Sage Sphere Multidisciplinary Studies

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

Bacillus spp como bioinsumo en el cultivo de Theobroma cacao: una revisión de la literatura sobre sus efectos agronómicos

Bacillus spp as a bioinput in Theobroma cacao cultivation: a review of the literature on its agronomic effects

Autores:

Manuel Alvarado Brito
Facultad de Posgrados, Maestría en Biotecnología, Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador
malvaradob19@unemi.edu.ec
https://orcid.org/0009-0008-3035-8659

Elías Matamoros Macías
Facultad de Posgrados, Maestría en Biotecnología, Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador
malvaradob19@unemi.edu.ec
https://orcid.org/0009-0003-2990-8418

Enviado: 22-10-2026 **Revisado:** 02-11-2026
Aceptado: 08-11-2026 **Publicado:** 09-11-2026

Cómo citar este artículo:

Alvarado Brito, M., & Matamoros Macías, E. (2026). Bacillus spp como bioinsumo en el cultivo de Theobroma cacao: una revisión de la literatura sobre sus efectos agronómicos. *Sage Sphere Multidisciplinary Studies*, *3*(1), 1-25. https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

RESUMEN

Esta revisión analiza la evidencia sobre cepas de Bacillus aplicadas al cacao (Theobroma cacao L.) y sus efectos en crecimiento, nutrición, sanidad y rendimiento. Se realizó una búsqueda dirigida en PubMed, AGRIS y portales editoriales hasta septiembre de 2026; los estudios se analizaron según identidad del aislado, formulación, vía de aplicación, comparador y ambiente experimental. Algunas cepas colonizaron tejidos y mejoraron variables de desarrollo inicial, mientras que otras redujeron indicadores de moniliasis o pudrición en condiciones experimentales. La producción de metabolitos antifúngicos y la solubilización de fosfato respaldan mecanismos posibles, pero los ensayos in vitro no demuestran por sí solos eficacia en plantaciones. Los resultados difieren entre cepas, patógenos y diseños, y la evidencia sobre nutrición tisular, rendimiento de grano seco y rentabilidad sigue siendo limitada. Se concluye que las aplicaciones de Bacillus tienen potencial en viveros y en el manejo integrado de enfermedades de mazorca, condicionado por la identidad de la cepa y el contexto de uso. Se requieren ensayos de campo en varias localidades y temporadas con controles adecuados y variables comerciales.

Palabras clave: antagonismo microbiano; endófitos; fitopatógenos; inoculación; rizobacterias; vivero.

ABSTRACT

This review examines evidence on Bacillus strains applied to cacao (Theobroma cacao L.) and their effects on growth, nutrition, plant health, and yield. A targeted search of PubMed, AGRIS, and journal sites covered publications available through September 2026. Studies were assessed by strain identity, formulation, application route, comparator, and experimental setting. Certain strains colonized cacao tissues and improved early growth variables; others reduced indicators of frosty pod rot or black pod rot under experimental conditions. Antifungal metabolites and phosphate solubilization support plausible mechanisms, but in vitro activity does not establish field efficacy. Results vary among strains, pathogens, and study designs, while direct evidence for tissue nutrition, dry bean yield, and economic performance remains limited. Bacillus-based treatments show potential for nurseries and integrated pod disease management, subject to strain identity and local conditions. Multi-location, multi-season field trials with suitable controls and commercial outcomes are needed.

Keywords: biocontrol; endophytes; inoculation; microbial antagonism; nursery; rhizobacteria.

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

1. INTRODUCCIÓN

El cacao (Theobroma cacao L.) constituye un cultivo de importancia económica y social en Ecuador por su amplia superficie cultivada, su participación en las cadenas de acopio, transformación y exportación, y su contribución a los ingresos de las familias rurales. Para 2019, la cadena nacional comprendía 601 954 ha cultivadas y una producción de 283 680 t de grano seco, lo que situaba al cacao como el cultivo permanente de mayor superficie del país (Avadí, 2023). Su relevancia también se relaciona con los medios de vida de los productores y con la necesidad de mantener sistemas agrícolas capaces de combinar productividad, diversificación y resiliencia frente a cambios económicos y climáticos (Vaast & Somarriba, 2014).

El desempeño agronómico del cacao depende de la interacción entre el genotipo, las condiciones del suelo, la disponibilidad hídrica y nutricional, la sombra y las prácticas de manejo. Los sistemas agroforestales pueden contribuir a conservar servicios ecosistémicos y diversificar las funciones productivas, aunque sus beneficios varían de acuerdo con el diseño y la intensidad de manejo (Niether et al., 2020). Asimismo, en Ecuador se han evaluado estrategias basadas en enmiendas orgánicas y manejo del microbioma del suelo como alternativas para mejorar la salud edáfica y sostener la productividad del cultivo (Schmidt et al., 2025).

Sin embargo, el desarrollo y la productividad del cacao están condicionados por factores sanitarios, nutricionales y ambientales. La moniliasis causada por Moniliophthora roreri afecta directamente la proporción de frutos comercializables, mientras que las enfermedades asociadas con Phytophthora spp., la variabilidad de las precipitaciones, el estrés térmico y las diferencias de manejo pueden modificar el crecimiento y la cosecha (Bailey et al., 2018; Jaimes-Suárez et al., 2022). A estas limitaciones se suman problemas relacionados con la disponibilidad de nutrientes y la calidad del suelo, lo que evidencia la necesidad de estrategias complementarias que favorezcan el funcionamiento integral del cultivo.

En este contexto, los bioinsumos microbianos han adquirido interés como herramientas complementarias para la promoción del crecimiento, la nutrición vegetal y el manejo de enfermedades. Su acción puede estar relacionada con antagonismo frente a fitopatógenos, competencia por recursos, colonización de tejidos o rizosfera y estimulación de respuestas

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

vegetales (Glare et al., 2012; Köhl et al., 2019). No obstante, su eficacia depende de la identidad del microorganismo, su viabilidad, formulación, concentración y condiciones de aplicación, por lo que su utilización debe integrarse con otras prácticas agronómicas y no considerarse como un sustituto universal del manejo convencional (Malusá & Vassilev, 2014).

Entre los microorganismos utilizados con estos fines, Bacillus spp. presenta características de interés para el desarrollo de bioinsumos. La capacidad de formar endosporas favorece su supervivencia durante la producción, almacenamiento y exposición a condiciones ambientales adversas (Fira et al., 2018). Además, determinadas cepas pueden colonizar raíces o tejidos vegetales y producir compuestos relacionados con la promoción del crecimiento, la disponibilidad de nutrientes y el control biológico. Sin embargo, estas propiedades varían entre especies y cepas, incluso dentro del complejo B. subtilis, por lo que los efectos observados con un aislamiento específico no deben generalizarse a todo el género (B. Fan et al., 2017).

Los mecanismos atribuidos a Bacillus spp. incluyen la producción de fitohormonas, sideróforos y metabolitos antimicrobianos, la solubilización de nutrientes, la competencia frente a fitopatógenos y la inducción de respuestas de defensa vegetal (Ongena & Jacques, 2008; Pieterse et al., 2014; Poveda & González-Andrés, 2021; Radhakrishnan et al., 2017). Estas capacidades sustentan su potencial agronómico; sin embargo, la presencia de un mecanismo funcional no implica necesariamente una respuesta favorable en condiciones productivas, por lo que resulta necesario diferenciar entre evidencia mecanística y efectos comprobados sobre la planta.

