarrolladas en condiciones de laboratorio, invernadero o campo.

Criterios de exclusión:

- Estudios no relacionados directamente con *Theobroma cacao* y las enfermedades mencionadas.
- Investigaciones sobre biocontrol que no involucraran microorganismos endófitos.
- Fuentes sin respaldo académico o científico (blogs, artículos de opinión sin revisión por pares).
- Publicaciones duplicadas o con información redundante.

2.4 Selección y análisis de la información

De un total inicial de aproximadamente 250 publicaciones identificadas, se preseleccionaron 77 documentos que cumplían con los criterios establecidos. Tras una revisión exhaustiva del título, resumen y palabras clave, se seleccionaron 68 fuentes de información primaria como base principal para el desarrollo del marco teórico y el análisis de resultados.

Los textos fueron organizados en una matriz de revisión que permitió clasificar la información por:

- tipo de microorganismo (hongo, bacteria, levadura),
- patógeno objetivo (*Moniliophthora roreri*., *Moniliophthora perniciosa*., *Phytophthora spp.*),
- mecanismo de acción,
- tipo de estudio (*in vitro*, *in vivo*, a campo),
- país o región de origen,
- y resultados principales.

Este enfoque permitió identificar patrones comunes, contrastes entre estudios, limitaciones metodológicas y propuestas de selección aplicables al contexto agroecológico del cacao en América Latina.

2.5 Consideraciones éticas y de rigor científico

Se respetaron los principios de ética académica y científica durante la construcción del trabajo, garantizando:

- el uso adecuado de citas y referencias,
- la fidelidad en la interpretación de los resultados reportados por otros autores,
- y la transparencia en la delimitación del alcance de la revisión.

Asimismo, se consideraron los lineamientos metodológicos propuestos por Grant & Booth (2009) para revisiones narrativas, privilegiando la profundidad en el análisis por sobre la amplitud de las fuentes.

2.6 Identificación de efectos causales en los datos

Dado que el diseño no contempló intervención directa ni manipulación experimental, la identificación de efectos causales se abordó a través del análisis crítico de los métodos empleados en los estudios revisados. Se evaluaron los enfoques experimentales utilizados en cada publicación, considerando el tipo de diseño (*in vitro*, *in vivo*, en campo), controles utilizados, replicación, y validez interna de los resultados.

2.7 Enfoque multidisciplinario y aportes desde la sanidad vegetal

Este proyecto integra conocimientos de varias disciplinas como microbiología, fitopatología, biotecnología y agronomía. Desde la perspectiva de la sanidad vegetal, el aporte más valioso fue, sin duda, poner bajo la lupa, de manera crítica y reflexiva, el verdadero potencial de los microorganismos endófitos para integrarse en estrategias sostenibles de manejo de enfermedades. Y es que, en un país como Ecuador, donde el cacao no solo es un cultivo emblemático sino también sustento de miles de familias, resulta urgente explorar alternativas que sean efectivas, pero también respetuosas con el entorno.

La síntesis lograda a lo largo de este trabajo no pretende quedarse en el plano teórico. Muy al contrario, busca convertirse en una herramienta útil para la toma de decisiones informadas por parte de productores, técnicos de campo, investigadores y autoridades agrícolas. Además, envía un mensaje claro: es momento de apostar por soluciones biológicas que puedan sustituir, al menos en parte, a los tradicionales agroquímicos de síntesis, cuya aplicación indiscriminada ya ha demostrado generar resistencia en patógenos y efectos colaterales nada despreciables sobre los ecosistemas y la salud humana. Porque, al final,

producir de manera sostenible no es solo una opción técnica: es también una responsabilidad ética con las personas y con la tierra que nos alimenta.

CAPÍTULO 3

3. Resultados y discusión

El análisis de la literatura científica reveló un panorama cada vez más alentador sobre la eficacia de los microorganismos endófitos como agentes de biocontrol en *Theobroma cacao*. En esta sección se presentan, y se discuten de forma clara y sintética, los hallazgos más relevantes en cuanto a: especies de microorganismos con mayor protagonismo para el control biológico, enfermedades objetivo, mecanismos de acción más documentados y, por supuesto, los factores que condicionan su aplicación práctica.

3.1 Síntesis de la evidencia científica sobre microorganismos endófitos con actividad biocontroladora en cacao.

Como hemos mencionado, los microorganismos endófitos son una alternativa prometedora y sostenible para el manejo fitosanitario del cacao. Su capacidad de colonizar tejidos y su diversidad de mecanismos de acción los posicionan como herramientas clave frente a diferentes enfermedades (Mejía *et al.*, 2008; Cobos Mora *et al.*, 2024).

Se ha identificado una notable diversidad de endófitos en cacao, especialmente los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*, *Clonostachys* y *Colletotrichum*, con capacidad para suprimir patógenos mediante antibiosis, competencia, micoparasitismo e inducción de defensas sistémicas (Vera *et al.*, 2018; Santoyo *et al.*, 2016).

De ahí que los endófitos no solo son una opción viable para reducir agroquímicos: también fortalecen la resistencia del cacao y contribuyen a una bioeconomía más verde y justa.

