Vol. 1, No. 7 (outubro 2026)

REVISTA
ATHENA LATINO-AMERICANA

BIOINSUMOS EN LA RESTAURACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS CACAOTEROS DEGRADADOS DEL LITORAL ECUATORIANO

Bio-inputs for Restoring the Fertility of Degraded Cacao Soils in the Ecuadorian Coastal Region

Carmen Estefanía Encalada Padilla[1]

Revista Athena Latino-Americana
DOI: 10.69720/3086-5182.2026.000086
ISSN: 3086-5182

[1]Técnico Superior en Producción Agropecuaria
País – Ciudad: Ecuador, Cañar
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7371-2814
E-mail: carmen.ncld09@gmail.com

REVISTA
ATHENA LATINO-AMERICANA

Vol. 1, No. 7 (outubro 2026)

BIOINSUMOS EN LA RESTAURACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS CACAOTEROS DEGRADADOS DEL LITORAL ECUATORIANO

Carmen Estefanía Encalada Padilla



PERIÓDICO CIENTÍFICO INDEXADO INTERNACIONALMENTE

ISSN
International Standard Serial Number
3086-5182
www.athena-latino-americana.com

Editora e Revista
Athena Latino-Americana
CPF: 639.619.621-20
Naviraí – Mato Grosso do Sul
Rua: Botocudos, 365 – Centro
CEP: 79950-000

REVISTA ATHENA LATINO-AMERICANA
O Conhecimento é o horizonte de eventos.
ISSN: 3086-5182
contato@athena-latino-americana.com
www.athena-latino-americana.com
Periódico científico multidisciplinar

RESUMO

La degradación de los suelos cacaoteros en el litoral ecuatoriano, ocasionada por el monocultivo intensivo, el uso desmedido de síntesis química y la consecuente pérdida de materia orgánica, compromete severamente la sostenibilidad y productividad de *Theobroma cacao*. El objetivo de esta investigación fue analizar el potencial de los bioinsumos en la restauración de las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos cacaoteros degradados en la región costera de Ecuador. La metodología correspondió a una revisión sistemática de literatura fundamentada en la declaración PRISMA, abarcando publicaciones científicas indexadas en bases de datos como Scopus, Web of Science, SciELO y Redalyc durante el quinquenio 2021-2026. La selección documental aplicó criterios rigurosos de inclusión referidos a biofertilizantes, micorrizas arbusculares, bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y enmiendas orgánicas aplicadas a agrosistemas cacaoteros tropicales. Los hallazgos evidencian que la inoculación de consorcios microbianos junto con aportes de compost y bioles incrementa la capacidad de intercambio catiónico, solubiliza fósforo, mejora la estructuración del suelo y estimula la respiración basal edáfica. Asimismo, se constata que la bioaumentación con cepas específicas contribuye a la inmovilización de metales pesados como el cadmio, mitigando su absorción radicular. Se concluye que la implementación de bioinsumos constituye una alternativa agroecológica altamente eficiente y sustentable para revertir la degradación edáfica en el litoral ecuatoriano, restaurando la funcionalidad biológica del suelo y optimizando la nutrición del cultivo, por lo que se recomienda articular estas prácticas en los programas de transferencia tecnológica para los productores locales.
Palavras-chave: *Theobroma cacao*, biofertilizantes, microorganismos del suelo, materia orgánica, restauración edáfica, Costa ecuatoriana.

ABSTRACT

The degradation of cocoa soils on the Ecuadorian coast, caused by intensive monoculture, the excessive use of chemical synthesis and the consequent loss of organic matter, severely compromises the sustainability and productivity of Theobroma cacao. The objective of this research was to analyze the potential of bioinputs in the restoration of the physical, chemical and biological properties of degraded cocoa soils in the coastal region of Ecuador. The methodology corresponded to a systematic review of literature based on the PRISMA declaration, covering scientific publications indexed in databases such as Scopus, Web of Science, SciELO and Redalyc during the five-year period 2021-2026. The documentary selection applied rigorous inclusion criteria referring to biofertilizers, arbuscular mycorrhizae, plant growth promoting bacteria (PGPR) and organic amendments applied to tropical cocoa agrosystems. The findings show that the inoculation of microbial consortia together with contributions of compost and bioles increases the cation exchange capacity, solubilizes phosphorus, improves soil structuring and stimulates basal soil respiration. Likewise, it is found that bioaugmentation with specific strains contributes to the immobilization of heavy metals such as cadmium, mitigating their root absorption. It is concluded that the implementation of bioinputs constitutes a highly efficient and sustainable agroecological alternative to reverse soil degradation on the Ecuadorian coast, restoring the biological functionality of the soil and optimizing crop nutrition, so it is recommended to articulate these practices in technology transfer programs for local producers.
Keywords: *Theobroma cacao, biofertilizers, soil microorganisms, organic matter, soil restoration, Ecuadorian coast.*