En Theobroma cacao, se han evaluado diferentes cepas y aislados de Bacillus en condiciones de laboratorio, vivero y campo. Las cepas BT8 y BP24 mostraron capacidad para colonizar tejidos de plántulas, aunque solo BT8 redujo significativamente la severidad causada por Phytophthora capsici (Melnick et al., 2008). Asimismo, la cepa 629 mostró colonización sistémica y efectos favorables sobre variables vegetativas, y posteriormente fue identificada como B. amyloliquefaciens 629 (Leite et al., 2013; SantAnna et al., 2015). En condiciones de campo, otros aislados de Bacillus han mostrado respuestas sanitarias frente a M. roreri (Páez-Martínez et al., 2024; Villamil Carvajal et al., 2015). Estos antecedentes evidencian

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

potencial para el crecimiento y la protección vegetal, aunque los resultados no son necesariamente equivalentes entre cepas ni condiciones experimentales.

A pesar de estos avances, la evidencia disponible presenta heterogeneidad en las cepas evaluadas, formulaciones, dosis, condiciones de aplicación y variables de respuesta. Además, los estudios se concentran principalmente en antagonismo, crecimiento inicial y sanidad vegetal, mientras que las evaluaciones directas de nutrición y rendimiento son comparativamente menos frecuentes (Galeano-Vanegas et al., 2026; Kasim et al., 2024; Schmidt et al., 2025). Esta dispersión dificulta establecer conclusiones generales sobre el alcance agronómico de Bacillus spp. en cacao. En este contexto, la pregunta que orienta la revisión es: ¿qué evidencia reporta la literatura científica sobre los efectos agronómicos de la aplicación de cepas, aislados, inoculantes y formulaciones a base de Bacillus spp. en el cultivo de Theobroma cacao? En consecuencia, el objetivo de esta revisión es analizar la evidencia científica disponible sobre la aplicación de Bacillus spp. en el cultivo de Theobroma cacao, considerando sus mecanismos de acción y los efectos reportados sobre el crecimiento, la nutrición, la sanidad vegetal y el rendimiento.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una revisión de la literatura de carácter descriptivo y crítico sobre la aplicación de cepas, aislados e inoculantes de Bacillus spp. en Theobroma cacao L., con énfasis en crecimiento, nutrición, sanidad vegetal y rendimiento. La búsqueda bibliográfica se efectuó en septiembre de 2026 mediante PubMed, AGRIS de la FAO y los portales de las revistas que publicaron los estudios originales; se consideraron publicaciones disponibles hasta esa fecha, sin imponer inicialmente un año de inicio. Se combinaron los términos “Bacillus”, “Theobroma cacao”, “cacao” y “cocoa” con “endophyte”, “rhizosphere”, “inoculant”, “plant growth”, “phosphate solubilization”, “biocontrol”, “Moniliophthora”, “Phytophthora”, “field” y “yield”, mediante los operadores AND y OR. También se revisaron las referencias de los trabajos pertinentes. La búsqueda fue dirigida a la pregunta de revisión y no se planteó como revisión sistemática ni metaanálisis.

Se incluyeron artículos originales arbitrados que identificaran un Bacillus al menos a nivel de género y evaluaran su aislamiento, aplicación o actividad relevante para cacao, tanto in vitro como en vivero, invernadero y campo. Para discutir efectos sobre la planta se exigió

que hubiera una comparación entre tratamientos o una descripción explícita de los resultados en crecimiento, absorción o disponibilidad de nutrientes, enfermedad o producción. Los trabajos exclusivamente mecanísticos y las revisiones generales se utilizaron para explicar plausibilidad biológica, sin tratarlos como prueba de eficacia agronómica en cacao. Se excluyeron duplicados, estudios en otros cultivos sin evaluación en cacao, trabajos donde no era posible distinguir la contribución de Bacillus dentro de una mezcla y fuentes que no permitían verificar el diseño o el resultado principal. Los estudios con compost u otros microorganismos se conservaron solo cuando el diseño permitía interpretar por separado el tratamiento bacteriano o señalar expresamente la imposibilidad de atribución.

De cada estudio se registraron año y lugar, origen e identificación de la cepa, tipo de preparado, dosis o concentración cuando se informó, método y frecuencia de aplicación, etapa del cacao, condiciones de ensayo, comparador, tiempo de seguimiento y variables medidas. La información se ordenó en cuatro grupos de respuesta: crecimiento y desarrollo, nutrición, sanidad vegetal y rendimiento. Se compararon primero los resultados dentro de cada grupo y luego entre estudios, dando mayor peso a mediciones en plantas y campo que a ensayos de placa para sostener afirmaciones de eficacia. Las diferencias entre cepas, formulaciones, dosis, genotipos, condiciones ambientales y duración se usaron para explicar resultados divergentes. Dada la heterogeneidad de los diseños y las variables, el análisis fue narrativo; no se calcularon efectos combinados.

La búsqueda se diseñó como revisión narrativa y no se conservó una bitácora completa de resultados por fuente, fecha y ecuación de búsqueda. En consecuencia, no es posible reconstruir de manera verificable los números de registros identificados, duplicados, exclusiones y estudios incluidos ni presentar un diagrama PRISMA retrospectivo. La interpretación se limita al conjunto de trabajos citados y no supone una búsqueda exhaustiva.

3. RESULTADOS

Desarrollo y análisis de la literatura

Cepas, aislados e inoculantes de Bacillus spp. utilizados en cacao

La literatura reúne materiales biológicos que no son intercambiables. Un aislamiento recuperado de una planta sana, una suspensión de células usada en un ensayo y un bioinsumo formulado para almacenamiento y aplicación representan etapas distintas de desarrollo

tecnológico. En cacao se han estudiado bacterias procedentes de tejidos internos, frutos y rizosfera del propio cultivo, pero también cepas originalmente obtenidas de otras especies vegetales (Koua et al., 2020; Leite et al., 2013; Melnick et al., 2008). El origen puede facilitar la búsqueda de candidatos adaptados al nicho, aunque por sí solo no demuestra persistencia después de aplicar la bacteria ni un beneficio agronómico.

La colección de Crisostomo-Panuera et al. (2024), obtenida en tres distritos de Amazonas (Perú), incluye Bacillaceae con perfiles variables de antagonismo frente a M. roreri y de solubilización mineral. En semillas de genotipos colombianos, Toloza-Moreno et al. (2024) también identificaron aislados de Bacillus con producción de ácido indolacético y actividad ACC desaminasa. Ambas aproximaciones amplían las fuentes de selección, pero los ensayos funcionales no equivalen todavía a una recomendación de inoculación en campo.