Entre los protagonistas más estudiados destacan los siguientes:

- **Hongos:** Los del género *Trichoderma* son los endófitos por excelencia, especialmente *T. harzianum* y *T. stromaticum*, por su marcada actividad contra *Moniliophthora* spp. y *Phytophthora* spp. También destacan *Clonostachys*

rosea, *Fusarium* spp. y *Gliocladium* spp., con efectos igualmente notables en pruebas de campo y laboratorio (Hanada, 2010; López-Lima *et al.*, 2023).

- **Bacterias:** Aquí destacan *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y, en menor medida, *Enterobacter* spp. Estas bacterias actúan por distintos caminos: antibiosis, producción de sideróforos y activación de las defensas sistémicas de la planta, lo que las convierte en una especie de “doble escudo” para el cultivo (Serrano *et al.*, 2021; Vera Loor *et al.*, 2018).
- **Levaduras:** Aunque menos frecuentes en los estudios, géneros como *Candida* y *Saccharomyces* han mostrado cierta capacidad competitiva y la producción de compuestos antifúngicos, lo que sugiere un potencial aún por explorar (Guevara-Viejó, 2024).

3.2 Mecanismos de acción de los microorganismos endófitos en el control de enfermedades de *Theobroma cacao*.

Los endófitos protegen al cacao a través de una combinación de mecanismos directos e indirectos que, actuando a veces al mismo tiempo y a veces de forma sinérgica, consiguen frenar a los patógenos, estimular las defensas de la planta y limitar los recursos disponibles para los invasores (Vera Loor *et al.*, 2018; Muthu *et al.*, 2022).

a) Antibiosis.

Este mecanismo consiste en la producción de metabolitos secundarios con capacidad para inhibir o destruir al patógeno. Por ejemplo, *Trichoderma harzianum* sintetiza compuestos como trichodermina y viridina, mientras que *Bacillus subtilis* produce lipopéptidos — surfactina, iturina, fengicina —, que literalmente «rompen» las estructuras celulares de *Moniliophthora* y *Phytophthora* (Santoyo *et al.*, 2016; Serrano *et al.*, 2021; Martínez *et al.*, 2023).

b) Competencia por espacio y nutrientes.

Los endófitos colonizan rápidamente los tejidos del cacao, excluyendo a los patógenos de los nichos disponibles. Las bacterias del género *Bacillus*, por ejemplo, secuestran hierro mediante sideróforos, mientras que hongos como *Clonostachys rosea* y *Trichoderma asperellum* se instalan en las heridas de los frutos, bloqueando así la entrada de *Moniliophthora roreri* por ejemplo (Akram *et al.*, 2023; Waqar *et al.*, 2024).

c) Micoparasitismo.

Algunos hongos endófitos atacan directamente al patógeno, *Trichoderma stromaticum* es un buen ejemplo: rodea e inmoviliza a *Moniliophthora perniciosa* y degrada sus hifas con enzimas líticas impidiendo que avance (Souza, 2008; Guevara-Viejó, 2024).

d) Inducción de resistencia sistémica.

Quizás este sea el mecanismo más sofisticado: los endófitos activan las defensas inmunológicas del cacao, un poco como si «entrenaran» al sistema para futuras batallas. Estas respuestas, mediadas por hormonas como el ácido jasmónico, etileno y salicílico, llevan a la planta a expresar genes defensivos como *PR1*, *PAL* y *EFE*, aumentando su tolerancia frente a infecciones. *Trichoderma hamatum*, por ejemplo, no solo activa estas defensas, sino que incluso estimula el crecimiento de la planta (Mejía *et al.*, Bayle *et al.*, 2008; Fatma *et al.*, 2022).

En conjunto, estos mecanismos, al combinarse y reforzarse mutuamente, son los que permiten reducir de forma notable la incidencia y gravedad de las enfermedades del cacao. Además, son la base para diseñar bioinsumos eficaces que puedan adaptarse a las condiciones locales de cada región cacaotera.

3.3 Eficacia frente a moniliasis, escoba de bruja y pudrición negra en diversas regiones y condiciones

3.3.1 Enfermedades mejor controladas mediante endófitos

Los estudios revisados coinciden en que ciertas enfermedades del cacao responden mejor a las estrategias de biocontrol endofítico. Vale la pena destacar algunos casos emblemáticos:

- **Moniliasis (*Moniliophthora roreri*):** Las reducciones en incidencia reportadas oscilan entre un 20 % y un 60 %, según la cepa utilizada, las condiciones climáticas y el método de aplicación elegido (Krauss & Soberanis, 2022). En otras palabras, el contexto importa, y mucho.
- **Escoba de bruja (*Moniliophthora perniciosa*):** Aquí destaca especialmente *Trichoderma stromaticum*, que incluso ha dado lugar a un producto comercial: Tricovab®, validado y utilizado en Brasil, con resultados prometedores (Souza, 2008).
- **Pudrición negra del fruto (*Phytophthora palmivora*):** Diversas cepas de *Bacillus* y *Clonostachys* han demostrado inhibir el patógeno en ensayos *in vitro* y reducir significativamente la severidad en campo (Masanto, 2020; López-Lima *et al.*, 2023).

Estos hallazgos confirman, en conjunto, que los endófitos pueden integrarse de manera viable en programas de manejo integrado, especialmente cuando se combinan con prácticas agroecológicas bien planificadas. Sin embargo, existe una brecha entre los resultados obtenidos en condiciones controladas y los alcanzados en campo abierto.