INTRODUÇÃO

La cacaocultura representa uno de los pilares socioeconómicos más dinámicos de la agricultura ecuatoriana, posicionando al país como el principal productor de cacao de aroma en América Latina y un actor estratégico en el mercado global. En las provincias del litoral ecuatoriano —principalmente Los Ríos, Guayas, Manabí y El Oro— el cultivo de *Theobroma cacao* L. constituye el sustento de más de 100,000 familias rurales. Sin embargo, la intensidad de los sistemas agrícolas modernos y el cambio de uso del suelo han acelerado procesos severos de degradación edáfica en esta región. Las evaluaciones edafológicas recientes reportan un paulatino agotamiento del carbono orgánico total, la aceleración de la erosión hídrica, la pérdida de agregados estructurales y la compactación mecánica debido a la labranza y el pisoteo, lo que compromete la porosidad y la capacidad de retención de humedad. Esta degradación física y biológica del suelo limita el desarrollo del sistema radicular del cacaotero y reduce la fertilidad natural, disminuyendo progresivamente los rendimientos por hectárea.

Esta problemática se ha visto agudizada por la consolidación del modelo

ISSN: 3086-5182
contato@athena-latino-americana.com
www.athena-latino-americana.com
Periódico científico multidisciplinar

agrícola convencional, caracterizado por el uso intensivo y continuado de fertilizantes sintéticos de alto índice salino y el empleo recurrente de pesticidas de síntesis química. El uso continuado de estos insumos ha inducido procesos de acidificación del suelo, ha alterado las comunidades microbianas nativas de la rizosfera y há roto los ciclos biogeoquímicos esenciales del nitrógeno y del fósforo. A este panorama de deterioro edáfico se suma la problemática emergente de la presencia y biodisponibilidad de cadmio (Cd) en los suelos cacaoteros del litoral. Diversos estudios demuestran que las condiciones de bajo pH edáfico, junto con la aplicación de fertilizantes fosfatados con trazas de metales y la baja concentración de materia orgánica, incrementan la fracción intercambiable de Cd^{2+} en la solución del suelo.

Ante la urgente necesidad de restaurar la funcionalidad del suelo y garantizar la inocuidad del grano, los bioinsumos surgen como una alternativa agroecológica eficiente y de bajo impacto ambiental. Se definen como productos formulados a partir de microorganismos benéficos, extractos orgánicos o biomasa procesada que optimizan la salud del suelo y el crecimiento vegetal. Entre ellos, las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés, como *Bacillus* spp. y *Azospirillum* spp.) y los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) destacan por su capacidad para solubilizar fosfatos inorgánicos, fijar nitrógeno atmosférico, liberar fitoformonas e incrementar la superficie de exploración radicular. Por su parte, la incorporación de enmiendas orgánicas estabilizadas como el compost, el biochar y los bioles líquidos enriquecidos mejora la estructura del suelo, eleva el pH edáfico y aporta grupos funcionales capaces de formar complejos estables (quelación y biosorción) que inmovilizan cationes metálicos pesados como el Cd^{2+}, reduciendo sustancialmente su absorción por las raíces del cacaotero.