Melnick et al. (2008) evaluaron cuatro aislados procedentes de cultivos anuales. Los aislados BT8 y BP24, identificados como B. cereus y provenientes de tomate y papa, respectivamente, colonizaron hojas de cacao durante más de 68 días cuando se aplicaron con el coadyuvante Silwet L-77. La población recuperada fue predominantemente epífita; solo una fracción menor se detectó dentro del tejido. Por tanto, llamarlos simplemente “endófitos del cacao” ocultaría tanto su origen externo como la distribución real de la colonización. La comparación entre BT8 y BP24 es especialmente útil: ambos persistieron, pero la protección observada contra Phytophthora capsici se atribuyó a BT8. La presencia de la bacteria en la hoja no bastó para predecir la respuesta sanitaria.

En Brasil, Leite et al. (2013) aislaron la cepa 629 de árboles sanos de cacao y la describieron inicialmente como B. subtilis mediante marcadores moleculares, junto con aislados de Enterobacter cloacae. Su aplicación a semillas o al sustrato permitió recuperar el endófito en distintos órganos de las plántulas. Falcão et al. (2014) estudiaron la cepa citada como B. subtilis ALB629 y documentaron crecimiento inicial y actividad antifúngica; SantAnna et al. (2015) revisaron su identidad mediante secuencias gyrB y recA y la asignaron a B. amyloliquefaciens. La denominación 629 o ALB629 y la reclasificación obligan a rastrear la identidad de la cepa antes de contar esas publicaciones como evidencias independientes de especies diferentes. El registro molecular y la conservación del aislado serían condiciones mínimas para reproducir estos resultados.

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

El trabajo de Koua et al. (2020) ofrece otra modalidad: a partir de muestras de rizosfera de cacao en Côte d'Ivoire identificó 50 aislados de B. subtilis y examinó la formación de biopelícula, la producción de ácido indolacético, la solubilización de fosfato y genes asociados con lipopéptidos. Se trata de una selección funcional de candidatos, no de una prueba de inoculación de cacaotales. Por ello, los porcentajes de aislados positivos describen la colección analizada y no la probabilidad de que cualquier cepa comercial produzca esos efectos en una finca. En años recientes, el cribado de rizobacterias en agroecosistemas cacaoteros también ha avanzado hasta evaluar respuestas de frutos en campo, aunque con observaciones breves (Galeano-Vanegas et al., 2026).

Una colección distinta evaluada por Loguercio et al. (2023) mostró que las respuestas de plántulas inoculadas podían ser beneficiosas, neutras o desfavorables y que el aumento de biomasa radical no siempre acompañaba al crecimiento del vástago. El contraste refuerza la necesidad de medir raíces y parte aérea por separado antes de priorizar una cepa.

Los trabajos de sanidad en fruto muestran mayor diversidad de procedencias y grados de identificación. Masanto et al. (2020) también recuperaron Bacillus endófitos de mazorcas sanas en Indonesia y los evaluaron primero en cultivo y después sobre frutos separados de la planta. Villamil Carvajal et al. (2015) aplicaron en campo el aislado local Bacillus sp. B3, sin atribuirlo a una especie concreta. Páez-Martínez et al. (2024) compararon cuatro cepas endófitas en Esmeraldas y destacaron Bacillus sp. 33 y B. amyloliquefaciens 24, obtenidas del mesocarpio del fruto. El estudio posterior sobre frecuencia de aplicación se centró en B. amyloliquefaciens, cepa 24, mediante suspensiones de esporas, en plantas adultas Bernal-Cabrera et al. (2025). Es más preciso describir estas intervenciones como aislados o suspensiones experimentales que como productos comerciales estandarizados, salvo que el artículo documente portador, estabilidad y control de calidad.

De la Cruz-López et al. (2022) caracterizaron compuestos orgánicos volátiles de cinco especies de Bacillus aisladas como endófitas del cacao y de otro género bacteriano. Pratama et al. (2013) evaluaron B. subtilis frente a P. palmivora en placas. En ambos casos el material biológico estaba aún en una fase de selección que exige validación posterior en la planta.

También se han probado combinaciones con manejo orgánico: Kasim et al. (2024) cruzaron tres dosis de compost bovino con cuatro densidades de B. subtilis en plántulas. El diseño factorial permite observar interacciones, pero el mayor valor en un tratamiento

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

conjunto no debe presentarse como efecto exclusivo de la bacteria. En conjunto predominan aislamientos del complejo B. subtilis y cepas locales en fase experimental, con algunos aislados de B. cereus procedentes de otros cultivos. Las diferencias de identificación, procedencia y formulación impiden hablar de "Bacillus spp." como si fuera un insumo único. Para comparar tratamientos debe quedar claro qué cepa se aplicó, qué se midió y frente a qué control se estableció la diferencia (Kaminsky et al., 2019; Kasim et al., 2024; Melnick et al., 2008; Páez-Martínez et al., 2024).

La tecnología de formulación influye en la supervivencia durante secado, almacenamiento y rehidratación; Bashan et al. (2014) describen portadores y preparados líquidos con propiedades diferentes. Un análisis ecológico de Kaminsky et al. (2019); Koua et al. (2020) advierte, además, que seleccionar una cepa por su desempeño de laboratorio puede no predecir su establecimiento en suelos con microbiotas residentes. Estas consideraciones deben incorporarse al diseño del bioinsumo para cacao.

Mecanismos de acción de Bacillus spp. con relevancia agronómica

Los mecanismos posibles se agrupan en promoción del crecimiento, modificación de la disponibilidad de nutrientes y protección frente a patógenos. Pueden coexistir, pero su demostración requiere pruebas distintas: aislar un microorganismo de raíces demuestra establecimiento; detectar una molécula en cultivo demuestra capacidad de producción bajo esas condiciones; medir una respuesta de la planta bajo control adecuado permite hablar de efecto agronómico. Confundir esos niveles convierte una hipótesis razonable en una afirmación causal excesiva (Falcão et al., 2014; Koua et al., 2020; Leite et al., 2013).

En promoción del crecimiento, el ácido indolacético es de interés por su relación con la arquitectura radical. Koua et al. (2020) detectaron producción de este compuesto en sus aislados de rizosfera, pero no inocularon plántulas para demostrar que el ácido fuera la causa de una raíz más desarrollada. En cambio, Falcão et al. (2014) registraron mayor desarrollo radical tras aplicar ALB629 a semillas germinadas, sin aislar un mecanismo hormonal único. El nexo entre ambas observaciones es una interpretación plausible, no una demostración de que todas las cepas actúen mediante la misma fitohormona. La modificación de raíces puede alterar la exploración del sustrato, pero su beneficio dependerá de las condiciones de agua y nutrientes.

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

La colonización constituye un requisito práctico para muchas respuestas, aunque no garantiza eficacia. Leite et al. (2013) recuperaron la cepa 629 en toda la plántula aproximadamente 15 a 20 días después de inocular semillas o suelo; el método de inoculación influyó en algunas respuestas de crecimiento. Melnick et al. (2008), por su parte, encontraron persistencia foliar de BT8 y BP24 con predominio epífito y sin detección de movimiento de las bacterias a hojas nuevas. La reducción de enfermedad en hojas no colonizadas por BT8 fue compatible con una respuesta sistémica inducida, pero el experimento no permite atribuirla de manera definitiva a una ruta molecular específica. La formación de biopelículas observada por Koua et al. (2020) podría favorecer la permanencia en superficies, aunque se midió en tubo y no en raíces de cacao inoculadas.