3.3.2 Comparación entre resultados en laboratorios, invernadero y campo

Un patrón que se repite en casi todos los estudios analizados es la brecha entre los resultados obtenidos en condiciones controladas (laboratorios e invernaderos) y los que se logran en campo. Dicho en otras palabras: lo que funciona impecablemente en laboratorio no siempre se traduce con la misma eficacia en la realidad de una plantación. Por ejemplo, *Trichoderma harzianum* puede inhibir hasta un 85 % del crecimiento de *M. roreri* en pruebas *in vitro*, pero en campo esa eficacia suele reducirse a un rango entre 25 % y 40 %, dependiendo de factores como el momento (mes del año) de la aplicación y las condiciones ambientales (Mejía *et al.*, 2008; Hanada, 2009).

Entre las razones que explican esta discrepancia destacan:

- la intensa competencia con la microbiota nativa del suelo,
- la baja persistencia de las cepas inoculadas en el tiempo,
- y la falta de formulaciones adaptadas a las condiciones tropicales, que suelen ser altamente variables.

Todo esto subraya la necesidad de más investigación a largo plazo. Es fundamental priorizar estudios que validen no solo la eficacia biológica, sino también su viabilidad agroecológica, considerando la compleja interacción entre planta, microbioma y entorno. Solo así será posible cerrar esa brecha entre el laboratorio y el campo, para que los endófitos pasen de ser una promesa a convertirse en una herramienta confiable en manos de los productores.

3.4 Oportunidades y desafíos para su integración en programas sostenibles del manejo del cacao.

El desarrollo y adopción de microorganismos endófitos como biocontroladores en *Theobroma cacao* abre un horizonte de oportunidades para avanzar hacia un manejo fitosanitario más sostenible. Sin embargo, las evidencias revisadas también ponen de relieve

vacíos de conocimiento, limitaciones técnicas, regulatorias y sociales, así como posibles efectos adversos que deben considerarse cuidadosamente para garantizar su éxito a largo plazo.

3.4.1 Vacíos de conocimiento y oportunidades de investigación

Aunque los avances en este campo son indiscutibles, la verdad es que todavía existen varias brechas por cerrar. Algunas son más evidentes que otras, pero todas ofrecen oportunidades valiosas para orientar la investigación hacia soluciones más completas y adaptadas a la realidad de los productores.

Uno de los aspectos más notorios es la falta de estudios sobre consorcios microbianos: la mayoría de los trabajos se han centrado en cepas individuales, pero queda por explorar cómo hongos, bacterias y levaduras pueden combinarse en consorcios sinérgicos y más robustos. En la naturaleza, estos microorganismos no actúan solos, y quizás replicar esa colaboración sea clave para mejorar la eficacia (Vera Loor *et al.*, 2018).

De igual forma, la bioprospección de endófitos nativos sigue siendo limitada, a pesar de la extraordinaria riqueza microbiana de regiones megadiversas como la Amazonía y los Andes tropicales. Muchas de estas especies siguen sin ser caracterizadas, pese a su potencial biotecnológico (Hanada, 2010; Christian *et al.*, 2019).

Otro vacío importante es la escasa información sobre los impactos ecológicos a largo plazo. Aún no se sabe con certeza qué efectos tienen las inoculaciones repetidas sobre la microbiota del suelo, los insectos benéficos o la seguridad alimentaria. Responder estas preguntas es esencial para que las soluciones sean verdaderamente sostenibles y seguras (Membalik *et al.*, 2021).

Asimismo, la integración con las prácticas agrícolas locales sigue siendo débil. Tecnologías prometedoras no siempre encajan con las realidades del campo: su compatibilidad con los sistemas agroforestales típicos del cacao o con los calendarios

culturales aún está poco documentada, lo cual limita que los propios productores las adopten con confianza (Del Rio & Jeffries, 2018).

Estas brechas no son solo desafíos, sino también puntos de partida. Nos recuerdan que la investigación futura debe enfocarse en desarrollar soluciones contextualizadas, sostenibles y técnicamente viables, que respeten tanto la biología del cacao como las prácticas culturales de quienes lo cultivan.

En definitiva, la literatura revisada deja claro que los microorganismos endófitos no son una simple alternativa: son una estrategia viable y ecológica que ya se perfila como una pieza central en la transición hacia una agricultura más respetuosa con el ambiente. Claro está, su adopción no será automática. Requiere sortear barreras técnicas, ecológicas y sociales que solo pueden superarse desde un enfoque verdaderamente multidisciplinario e integrador, donde la ciencia, la innovación y la gente trabajen de la mano.

3.4.2 Limitaciones técnicas, regulatorias y sociales

A nivel técnico, las limitaciones más evidentes son la variabilidad en la eficacia cuando se trasladan las pruebas del laboratorio al campo, así como la baja persistencia de las cepas en condiciones reales (Mejía *et al.*, 2008; Hanada, 2009). La formulación de bioinsumos estables y eficientes sigue siendo un reto, debido a la pérdida de viabilidad durante el almacenamiento, las exigencias ambientales específicas de las cepas y la falta de tecnologías robustas para su producción (Muthu *et al.*, 2022; Delgado *et al.*, 2021).