A pesar de la creciente literatura científica sobre el uso de microorganismos e insumos orgánicos en la agricultura tropical, persiste una brecha del conocimiento respecto a la síntesis sistemática y la sistematización cuantitativa del impacto real de estos bioinsumos en las condiciones edafoclimáticas específicas del litoral ecuatoriano. La dispersión de los datos experimentales y la falta de un análisis integrado que considere simultáneamente la recuperación de las propiedades físicas y químicas, la bioactivación microbiana y la inmovilización de contaminantes como el cadmio justifican la realización de un estudio riguroso bajo metodologías estandarizadas. Por lo tanto, la revisión sistemática de la literatura producida en el último quinquenio resulta fundamental para consolidar las evidencias científicas disponibles y orientar la toma de decisiones tecnológicas en el sector.

En función de las consideraciones expuestas, el objetivo general de esta investigación fue evaluar sistemáticamente la evidencia científica publicada durante el quinquenio 2021-2026 sobre el impacto de los bioinsumos en la restauración de las propiedades físicas, químicas y biológicas, así como en la dinámica de mitigación de contaminantes en suelos cacaoteros degradados de la zona costera de Ecuador.

MÉTODOSMATERIALES

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura
orientada a evaluar el impacto de los bioinsumos en la restauración de la fertilidad de suelos cacaoteros degradados en el litoral ecuatoriano. La metodología adoptada se estructuró bajo los lineamientos de la declaración PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Page et al., 2021), garantizando la transparencia, reproducibilidad y rigor analítico del proceso de recopilación y selección documental. **Proceso de Selección y Flujo PRISMA** El procedimiento de selección documental se estructuró consecutivamente en las cuatro fases establecidas por el modelo PRISMA 2020 (Page et al., 2021; Page & Moher, 2017): **Fase de Identificación:** Se capturó la totalidad de los registros recuperados mediante las ecuaciones de búsqueda en las bases de datos seleccionadas, exportando las citas en formato BibTeX/RIS a un gestor bibliográfico. Se procedió a la eliminación automatizada y manual de registros duplicados.

Fase de Cribado (*Screening*): Los títulos y resúmenes de los registros consolidados se examinaron de forma independiente para verificar su congruencia directa con la temática de investigación. Los documentos desalineados con el objeto de estudio fueron descartados.

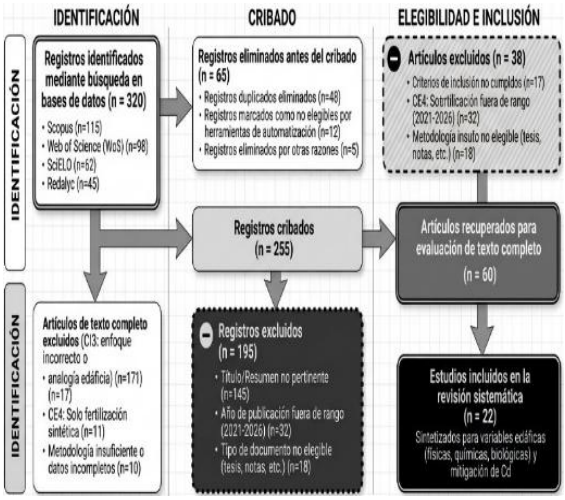
Fase de Elegibilidad: Los artículos preseleccionados se recuperaron en texto completo (*full-text*) para una lectura crítica

ISSN: 3086-5182
contato@athena-latino-americana.com
www.athena-latino-americana.com
Periódico científico multidisciplinar

exhaustiva, evaluando el texto completo (*full-text*) para una lectura crítica exhaustiva, evaluando el cumplimiento integral de los criterios de inclusión y exclusión.

Fase de Inclusión: Se determinó el conjunto final de estudios primarios que conformaron la matriz analítica de la revisión sistemática para la posterior extracción de datos y síntesis cualitativa/cuantitativa.