En Arabidopsis, Beauregard et al. (2013) demostraron inducción de biopelículas de B. subtilis por polisacáridos vegetales. Bais et al. (2004) relacionaron la biopelícula y surfactina con la protección radical frente a Pseudomonas syringae. La función de la surfactina también varió según la especie bacteriana y el órgano colonizado en los experimentos de (Aleti et al., 2016) y (Stoll et al., 2021). Estas pruebas de mecanismo en otras plantas respaldan hipótesis para cacao, pendientes de comprobación en sus propios tejidos.

En nutrición, la solubilización de fósforo y la captación de hierro mediante sideróforos suelen considerarse funciones candidatas. En la colección de Koua et al. (2020), una proporción de aislados solubilizó fosfato en medio de cultivo; el resultado indica capacidad bajo un sustrato y un medio definidos. No demuestra por sí mismo una mayor concentración de fósforo en hojas ni una menor necesidad de fertilizante en cacao. El efecto real depende de pH, tipo de fósforo retenido, comunidad microbiana y demanda de la planta. Tampoco se puede inferir una mejor nutrición porque creció más una plántula: habría que medir nutrientes disponibles en suelo y concentraciones o acumulación en tejidos, junto con biomasa, para separar absorción, dilución por crecimiento y otros mecanismos (Kasim et al., 2024; Koua et al., 2020).

La protección vegetal combina antagonismo directo y respuestas de la planta. Falcão et al. (2014) mostraron que ALB629 inhibía en cultivo a Moniliophthora perniciosa y otros hongos; el sobrenadante libre de células conservó actividad, lo que respalda la producción de algún compuesto antifúngico, todavía no identificado allí como responsable del efecto en cacao. En los aislados de Koua et al. (2020) se detectaron genes asociados con

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

surfactina, fengicina e iturina, cuya frecuencia varió entre cepas. La presencia del gen no prueba producción en la hoja, dosis efectiva en el sitio de infección ni supresión de la enfermedad. Competencia por espacio y nutrientes, antibiosis, enzimas hidrolíticas y activación de defensas son rutas posibles que deben comprobarse según cepa y patógeno.

De la Cruz-López et al. (2022) detectaron mezclas de volátiles de endófitos de cacao y evaluaron su inhibición de M. roreri sin contacto directo; la actividad de los compuestos sintéticos dependió de la mezcla y la concentración. Villavicencio-Vásquez et al. (2026) identificaron fengicina de B. subtilis DS03 por espectrometría y observaron sinergia de una emulsión con aceite esencial de canela frente a aislados del patógeno. Esta formulación se probó in vitro y su estabilidad fisicoquímica no establece por sí sola eficacia sobre mazorcas.

El comportamiento frente a P. capsici ilustra esa exigencia experimental. BT8 y BP24 permanecieron en hojas, pero solo BT8 redujo significativamente la severidad en discos foliares después de la colonización; la protección observada en tejido nuevo sugirió una contribución de defensas inducidas (Melnick et al., 2008). Frente a M. roreri, los ensayos en mazorcas y árboles adultos aportan una prueba más cercana al uso agrícola, pero no identifican por sí solos si la reducción de síntomas procede de metabolitos, ocupación del nicho o resistencia de la planta (Bernal-Cabrera et al., 2025; H. Fan et al., 2017; Páez-Martínez et al., 2024). Así, los mecanismos orientan la selección de cepas; la validez agronómica requiere medir por separado colonización, enfermedad y resultado productivo.

En un patosistema diferente, H. Fan et al. (2017) relacionaron la producción de surfactina de B. subtilis 9407 y la colonización con el control de una enfermedad bacteriana. Su diseño apoya la estrategia de medir ambas variables, pero no demuestra que la misma relación explique la respuesta frente a oomicetos u hongos del cacao.

Efectos agronómicos de Bacillus spp. en Theobroma cacao

Crecimiento y desarrollo

Los resultados más claros de crecimiento corresponden a etapas tempranas. Leite et al. (2013) observaron aumentos en altura, número de hojas y materia seca con algunos tratamientos endófitos, aunque la respuesta no fue idéntica entre aislados ni métodos de aplicación. Como también estudiaron E. cloacae y mezclas, la evidencia de cada tratamiento debe conservarse por separado al atribuir el efecto a Bacillus. Falcão et al. (2014) evaluaron ALB629 30 días después de inocular semillas germinadas y comunicaron incrementos cercanos a 14

% en área foliar, 7,6 % en altura del tallo y hasta 30 % en la medida del sistema radical respecto del control. Son mejoras relevantes para producción de material vegetal, pero no prueban que se sostengan hasta la madurez ni que aumenten la cosecha.

Loguercio et al. (2023) observaron que el cociente de biomasa raíz/vástago podía mejorar aun cuando la biomasa total disminuía; por ello, un indicador aislado puede exagerar el beneficio. Toloza-Moreno et al. (2024) describieron rasgos hormonales en endófitos de semillas, sin demostrar que esa producción se traduzca en crecimiento de árboles adultos.

En vivero, Kasim et al. (2024) encontraron interacción entre 2,5 kg de compost por bolsa y 10^{12} UFC mL^{-1} de B. subtilis para clorofila y área foliar; la dosis de compost de 2,5 kg por bolsa mostró el mejor resultado de altura. El estudio permite identificar que sustrato e inoculación interactúan, aunque no atribuye todos los cambios observados a Bacillus en solitario. Una lectura conjunta sugiere que se dispone de evidencia de crecimiento inicial con cepas concretas, pero faltan comparaciones prolongadas entre plántulas tratadas y no tratadas después del trasplante (Falcão et al., 2014; Kasim et al., 2024; Leite et al., 2013).

Nutrición vegetal

La evidencia directa sobre nutrición es menos concluyente que la referida al crecimiento. Koua et al. (2020) documentaron solubilización de fosfato por aislados de la rizosfera, pero el ensayo se hizo en medio de cultivo. No midió fósforo disponible después de inocular un suelo cacaotero, concentración foliar ni absorción total de nutrientes en plantas tratadas. Los cambios en clorofila registrados por Kasim et al. (2024) pueden ser compatibles con diferencias fisiológicas o nutricionales; sin análisis de elementos en tejido y sin separar la interacción con compost no equivalen a demostrar mayor captación de nitrógeno, fósforo o hierro por acción bacteriana. En consecuencia, es correcto hablar de potencial de movilización de nutrientes y de señales indirectas, no de una mejora nutricional general ya comprobada en campo.

En la rizosfera de cacao peruano, Crisostomo-Panuera et al. (2024) observaron distribución desigual de aislados capaces de solubilizar fosfato, zinc o producir sideróforos. Una síntesis cuantitativa de biofertilizantes de varios cultivos detectó que la respuesta productiva cambia con clima y fósforo del suelo Schütz et al. (2018); sus promedios no deben atribuirse a Bacillus en cacao. Se requieren mediciones de nutrientes en tejidos y grano en el cultivo objetivo.