En el plano regulatorio, las normativas actuales imponen a los bioinsumos requisitos comparables, o incluso superiores, a los de los plaguicidas químicos, lo cual desalienta la inversión en su desarrollo y comercialización (FAO, 2021; Larran & Maboreke, 2020). Esto es particularmente problemático en países en desarrollo, donde los marcos legales para bioinsumos aún son difusos o excesivamente rígidos.

Por otra parte, persisten barreras sociales relacionadas con la percepción de los productores y técnicos. En muchos casos, existe desconfianza hacia estas tecnologías, alimentada por el desconocimiento o por experiencias fallidas previas. Para revertir esta situación es crucial fortalecer los programas de extensión agrícola, capacitar a los actores del sector y validar las soluciones en condiciones reales que generen confianza en los usuarios (Del Rio & Jeffries, 2018; Nicot *et al.*, 2016).

3.4.3 Potenciales efectos adversos y consideraciones ecológicas.

Aunque los endófitos son generalmente considerados seguros y benéficos, no están exentos de riesgos ecológicos y agronómicos si no se evalúan adecuadamente. Por un lado, la introducción de cepas exógenas puede alterar la microbiota nativa, desplazar microorganismos beneficiosos locales o incluso activar patógenos oportunistas (Hanada, 2010; Osei *et al.*, 2020; Christian *et al.*, 2019).

También se ha documentado la posibilidad de latencia patogénica: algunas cepas pueden comportarse como endófitos bajo ciertas condiciones y volverse dañinas bajo estrés ambiental (Schulz & Boyle, 2005; Lohse *et al.*, 2014). Por otra parte, ciertos endófitos son capaces de producir micotoxinas, comprometiendo la inocuidad alimentaria y afectando organismos no objetivo (Pitt & Hocking, 2009).

Además, la dispersión descontrolada de estas cepas podría alterar comunidades microbianas y vegetales adyacentes, e incluso interferir en funciones fisiológicas de la planta, afectando procesos como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y el rendimiento cuando las condiciones no son óptimas (Compant *et al.*, 2010; Shade *et al.*, 2012; Hardoim *et al.*, 2015; López-Lima *et al.*, 2021). Finalmente, existe también el riesgo de que los patógenos desarrollen resistencia o que las comunidades locales se adapten, reduciendo la eficacia a largo plazo (Mellon & Benbrook, 2020).

3.4.4 Perspectivas y tendencias futuras

Superar estas limitaciones y riesgos abre la puerta a un futuro prometedor para el biocontrol endofítico en cacao. Entre las principales tendencias se encuentra la profundización en los mecanismos moleculares y fisiológicos que explican la eficacia de las cepas, lo que permitirá seleccionar variantes más adaptadas y robustas (Álvarez *et al.*, 2025).

También se prevé un impulso a la conservación de la biodiversidad microbiana como recurso estratégico para el desarrollo de bioinsumos sostenibles y resilientes al cambio climático (Hanada, 2010; Christian *et al.*, 2019). En paralelo, emergen oportunidades para diversificar los beneficios económicos a través de bioprospección interdisciplinaria, explorando aplicaciones más allá de la agricultura, como en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética (Backman & Sikora, 2008; Vera Loor *et al.*, 2018).

El diseño de consorcios microbianos sinérgicos y la integración de tecnologías genómicas para selección, monitoreo y trazabilidad son también apuestas clave para aumentar la eficacia y sostenibilidad de los bioinsumos (Vera Loor *et al.*, 2018; Álvarez *et al.*, 2025). Finalmente, la validación en campo, el desarrollo de formulaciones accesibles y la compatibilidad con las prácticas de los productores son aspectos fundamentales para transformar el biocontrol endofítico en una herramienta confiable y ampliamente adoptada (Hermosa *et al.*, 2013; Krauss *et al.*, 2013).

En conjunto, las oportunidades y desafíos identificados subrayan la importancia de un enfoque multidisciplinario que combine investigación aplicada, innovación tecnológica, políticas públicas adecuadas y programas de extensión agrícola para consolidar a los endófitos como una pieza central del manejo sostenible del cacao.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

La presente revisión bibliográfica permitió analizar en profundidad el potencial de los microorganismos endófitos como una estrategia sostenible de biocontrol para el manejo de enfermedades del cacao (*Theobroma cacao*). La evidencia reunida demuestra que hongos y bacterias endófitas, especialmente de los géneros *Trichoderma*, *Clonostachys*, *Bacillus* y *Pseudomonas*, poseen mecanismos efectivos, como antibiosis, micoparasitismo, competencia por espacio y nutrientes, e inducción de defensas sistémicas, que les permiten actuar como verdaderos “aliados invisibles” en la protección del cultivo frente a patógenos devastadores como *Moniliophthora roreri*, *Moniliophthora perniciosa* y *Phytophthora spp.*.

Sin embargo, la eficacia de estos agentes no es uniforme ni automática. La literatura muestra que su desempeño depende de la cepa específica, de la enfermedad objetivo, de las condiciones agroclimáticas y de las prácticas agrícolas implementadas. Además, los resultados en laboratorio son, en general, más consistentes que los obtenidos en campo, donde intervienen múltiples factores bióticos y abióticos que modulan las interacciones planta–microbioma–ambiente. Esto pone de relieve la necesidad de validar las estrategias de biocontrol en escenarios productivos reales, mediante estudios a largo plazo.