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

Sanidad vegetal

Frente a Phytophthora spp., Melnick et al. (2008) evaluaron el desafío con P. capsici en discos de hojas de plántulas previamente colonizadas. BT8 redujo la severidad durante el periodo de observación, mientras que la persistencia de BP24 no se tradujo en una protección equivalente. Es una prueba de respuesta foliar bajo condiciones controladas; el patógeno, la dosis del coadyuvante y el órgano medido deben tenerse presentes antes de extrapolarla a incidencia de pudrición de mazorcas en una plantación. Masanto et al. (2020) compararon numerosos aislados de frutos de cacao frente a P. palmivora en placas y, en una prueba sobre mazorcas desprendidas, un aislado de B. subtilis mostró la menor severidad entre las bacterias ensayadas. Esa prueba no equivale a protección sostenida de árboles en campo. Para M. perniciosa, el antagonismo de ALB629 mostrado por Falcão et al. (2014) fue in vitro. Su aumento del éxito de injerto en campo es interesante, pero tampoco equivale a un ensayo que cuantifique la incidencia de escoba de bruja.

Pratama et al. (2013) documentaron inhibición de P. palmivora por B. subtilis bajo confrontación de laboratorio. Ese resultado no permite calcular una reducción de pudrición de mazorcas en campo, porque las condiciones de contacto y de exposición son distintas.

La evidencia frente a M. roreri incluye ensayos de campo. En Colombia, Villamil Carvajal et al. (2015) compararon dos aislados de Trichoderma, el Bacillus sp. B3 y un testigo. B3 redujo el daño externo e interno frente al testigo en 13,5 % y 8,5 %, respectivamente, pero el tratamiento con Trichoderma H20 obtuvo mejores resultados y las diferencias estadísticas favorecieron a este último. El trabajo aporta una comparación agronómica útil sin justificar que B3 sea la mejor alternativa del ensayo. En Esmeraldas, Páez-Martínez et al. (2024) evaluaron cuatro cepas endófitas en campo; Bacillus sp. 33 y B. amyloliquefaciens 24 destacaron por valores de incidencia promedio de 4,4 a 7,6 %, severidad externa de 3,6 a 6,2 % y severidad interna de 22 a 30 %. Estas cifras describen los tratamientos informados, no una reducción porcentual extrapolable a otras fincas.

Los resultados de Crisostomo-Panuera et al. (2024) confirman que incluso un antagonismo elevado en confrontación directa constituye una etapa de cribado. La emulsión de fengicina descrita por Villavicencio-Vásquez et al. (2026) añade caracterización química y estabilidad, aunque necesita ensayos en fruto y campo antes de compararse con suspensiones bacterianas vivas.

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

Bernal-Cabrera et al. (2025) examinaron la frecuencia de aplicación de B. amyloliquefaciens en cacao Nacional EET-103 de 14 años, con tratamientos cada 15, 30 o 45 días durante 90 días. Informaron colonización endofítica y menores valores de incidencia y severidad con aplicaciones quincenales. Sin embargo, el resumen del propio artículo señala ausencia de diferencias con el control en parte de la comparación; por ello, la conclusión debe formularse como un resultado condicionado por la frecuencia, las variables y el contraste estadístico concreto, no como eficacia inequívoca en todos los indicadores. Los ensayos de campo fortalecen la plausibilidad del biocontrol, pero la magnitud y estabilidad de la protección necesitan repetición en ambientes y temporadas diferentes.

Rendimiento y productividad

Los estudios citados miden con mayor frecuencia área foliar, vigor, incidencia o daño de frutos que producción comercial. Una mazorca con menos síntomas podría incrementar el volumen aprovechable, pero la relación debe comprobarse con número de frutos cosechados, peso de grano seco por planta o rendimiento por superficie. El mayor éxito de injerto con ALB629 y los cambios de sanidad obtenidos con Bacillus sp. B3 o cepas endófitas no son medidas directas de rendimiento (Falcão et al., 2014; Páez-Martínez et al., 2024; Villamil Carvajal et al., 2015).

Galeano-Vanegas et al. (2026) midieron durante 30 días la tasa relativa de crecimiento de frutos bajo inoculación bacteriana, inoculación del patógeno y combinaciones. El tratamiento con el patógeno mostró la mayor tasa, interpretada como posible hipertrofia transitoria; por ello, mayor tamaño temprano del fruto no indica mayor cantidad de grano sano. Kasim et al. (2024) se limitaron a plántulas y su interacción con compost tampoco informa producción. Incluso en trabajos de manejo de suelo con biofertilizantes mixtos y mediciones de cosecha, el efecto no puede asignarse a Bacillus si el producto incluye otros organismos y no se comparan sus componentes por separado (Schmidt et al., 2025). La conclusión prudente es que aún no se dispone, entre los estudios aquí analizados, de una demostración consistente de aumento de rendimiento del cacao atribuible a Bacillus aplicado solo.

Factores que condicionan la efectividad de Bacillus spp.

La identidad de la cepa es la primera fuente de variación. BT8 y BP24 comparten identificación como B. cereus y pudieron persistir en hojas, pero no ofrecieron la misma reducción de enfermedad; 629, inicialmente denominada B. subtilis, fue

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

reclasificada como B. amyloliquefaciens. Por ello, identificar solo el género o usar nombres taxonómicos antiguos dificulta comparar trabajos y reproducir un tratamiento. El lugar de aislamiento tampoco predice por sí solo el efecto: cepas ajenas al cacao pudieron establecerse temporalmente, mientras que los aislados propios del cultivo requieren la misma validación en plantas y campo (Melnick et al., 2008; Páez-Martínez et al., 2024; SantAnna et al., 2015). La capacidad de colonizar depende del tejido, la etapa del cultivo y el modo de aplicación. En plántulas, la inoculación de semillas o suelo dio lugar a colonización sistémica con la cepa 629 y el método modificó algunas respuestas; en aplicaciones foliares, BT8 persistió principalmente sobre la superficie y requirió un coadyuvante en las condiciones estudiadas. Un resultado obtenido en plántulas recién emergidas no se traslada directamente a árboles adultos con follaje, arquitectura y presión de enfermedad distintos. Además, la respuesta podría diferir entre genotipos, pero los ensayos disponibles no permiten establecer una clasificación robusta de genotipos más receptivos (Bernal-Cabrera et al., 2025; Leite et al., 2013; Melnick et al., 2008).

La formulación y la dosis condicionan la viabilidad desde el almacenamiento hasta el sitio de acción. En un ensayo se empleó un coadyuvante foliar, en otro se aplicaron bacterias a semillas y en campo se utilizaron suspensiones de esporas; estas modalidades no generan la misma exposición del tejido. El experimento de Kasim et al. (2024) mostró que la densidad bacteriana interactuó con la dosis de compost para algunas respuestas de las plántulas. Bernal-Cabrera et al. (2025) compararon intervalos de 15, 30 y 45 días, lo que muestra que la frecuencia es una variable experimental y un costo operativo. Para recomendar una pauta reproducible harían falta concentración viable al aplicar, estabilidad del preparado, descripción del portador y una relación dosis respuesta observada en campo.

La temperatura, la humedad, las lluvias y el suelo influyen potencialmente en supervivencia y establecimiento, además de modificar la enfermedad de manera independiente. Una reducción de síntomas en una temporada de menor presión de M. roreri no representa necesariamente el mismo beneficio en otra. Galeano-Vanegas et al. (2026) atribuyeron parte de la variabilidad de las respuestas de fruto a condiciones de campo no controladas y al periodo corto de seguimiento. La composición de la microbiota residente, la sombra y el manejo nutricional también pueden alterar la oportunidad de colonización; son hipótesis

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

razonables para cacao que exigen comparaciones explícitas y no deben presentarse como efectos cuantificados por los ensayos citados.

En tomate, Stoll et al. (2021) compararon dos cepas de B. velezensis con antagonismo in vitro semejante, pero distinta colonización foliar y protección inducida. La lección experimental para cacao es registrar población viable y ubicación de la cepa después de asperjar; las propiedades medidas en placa no reemplazan la exposición efectiva del fruto.

4. DISCUSIÓN

La revisión muestra un desbalance entre etapas de investigación. Hay cribados de aislados en medio de cultivo, pruebas en frutos desprendidos y ensayos cortos con plántulas, junto con algunos estudios de campo centrados en sanidad de mazorcas (Koua et al., 2020; Masanto et al., 2020; Páez-Martínez et al., 2024) . Koua et al. (2020) aportaron rasgos funcionales de numerosas cepas, pero no respuesta de plantas; Falcão et al. (2014) midieron crecimiento tras 30 días; Galeano-Vanegas et al. (2026) observaron crecimiento de frutos durante 30 días. Los trabajos de Páez-Martínez et al. (2024) y Bernal-Cabrera et al. (2025) acercan la pregunta a una plantación productiva, aunque el horizonte de seguimiento y las variables evaluadas no resuelven por sí solos la estabilidad de la respuesta a través de cosechas sucesivas.

La coexistencia de pruebas de placa y ensayos con plantas aparece en los estudios de (Pratama et al., 2013) y (Loguercio et al., 2023). Valarezo Beltrón et al. (2026) evaluaron B. subtilis solo y en combinación con otros bioestimulantes en plántulas de cacao; aunque algunos promedios superaron al testigo, el análisis no mostró diferencias estadísticas significativas. Este resultado neutro impide presentar el crecimiento inicial como una respuesta universal.

La comparación entre estudios se complica por la taxonomía, los controles y la descripción desigual de la intervención. La reclasificación de 629 demuestra que el nombre de especie puede variar al usar mejores marcadores; el estudio de Villamil Carvajal et al. (2015) conserva un aislado denominado Bacillus sp. sin asignación específica. Una cepa sin identificación trazable o una formulación sin concentración de unidades viables dificulta replicar el resultado. También es necesario saber si se comparó contra agua, portador, coadyuvante, manejo sanitario habitual u otro microorganismo: cada comparador responde

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

una pregunta diferente (Melnick et al., 2008; SantAnna et al., 2015; Villamil Carvajal et al., 2015).

La nutrición constituye un vacío concreto en esta selección de estudios. La solubilización de fosfato de Koua et al. (2020) se midió in vitro; la clorofila y el área foliar del experimento con compost de Kasim et al. (2024) no permiten adjudicar una mayor absorción mineral al inoculante. Para sostener una afirmación sobre fertilización se necesitan mediciones químicas de suelo y tejido, balance de nutrientes y controles con igual aporte orgánico o mineral. Del mismo modo, la evidencia sanitaria no siempre incluye rendimiento comercial: incidencia y severidad de moniliasis son relevantes, pero no informan automáticamente peso de grano seco ni retorno económico (Bernal-Cabrera et al., 2025; Páez-Martínez et al., 2024).

Los diseños con mezclas añaden un problema de atribución. Leite et al. (2013) evaluaron aislados de distintos géneros y sus combinaciones, y Kasim et al. (2024) cruzaron bacterias con compost. Estos ensayos informan acerca de interacciones de manejo, pero atribuir el resultado del mejor tratamiento exclusivamente a Bacillus requiere un control sin la bacteria dentro del mismo nivel del otro factor. Los biofertilizantes de composición amplia evaluados para manejo del suelo y producción tampoco sirven como prueba directa de una cepa particular si no se ensayan los componentes por separado (Schmidt et al., 2025).

Valarezo Beltrón et al. (2026) incluyeron tratamientos individuales y combinados en vivero, una comparación necesaria para atribuir las respuestas. Estudios generales sobre inoculantes y biofertilizantes muestran heterogeneidad ecológica y agronómica entre ambientes (Kaminsky et al., 2019; Schütz et al., 2018), pero esa evidencia externa no sustituye una estimación específica para cacao.

Finalmente, es limitada la información comparable entre genotipos, suelos y temporadas, así como sobre calidad del grano, costo de aplicación y estabilidad de las formulaciones en los estudios revisados (Bernal-Cabrera et al., 2025; Melnick et al., 2008; Páez-Martínez et al., 2024). Estas ausencias se refieren a los trabajos revisados y no implican que ningún estudio exista fuera del conjunto localizado. La revisión es narrativa, no realizó un censo exhaustivo ni una evaluación formal del riesgo de sesgo; por ello, la apreciación sobre la solidez de la evidencia debe leerse como una síntesis crítica de estudios concretos, no como una estimación estadística del efecto promedio. La principal pregunta pendiente es si las mejoras

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

de establecimiento o sanidad pueden sostener un aumento medible y económicamente útil de grano seco en distintas condiciones de producción.

Perspectivas futuras

El siguiente paso es validar cepas prometedoras en parcelas productivas durante varias temporadas. BT8, ALB629 y los endófitos 24 y 33 responden a preguntas diferentes y no deberían reunirse en un solo ensayo sin definir de antemano el objetivo: protección de hojas frente a Phytophthora, desarrollo de plantas jóvenes o control de moniliasis de mazorcas. Los tratamientos deberían incluir un control con portador, un referente de manejo habitual y, cuando corresponda, el coadyuvante solo. La asignación aleatoria y la repetición en distintas fincas, zonas, genotipos y años permitirían estimar tanto el efecto medio como la variación entre contextos (Falcão et al., 2014; Melnick et al., 2008; Páez-Martínez et al., 2024).

Antes de ampliar los ensayos, conviene asegurar la identidad y calidad del material. Secuenciar marcadores suficientes, documentar el origen y conservar cada cepa bajo un código estable evitaría confusiones como la denominación histórica de 629. En toda formulación deberían describirse portador, concentración viable al momento de uso, vida útil, modo de preparación, dosis y método de aplicación. Una misma cepa aplicada como suspensión fresca o producto almacenado puede no ofrecer la misma exposición, y una recomendación de frecuencia debe considerar persistencia y costos, además de severidad de la enfermedad (Bernal-Cabrera et al., 2025; SantAnna et al., 2015).

Los estudios mecanísticos pueden incorporarse a ese diseño sin sustituir la medición agronómica. Para crecimiento y nutrición se propone evaluar arquitectura radical, área foliar, biomasa, fósforo disponible y acumulación de nutrientes en tejidos. Para sanidad se requiere recuperar la cepa después de la aplicación, registrar incidencia y severidad por patógeno y órgano, y relacionar esas variables con cantidad de frutos sanos. La detección de genes para lipopéptidos y la actividad en placa servirían para seleccionar candidatos, mientras que la cuantificación de metabolitos o defensas en el tejido ayudaría a probar cómo actúan bajo condiciones reales (Koua et al., 2020; Melnick et al., 2008).