También persisten desafíos significativos que limitan su adopción masiva: variabilidad en la efectividad en campo, riesgos potenciales para las comunidades microbianas nativas y para la inocuidad alimentaria, ausencia de normativas específicas que favorezcan su registro y comercialización, además de barreras técnicas y sociales relacionadas con su producción, formulación y aceptación por parte de los productores.

En síntesis, los microorganismos endófitos constituyen una alternativa científicamente respaldada, ecológica y viable para integrarse a programas de manejo integrado del cacao, con un alto potencial para reducir la dependencia de plaguicidas químicos, mejorar la

resiliencia del cultivo, y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas cacaoteros. Para alcanzar estos objetivos, es indispensable fortalecer los vínculos entre la investigación, la innovación tecnológica, las políticas públicas y las necesidades concretas de los productores, quienes son, en última instancia, los actores clave en la implementación efectiva de estas soluciones.

4.2 Recomendaciones

A partir del análisis realizado, se proponen las siguientes acciones prioritarias para potenciar el desarrollo, aplicación segura y adopción efectiva de los microorganismos endófitos como agentes de biocontrol en el cultivo de cacao:

- **Validación en campo y a largo plazo:** Diseñar y ejecutar ensayos de campo prolongados, en distintas regiones productoras, para evaluar la eficacia, persistencia y comportamiento de las cepas en condiciones reales. Estos estudios son esenciales para ajustar las estrategias a contextos locales y para generar confianza en productores y técnicos.
- **Bioprospección de endófitos nativos:** Profundizar en la caracterización de la diversidad microbiana local, especialmente en regiones megadiversas como la Amazonía, con el fin de identificar cepas endémicas con mayor adaptación ecológica y potencial biotecnológico.
- **Desarrollo de consorcios microbianos:** Avanzar en la investigación sobre consorcios sinérgicos que combinen hongos, bacterias y levaduras, como una estrategia para formular bioinsumos más estables, eficaces y resilientes frente a variabilidad ambiental y microbiológica.
- **Fortalecimiento del marco normativo:** Establecer normativas claras, específicas y proporcionales para los bioinsumos microbianos, que garanticen su calidad, seguridad y trazabilidad, sin imponer barreras desincentivadoras

para su desarrollo y comercialización. Las herramientas genómicas y metagenómicas pueden apoyar la regulación basada en evidencia científica comprobable.

- **Evaluación de riesgos ecológicos y alimentarios:** Implementar protocolos de monitoreo para identificar y mitigar posibles efectos adversos sobre la microbiota nativa, los organismos no objetivo y la inocuidad del grano de cacao, asegurando que la sostenibilidad ambiental sea integral.
- **Capacitación y transferencia tecnológica:** Fortalecer los programas de extensión agrícola y educación continua, facilitando la apropiación de estas tecnologías por parte de los productores a través de capacitaciones prácticas, materiales didácticos y acompañamiento técnico constante.

En suma, los microorganismos endófitos representan una alternativa promisoría para la cacaocultura sostenible. Su éxito, sin embargo, dependerá de la capacidad de articular investigación interdisciplinaria, innovación biotecnológica, políticas públicas efectivas y la participación activa y consciente de los agricultores. Solo con un enfoque integrado será posible transformar esta estrategia en una solución real, sostenible y duradera para la protección y resiliencia del cacao y de quienes lo cultivan.

Referencias

- Adu-Yeboah, K., Mensah, A., & Owusu, D. (2023). Efectos fitotóxicos del glifosato en plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en sistemas agroforestales. *Journal of Tropical Agriculture*, 41(2), 112–121.
- Afzal, I., Shinwari, Z. K., Sikandar, S., & Shahzad, S. (2019). Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic regulation. *Microbiological Research*, 221, 36-49.
- Akintelu, S. O., Mele, L., Sobanke, V. O., & Adewunmi, M. (2019). Adoption of some cocoa production technologies by cocoa farmers in Kogi State, Nigeria. *International Journal of Agriculture Innovation, Technology and Globalisation*, 1(1), 31-43. <https://doi.org/10.1504/IJAITG.2019.099602>
- Akram, S., Ahmed, A., He, P., He, P., Liu, Y., Wu, Y., Munir, S., & He, Y. (2023). Uniendo el rol de los hongos endófitos contra los fitopatógenos y su interacción. *Journal of Fungi (Basel)*, 9(1), 72. doi:10.3390/jof9010072
- Álvarez, C., Morales, D., Padilla, A., & Ortiz, R. (2025). Avances en el uso de endófitos como estrategia biotecnológica en cacao. *Revista de Fitopatología Tropical*, 21(1), 12–31.
- Anand, U., Pal, T., Yadav, N., Kumar, V., Tripathi, V., Kumar, K., Kumar, A., Sunita, K., Kumar, A., Bontempi, E., Ma, Y., Kolton, M. & Kishore, A. (2023). Current Scenario and Future Prospects of Endophytic Microbes: Promising Candidates for Abiotic and Biotic Stress Management for Agricultural and Environmental Sustainability. *Microb Ecol* 86, 1455–1486 <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02190-1>
- Arora, N., & Mishra, S. (2021). Microbial endophytes: a sustainable approach towards climate-resilient agriculture. *Environmental Sustainability*, 4(1), 60-70. <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00148-3>