La integración con el manejo habitual debe examinarse con diseños factoriales. Un tratamiento de Bacillus solo, otro de fertilización o compost solo y la combinación de ambos permiten saber si existe un efecto adicional, una interacción o simplemente un resultado explicado por el insumo acompañante. El mismo principio se aplica a sombra, poda

Doi: https://doi.org/10.63688/xj5cbd89

y manejo sanitario: la pregunta útil para el productor es qué mejora aporta el inoculante encima de una práctica ya adoptada. El trabajo de Kasim et al. (2024) ilustra por qué importa esta separación de componentes, aunque sus resultados se limitan a plántulas.

Las variables finales deberían corresponder al uso previsto: supervivencia y calidad de planta para vivero; incidencia y severidad para biocontrol; y número de mazorcas comerciales, peso de grano seco por superficie, calidad y estabilidad de la cosecha para productividad. Registrar costos de formulación, transporte y aplicaciones permitirá estimar el beneficio neto, además del efecto biológico. Un mayor vigor inicial o una mazorca menos dañada justifican avanzar en investigación, pero la adopción agronómica requiere demostrar que la respuesta es reproducible, suficiente y económicamente viable en las condiciones donde se pretende usar el producto (Falcão et al., 2014; Galeano-Vanegas et al., 2026; Villamil Carvajal et al., 2015).

Por último, se necesita informar resultados desfavorables o neutros con el mismo detalle que los positivos. BP24 colonizó hojas sin reproducir el efecto protector de BT8; el seguimiento breve de frutos no mostró una respuesta de crecimiento que pueda interpretarse como ganancia de cosecha. Publicar esas diferencias ayuda a seleccionar mejor cepas y evita que una formulación avance solo por su desempeño en placa. Si futuros estudios conservan datos de tratamientos y temporadas completos, será posible comparar efectos por patógeno, genotipo y manejo, y establecer condiciones concretas para recomendar un bioinsumo (Galeano-Vanegas et al., 2026; Melnick et al., 2008).

5. CONCLUSIÓN

La evidencia revisada respalda un potencial dependiente de la cepa para promover el desarrollo inicial del cacao y disminuir indicadores de enfermedades de mazorca. La colonización y la actividad antagonista observadas en laboratorio o en tejidos aislados no deben interpretarse como aumentos de rendimiento en finca. Las diferencias de origen, identificación, dosis, formulación y ambiente explican parte de la variación entre estudios y limitan la extrapolación de sus resultados.

La selección de aislados para uso agronómico requiere ensayos con controles apropiados, seguimiento de persistencia y mediciones comparables de nutrición, frutos comercializables y grano seco. Los estudios multisitio y multitemporada, acompañados por evaluaciones de

estabilidad y costos, permitirían establecer cuándo un bioinsumo aporta beneficios adicionales al manejo habitual del cacao.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aleti, G., Lehner, S., Bacher, M., Compant, S., Nikolic, B., Plesko, M., Schuhmacher, R., Sessitsch, A., & Brader, G. (2016). Surfactin variants mediate species-specific biofilm formation and root colonization in Bacillus. *Environmental Microbiology, 18*(8), 2634–2645. https://doi.org/10.1111/1462-2920.13405

Avadí, A. (2023). Environmental assessment of the Ecuadorian cocoa value chain with statistics-based LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 28*, 1495–1515. https://doi.org/10.1007/s11367-023-02142-4

Bailey, B. A., Evans, H. C., Phillips-Mora, W., Ali, S. S., & Meinhardt, L. W. (2018). Moniliophthora roreri, causal agent of cacao frosty pod rot. *Molecular Plant Pathology, 19*, 1580–1594. https://doi.org/10.1111/mpp.12648

Bais, H. P., Fall, R., & Vivanco, J. M. (2004). Biocontrol of Bacillus subtilis against infection of Arabidopsis roots by Pseudomonas syringae is facilitated by biofilm formation and surfactin production. *Plant Physiology, 134*(1), 307–319. https://doi.org/10.1104/pp.103.028712

Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil, 378*, 1–33. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x

Beauregard, P. B., Chai, Y., Vlamakis, H., Losick, R., & Kolter, R. (2013). Bacillus subtilis biofilm induction by plant polysaccharides. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 110*(17), E1621–E1630. https://doi.org/10.1073/pnas.1218984110

Bernal-Cabrera, A., Peñaherrera-Villafuerte, S. L., Espinoza-Roca, M. D., Rivadeneira Moreira, B. J., & Páez-Martínez, P. P. (2025). Efecto de la frecuencia de aplicación de Bacillus amyloliquefaciens endófito sobre Moniliophthora roreri en condiciones de campo. *Bioagro, 37*(2), 223–232. https://doi.org/10.51372/bioagro372.8

Crisostomo-Panuera, J. S., Nieva, A. S., Ix-Balam, M. A., Díaz-Valderrama, J. R., Alviarez-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), Article 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*, Article 35. https://doi.org/10.1007/s00284-021-02696-2

Falcão, L. L., Silva-Werneck, J. O., Vilarinho, B. R., da Silva, J. P., Pomella, A. W. V., & Marcellino, L. H. (2014). Antimicrobial and plant growth-promoting properties of the cacao endophyte Bacillus subtilis ALB629. *Journal of Applied Microbiology, 116*(6), 1584–1592. https://doi.org/10.1111/jam.12485

Fan, B., Blom, J., Klenk, H., & Borriss, R. (2017). Bacillus amyloliquefaciens, Bacillus velezensis, and Bacillus siamensis form an operational group B. amyloliquefaciens within the B. subtilis species complex. *Frontiers in Microbiology, 8*, Article 22. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00022

Fan, H., Zhang, Z., Li, Y., Zhang, X., Duan, Y., & Wang, Q. (2017). Biocontrol of bacterial fruit blotch by Bacillus subtilis 9407 via surfactin-mediated antibacterial activity and colonization. *Frontiers in Microbiology, 8*, Article 1973. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01973

Fira, D., Dimkić, I., Berić, T., Lozo, J., & Stanković, S. (2018). Biological control of plant pathogens by Bacillus species. *Journal of Biotechnology, 285*, 44–55. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.07.044

Galeano-Vanegas, N., Restrepo, G. M., Ramirez, L. S., Morales-Alvarez, E. D., Rodriguez, L., Betancur-Pérez, J. F., & Franco, O. L. (2026). Functional screening of rhizobacterial isolates of Bacillus subtilis from cacao agroecosystems for plant growth-promotion and antagonism against Moniliophthora roreri. *Agriculture, 16*(4), Article 434. https://doi.org/10.3390/agriculture16040434

Glare, T., Caradus, J., Gelernter, W., Jackson, T., Keyhani, N., Köhl, J., Marrone, P., Morin, L., & Stewart, A. (2012). Have biopesticides come of age? *Trends in Biotechnology, 30*(5), 250–258. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.01.003

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*, Article 921469. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921469

Kaminsky, L. M., Trexler, R. V., Malik, R. J., Hockett, K. L., & Bell, T. H. (2019). The inherent conflicts in developing soil microbial inoculants. *Trends in Biotechnology, 37*(2), 140–151. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.11.011

Kasim, N., Widiayani, N., Andi Syaiful, S., & Ningsih, S. R. (2024). Growth of cocoa seedlings (Theobroma cacao L.) in application of cow manure compost and density of Bacillus subtilis bacteria. *Jurnal Agronomi Indonesia, 52*(2), 187–195. https://doi.org/10.24831/jai.v52i2.51505

Köhl, J., Kolnaar, R., & Ravensberg, W. J. (2019). Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: Relevance beyond efficacy. *Frontiers in Plant Science, 10*, Article 845. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845

Koua, S. H., N'golo, D. C., Alloue-Boraud, W. M., Konan, F., & Dje, K. M. (2020). Bacillus subtilis strains isolated from cocoa trees (Theobroma cacao L.) rhizosphere for their use as potential plant growth promoting rhizobacteria in Côte d'Ivoire. *Current Microbiology, 77*, 2258–2264. https://doi.org/10.1007/s00284-020-02027-x

Leite, H. A. C., Silva, A. B., Gomes, F. P., Gramacho, K. P., Faria, J. C., de Souza, J. T., & Loguercio, L. L. (2013). Bacillus subtilis and Enterobacter cloacae endophytes from healthy Theobroma cacao L. trees can systemically colonize seedlings and promote growth. *Applied Microbiology and Biotechnology, 97*, 2639–2651. https://doi.org/10.1007/s00253-012-4574-2

Loguercio, L. L., Silva, A. C. M., Ribeiro, D. H., Cruz, J. M. F., Soares, A. C. F., Marbach, P. A. S., Cruz-Magalhães, V., & de Souza, J. T. (2023). Assessing the functional diversity of rhizobacteria from cacao by partitioning root and shoot biomasses. *Applied Microbiology and Biotechnology, 107*, 4647–4663. https://doi.org/10.1007/s00253-023-12603-3

Malusá, E., & Vassilev, N. (2014). A contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology, 98*, 6599–6607. https://doi.org/10.1007/s00253-014-5828-y

Masanto, Wibowo, A., Joko, T., Subandiyah, S., & Kageyama, K. (2020). Antagonistic potential of endophytic bacteria against Phytophthora palmivora causing black pod

rot disease on cacao (Theobroma cacao L.) in Indonesia. *Plant Pathology Journal, 19*, 22–41. https://doi.org/10.3923/ppj.2020.22.41

Melnick, R. L., Zidack, N. K., Bailey, B. A., Maximova, S. N., Guiltinan, M., & Backman, P. A. (2008). Bacterial endophytes: Bacillus spp. from annual crops as potential biological control agents of black pod rot of cacao. *Biological Control, 46*, 46–56. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.01.022

Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W. J., Andres, C., & Armengot, L. (2020). Cocoa agroforestry systems versus monocultures: A multi-dimensional meta-analysis. *Environmental Research Letters, 15*, Article 104085. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053

Ongena, M., & Jacques, P. (2008). Bacillus lipopeptides: Versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends in Microbiology, 16*(3), 115–125. https://doi.org/10.1016/j.tim.2007.12.009

Páez-Martínez, P. P., Bernal-Cabrera, A., Castro-Albán, H. A., Castro-Gómez, R., & Vera Loor, M. A. (2024). Bacillus endófitos como agentes de control biológico de Moniliophthora roreri en cacao bajo condiciones de campo. *Bioagro, 36*(3), 325–334. https://doi.org/10.51372/bioagro363.7

Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology, 52*, 347–375. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340

Poveda, J., & González-Andrés, F. (2021). Bacillus as a source of phytohormones for use in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology, 105*, 8629–8645. https://doi.org/10.1007/s00253-021-11492-8

Pratama, S. W., Sukamto, S., Asyiah, L. N., & Ervina, Y. V. (2013). Growth inhibition of cocoa pod rot fungus Phytophthora palmivora by Pseudomonas fluorescence and Bacillus subtilis bacteria. *Pelita Perkebunan, 29*(2), 120–127. https://doi.org/10.22302/iccri.jur.pelitaperkebunan.v29i2.59

Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd Allah, E. F. (2017). Bacillus: A biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. *Frontiers in Physiology, 8*, Article 667. https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00667

SantAnna, B. M. M., Marbach, P. P. A., Rojas-Herrera, M., de Souza, J. T., Roque, M. R. A., & Queiroz, A. T. L. (2015). High-quality draft genome sequence of Bacillus amyloliquefaciens strain 629, an endophyte from Theobroma cacao. *Genome Announcements, 3*(6), Article e01325-15. https://doi.org/10.1128/genomeA.01325-15

Schmidt, J. E., Flores, J., Barragan, L., Amores, F., & Khalsa, S. D. S. (2025). Optimizing cocoa productivity through soil health and microbiome enhancement: Insights from organic amendments and a locally derived biofertilizer. *Microorganisms, 13*(6), Article 1408. https://doi.org/10.3390/microorganisms13061408

Schütz, L., Gattinger, A., Meier, M., Müller, A., Boller, T., Mäder, P., & Mathimaran, N. (2018). Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization—A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science, 8*, Article 2204. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204

Stoll, A., Salvatierra-Martínez, R., González, M., & Araya, M. (2021). The role of surfactin production by Bacillus velezensis on colonization, biofilm formation on tomato root and leaf surfaces and subsequent protection (ISR) against Botrytis cinerea. *Microorganisms, 9*(11), Article 2251. https://doi.org/10.3390/microorganisms9112251

Toloza-Moreno, D. L., Yockteng, R., Pérez-Zuñiga, J. I., Salinas-Castillo, C., & Caro-Quintero, A. (2024). Implications of domestication in Theobroma cacao L. seed-borne microbial endophytes diversity. *Microbial Ecology, 87*, Article 108. https://doi.org/10.1007/s00248-024-02409-9

Vaast, P., & Somarriba, E. (2014). Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: The role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems, 88*, 947–956. https://doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x

Valarezo Beltrón, C. O., Santana Álvarez, A., Mendoza Vargas, J. J., Vélez Zambrano, S. M., & Guillén Mendoza, S. V. (2026). Influencia de microorganismos benéficos y sustancias húmicas y fúlvicas en el crecimiento de plántulas de cacao. *Revista Científica y Tecnológica UPSE, 13*(1), 19–28. https://doi.org/10.26423/rctu.v13i1.1480

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

Villavicencio-Vásquez, M., Espinoza-Lozano, F., Chóez-Guaranda, I., Cos-Farias, V., & Coronel-León, J. (2026). Fengycin–essential oil emulsions as sustainable biocontrol formulations against Moniliophthora roreri, the cacao frosty pod rot pathogen. *Frontiers in Plant Science, 16*, Article 1731535. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1731535

CONFLICTO DE INTERESES

No existe.

FINANCIAMIENTO

No aplica.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Manuel Alvarado Brito, Elías Matamoros Macías.
Metodología: Manuel Alvarado Brito, Elías Matamoros Macías.
Investigación: Manuel Alvarado Brito, Elías Matamoros Macías.
Redacción – borrador original: Manuel Alvarado Brito, Elías Matamoros Macías.
Redacción – revisión y edición: Manuel Alvarado Brito, Elías Matamoros Macías.