- Backman, P. A., & Sikora, R. A. (2008). Endophytes: An emerging tool for biological control. *Biocontrol News and Information*, 29(1), 9N–12N.
- Bailey, B. A., Bae, H., & Crozier, J. (2008). Antibiosis, mycoparasitism, and colonization success for endophytic *Trichoderma* isolates with biological control potential in *Theobroma cacao*. *Biological Control*, 46(1), 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.02.004>
- Chen, Y., Chen, H. & Chung, W. (2023). Endophytic Fungal Diversity in *Cirsium kawakamii* from Taiwan. *Journal of Fungi*, 9(11), 1076. <https://doi.org/10.3390/jof9111076>
- Christian, N., Allen, D. & Clay, K. (2019). Ecological outcomes of endophyte–host interactions under stress. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50, 49–70.
- Cilas, C. & Bastide, P. (2020). Challenges to Cocoa Production in the Face of Climate Change and the Spread of Pests and Diseases. *Agronomía*, 10(9), 1232. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- Cividanes, F. (2021). Carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) and biological control of agricultural pests in Latin America, *Annals of the Entomological Society of America*, 114, (2), 175–191. <https://doi.org/10.1093/aesa/saaa051>
- Cobos Mora, F., Montero Flores, P., Gómez Villalva, J., & Pérez Almeida, I. (2024). Eficiencia de agentes antagonicos para el control de *Moniliophthora roreri* en el cultivo de cacao. *Magazine De Las Ciencias: Revista De Investigación E Innovación*, 9(2), 16–29. <https://doi.org/10.33262/rmc.v9i2.3100>
- Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010). Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 669–678.

- Correa Álvarez, J., Castro Martínez, S., & Coy, J. (2014). Estado de la moniliasis del cacao causada por *Moniliophthora roreri* en Colombia. *Acta Agronómica*, 63(4), 388–399.
- Crozier, J., Holst, J., & Samuels, G. J. (2006). *Molecular characterization of fungal endophytic morphospecies isolated from stems and pods of Theobroma cacao*. *Plant Pathology*, 55(5), 663–676.
- Deberdt, P. et al. (2008). Impact of environmental factors, chemical fungicide and biological control on cacao pod production dynamics and black pod disease (*Phytophthora megakarya*) in Cameroon. *Biological Control*, 44(2), 149–159.
- Del Rio, M., & Jeffries, P. (2018). Challenges in adoption of biocontrol technologies by farmers: Perspectives and case studies. *Biological Control*, 123, 18-26.
- Delgado, A., Bernardo, L., Chaves, F., Romanazzi, G., & Paparella, A. (2021). Biocontrol agents: challenges and future perspectives. *Biocontrol Science and Technology*, 31(4), 419–438.
- Dwivedi, S. y Tomer, A. (2021). Mass Production and Quality of Biological Control Agents for Pest Management. *Recent Developments in Microbial Technologies. Environmental and Microbial Biotechnology*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4439-2_11
- Espinosa, B., Jiménez, O., Ramírez, R., Preciado, P., Buendía, A., Sifuentes, G., Sariñana, M., & Rivas, T. (2025). Biocontrol of Phytopathogens Using Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Bibliometric Analysis and Systematic Review. *Horticulturae*, 11(3), 271. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030271>
- Espinoza, R. F., Pérez, E. D., & Zorrilla, J. C. (2019). *Biofungicidas para el control de moniliasis en el cultivo de Theobroma cacao L. clon 575 en la ESPAM MFL*. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí. Recuperado de <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/537>.

- FAO. (2021). *The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado de <https://www.fao.org/3/cb5135en/cb5135en.pdf>
- Fatma, M., Asgher, M., Iqbal, N., Rasheed, F., Sehar, Z., Sofo, A., & Khan, N. A. (2022). Señalización de etileno en entornos estresantes: Análisis del conocimiento colaborativo. *Plants (Basel)*, 11(17), 2211. doi:10.3390/plants11172211
- Frac, M., Hannula, S. E., Bełka, M., & Jędryczka, M. (2018). Microbial biocontrol agents against soil-borne pathogens: Review of mechanisms, interactions and efficacy under field conditions. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2157.
- Gonzales, E., Cortes, C., Blanco, R., y Loayza, J. (2024). Microorganismos endófitos una evaluación de su importancia en la agricultura ecológica. *LATAM Revista Latinoamericana De Ciencias Sociales Y Humanidades*, 5(3), 1186 – 1194. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i3.2107>
- Guevara-Viejó, M. (2024). Biological control of *Moniliophthora roreri* with endophytes. *Journal of Tropical Biotechnology*, 9(2), 45–60.
- Hanada, R. E. (2010). Evaluación de hongos endófitos del cacao como agentes de biocontrol. Tesis doctoral, Universidad de São Paulo.
- Hardoim, P. R., van Overbeek, L. S., & van Elsas, J. D. (2015). Properties of bacterial endophytes and their proposed role in plant growth. *Trends in Microbiology*, 16(10), 463-471.
- Hermosa, R., et al. (2013). *Trichoderma* spp. como agentes de control biológico: formulaciones comerciales y regulación. *Microbial Biotechnology*, 6(5), 513–527.
- Jiménez-Díaz, R., López, M. y Albajes, R. (2023). La Sanidad Vegetal en la Agricultura y la Silvicultura: Retos y Perspectivas para la Próxima Década. REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA DE ESPAÑA. <http://hdl.handle.net/10261/349820>

- Kim, D., Lee, Y., & Park, S. (2020). Overcoming barriers to microbial biocontrol adoption: Policy, education, and innovation strategies. *Journal of Agricultural Policy and Research*, 7(3), 195-210.
- Kongor, J., Owusu, M. & Oduro, C. (2024). Cocoa production in the 2020s: challenges and solutions. *CABI Agriculture and Bioscience*, 5(1), 102. <https://doi.org/10.1186/s43170-024-00310-6>
- Krauss, U., & Soberanis, W. (2022). Field evaluation of biocontrol agents in cacao. *Crop Protection*, 154, 105190.
- Krauss, U., et al. (2013). Consortium-based biocontrol strategies for cacao. *Biological Control*, 65(1), 60–67.
- Larran, S. G., & Maboreke, S. (2020). Regulatory challenges for microbial biopesticides: The need for harmonized guidelines. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1234.
- Lohse, M., et al. (2014). Pervasive effects of a dominant foliar endophytic fungus on host genetic and phenotypic expression in a tropical tree. *Frontiers in Microbiology*, 5, 479. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00479>
- López-Lima, D., et al. (2023). Endophytic fungi from *Theobroma cacao*.... *Biological Control*, 181, 105268.
- López-Lima, D., Ramírez, A., & Torres, M. (2021). Efectos de inoculantes microbianos en la fisiología y productividad de cultivos tropicales. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(2), 329-342.
- MAG/IICA. 2001. Identificación de mercados y tecnología para productos agrícolas tradicionales de exportación. Quito, Ecuador. 45 p.
- Masanto, M. N. (2020). Antagonistic activity of *Bacillus subtilis* on *Phytophthora*.
- Mejía, L. C., et al. (2008). Endophytic fungi as biocontrol agents of pathogens in cacao. *Biological Control*, 46(1), 4–14.

- Mellon, M., & Benbrook, C. (2020). Evolution of resistance to biocontrol agents: Implications for sustainable pest management. *Pest Management Science*, 76(5), 1505-1513.
- Membalik, R. A., Asman, A., Amin, M., & Bahar, A. (2021). Endophytes in cacao: opportunities and risks in disease management. *Journal of Agricultural Microbiology*, 13(2), 70–82.
- Muthu, M., Ahmad, N., Shivanand, P., & Metali, F. (2022). El papel de los endófitos en la lucha contra el estrés inducido por hongos y bacterias en las plantas. *International Journal of Microbiology*. PMID: PMC9571366.
- Nicot, P. C., Cerf, M., & Le Pallec, F. (2016). The adoption of biological control in plant protection: A socio-technical transition. *Sociologia Ruralis*, 56(4), 531-552.
- Ongena, M., & Jacques, P. (2008). Bacillus lipopeptides: Versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends in Microbiology*, 16(3), 115-125.
- Ortíz, R., Torres, L., & Hernández, J. (2015). Evaluación de la incidencia y severidad de enfermedades fúngicas en plantaciones de cacao en Tabasco, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(2), 95–102.
- Osei, P. A., Dupuy, J. W., & Wilkins, O. (2020). Effects of agroforestry practices on the diversity of fungal and bacterial endophytes in *Theobroma cacao* leaves in Cameroon. *Microbial Ecology*, 80(3), 678–691. <https://doi.org/10.1007/s00248-020-01554-x>
- Pabón, M., Rodríguez, A., & Gómez, C. (2016). Incidencia de moniliasis y escoba de bruja en cultivos de cacao en Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 45–54.
- Parra, F., Bruno, I., García, M., González, S., Villarreal, M., Córdova, L., Escalante, A. & Santos, S. (2024). The genus Bacillus as biological control agent against pests and pathogens for sustainable agricultura. *Revista mexicana de fitopatología*, 42. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2024-34>

Pérez-Jaramillo, J. E., Carrión, V. J., & Raaijmakers, J. M. (2019). The microbiome as a key player in sustainable agriculture: Implications for plant health and productivity. *Frontiers in Plant Science*, 10, 471.

Pino, V., Cobos, F., Troya, G. y Reyes, H. (2024). Avances en la evaluación de microorganismos como agentes biocontroladores de patógenos causantes de enfermedades en el cultivo de arroz. *CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROPECUARIA*, 9(1), 27–35. <https://doi.org/10.24054/cyta.v9i1.2955>

Pitt, J. I., & Hocking, A. D. (2009). *Fungi and Food Spoilage* (3rd ed.). Springer.

Pobożniak, M., & Olczyk, M. (2025). Biocontrol in Integrated Pest Management in Fruit and Vegetable Field Production. *Horticulturae*, 11(5), 522. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050522>

Ramírez, J. (2016). Impacto económico global de las enfermedades fúngicas en el cacao. *Informe Técnico de la Organización Internacional del Cacao*, 1–23.

Redacción El Oriente. (2025). El secreto del cacao ecuatoriano, el alma del mejor chocolate del mundo.

Reza, S., Aguilar, C., Rodríguez, R., Michelena, G., Iliná, A., y Martínez, J. (2024). Avances recientes y perspectivas científicas y tecnológicas del biocontrol ejercido por *Trichoderma* spp. *Cienciacierta*, 20(80), 361-379. <https://revistas.uadec.mx/index.php/CienciaCierta/article/view/63>

Rodríguez, C., Herrera, J., & Silva, M. (2022). Resilience and adaptation of microbial inoculants under changing environmental conditions. *Journal of Plant Pathology and Microbiology*, 13(1), 101-115.

Saldoran, J., & Cumagun, C. J. R. (2021). Observations on the potential of an endophytic fungus associated with cacao leaves against *Phytophthora palmivora*.

Sánchez-Mora, F.; Garcés, F.R.; Vera, J.F.; Ramos, R.A.; Troya, F.; Díaz, T.G. 2011. Cuantificación de enfermedades en mazorcas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la zona central del Litoral Ecuatoriano. In: Memorias del VIII Simposio Internacional de Recursos Genéticos para América Latina y El Caribe, Quito, Ecuador, 2011. CD.

Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., Orozco-Mosqueda, M. D. C., & Glick, B. R. (2016). Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research*, 183, 92-99.

Schulz, B., & Boyle, C. (2005). The endophytic continuum. *Mycological Research*, 109(6), 661-686.

Serrano, L., Moreno, A. S., Castillo, D. S. D., Bonilla, J., Romero, C. A., Galarza, L. L., & Coronel-León, J. R. (2021). Biosurfactants synthesized by endophytic *Bacillus* strains as control of *Moniliophthora perniciosa* and *Moniliophthora roreri*. *Scientia Agricola*, 78(Supl. 1), e20200172. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0172>

Shade, A., Peter, H., Allison, S. D., Baho, D. L., Berga, M., Bürgmann, H., & Handelsman, J. (2012). Fundamentals of microbial community resistance and resilience. *Frontiers in Microbiology*, 3, 417.

Singh, R., Kumar, M., & Verma, P. (2021). Advances in microbial consortia design for crop protection: Insights from metagenomics and systems biology. *Agricultural Sciences*, 12(4), 233-249.

Souza, J., Bailey, B., Pomella, A., Herbal, E., Murphy, A., Bae, H., & Hebbbar, P. (2008). Colonization of cacao seedlings by *Trichoderma stromaticum*, a mycoparasite of the witches' broom pathogen, and its influence on plant growth and resistance. *Science Direct*.

Thilagam , P., Sharanappa , C., Roy , S., Deb , L., Padhan, S., Srividhya , S., & Awadhiya , P. (2023). A Review on Advances in Biocontrol Techniques for Managing

Insect Pests in Sustainable Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 2114–2125. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113373>

Tolozá, A., Yockteng, R., Pérez, A., Salinas, C., & Caro, J. (2024). Microbiota and domestication: implications for endophyte-based biotechnology in cacao. *Plant Microbiome Journal*, 2(1), 10–25.

Tyagi, A., Lama, T., Kashtoh, H., Mir, R., Mir, Z., Manzoor, S., Manzar, N., Gani, G., Vishwakarma, S., Almalki, M., & Ali, S. (2024). A Review on Biocontrol Agents as Sustainable Approach for Crop Disease Management: Applications, Production, and Future Perspectives. *Horticulturae*, 10(8), 805. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080805>

Vandana, U., Rajkumari, J., Singha, L., Satish, L., Alavilli, H., Sudheer, P., Chauhan, S., Ratnala, R., Satturu, V., Mazumder, P. & Pandey, P. (2021). The Endophytic Microbiome as a Hotspot of Synergistic Interactions, with Prospects of Plant Growth Promotion. *Biology*, 10(2), 101. <https://doi.org/10.3390/biology10020101>

Vázquez, L., & Zabalgogezcoa, I. (2020). Endophytic fungi: Potential sources of bioactive compounds for agriculture. *Agronomy*, 10(7), 985.

Vera Loo, A., Mejía, L. C., & Herrera, M. (2018). Microorganismos endófitos en cacao: aplicaciones y desafíos. *Revista de Ciencia y Tecnología Agraria*, 22(3), 45–56.

Villamil Carvajal, J. E., Viteri Rosero, S. E., & Villegas Orozco, W. L. (2015). Aplicación de antagonistas microbianos para el control biológico de *Moniliophthora roreri* Cif & Par en *Theobroma cacao* L. Bajo condiciones de campo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7441–7450. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47830>

Waqar, M., Khan, A., & Ali, S. (2024). Transcriptomics and microbiome modeling: New frontiers in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbial Ecology*, 15, 1123.

Wen, J., Okyere, S., Wang, S., Wang, J., Xie, L., Ran, Y., & Hu, Y. (2022). Endophytic Fungi: An Effective Alternative Source of Plant-Derived Bioactive Compounds for Pharmacological Studies. *Journal of Fungi*, 8(2), 205. <https://doi.org/10.3390/jof8020205>