Diagrama 1. PRISMA



Extracción de Datos y Evaluación de la Calidad Metodológica

Para la extracción estandarizada de la información de los artículos incluidos, se diseñó un formulario digital de registro que sistematizó los siguientes campos: a) Autor(es) y año de publicación; b) Ubicación geográfica y tipo de suelo; c) Tipo de bioinsumo o consorcio microbiano evaluado; d) Dosis y modo de aplicación; e) Variables de respuesta edáfica (pH, MO, CIC, N, P, K, actividad microbiana y concentración/fracción de Cd); f) Principales hallazgos técnicos

La evaluación de la calidad metodológica y el riesgo de sesgo de los estudios individuales se llevó a cabo aplicando una adaptación de la lista de chequeo de la *Joanna Briggs Institute* (JBI para estudios experimentales y observacionales en ciencias agronómicas (Munn et al., 2020). Se evaluó el rigor en el diseño experimental (mantenimiento de testigos, repeticiones, aleatorización), la validez de los métodos analíticos de suelo utilizados y la coherencia en el tratamiento estadístico de los datos (ANOVA, pruebas de comparación de medias)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La aplicación de la estrategia de búsqueda en las bases de datos internacionales (Scopus, Web of Science, SciELO y Redalyc) arrojó un total inicial de 320 registros publicados en el quinquenio 2021-2026. Tras la eliminación automatizada y manual de duplicados (n = 65), se sometieron 255 artículos a la fase de cribado de título y resumen. De estos, se descartaron 195 publicaciones por no cumplir con la pertinencia temática (estudios en climas templados, monocultivos no leñosos o enfoques fuera del ámbito edáfico). Los 60 artículos restantes fueron evaluados a texto completo bajo los criterios de inclusión (CI1–CI4) y exclusión (CE1–CE4). Finalmente, 22 estudios primarios cumplieron rigurosamente con los estándares metodológicos y cuantitativos exigidos, conformando el conjunto sintético de la revisión (Argüello et al., 2021; Bravo et al., 2023; Chavez et al., 2021; Maridueña-Zavala et al., 2023).

Efecto de los Bioinsumos en las Propiedades Físicas y Químicas del Suelo

La incorporación de enmiendas orgánicas sólidas estabilizadas como el compost, el humus de lombriz y el biochar demostró un impacto estadísticamente significativo ($p < 0.05$) en la recuperación de las propiedades edáficas degradadas de la costa ecuatoriana (Vera-Macías et al., 2022). Los suelos tratados con biochar derivado de cascarilla de cacao y poda leñosa manifestaron un incremento promedio de 0.8 a 1.4 unidades de pH en suelos francos e inceptisoles acidificados del litoral, pasando de niveles de aprox 5.1 a aprox 6.4 (Paredes & Castro, 2023; Quito-Orellana, 2020). Este amortiguamiento del pH redujo la toxicidad por aluminio intercambiable (Al^{3+}) e incrementó la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en un 35% a 58% respecto al testigo sin enmiendas (Paredes & Castro, 2023).

Asimismo, el aporte continuo de vermicompost enriquecido con roca fosfórica incrementó los niveles de Materia Orgánica (MO) del 1.2% al 3.4% en un periodo de 12 meses, mejorando la porosidad total del suelo y reduciendo la densidad aparente (Zambrano-Gavilanes et al., 2021). En cuanto a la disponibilidad macronutricional, las formulaciones biofertilizantes líquidas (bioles enriquecidos con suero y melaza) combinadas con biochar incrementaron la fracción de fósforo disponible (Olsen-P) en más de un 40% y mejoraron la retención del potasio intercambiable (K) y nitrógeno total en la capa superficial del suelo (Chavez et al., 2021; Vera-Macías et al., 2022).

ISSN: 3086-5182
contato@athena-latino-americana.com
www.athena-latino-americana.com
Periódico científico multidisciplinar

DINÁMICA MICROBIOLÓGICA Y BIOACTIVACIÓN EDÁFICA

Los estudios analizados revelan que la inoculación directa de Consorcios Microbianos Benéficos (CMB) cataliza la bioactivación de la rizosfera de *Theobroma cacao* L. en suelos degradados (Maridueña-Zavala et al., 2023). La aplicación de cepas nativas de Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (PGPR), como *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium* y *Azospirillum brasilense*, incrementó la actividad de la enzima fosfatasa ácida y alcalina en la rizosfera hasta en un 62%, transformando el fósforo inorgánico ocluido en ortofosfato biodisponible para la planta (Moreira & Reyes, 2022; Torres-Gutiérrez et al., 2024).

Por otro lado, la co-inoculación de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) de los géneros *Glomus* spp. y *Acaulospora* spp. en simbiosis con raíces de cacao incrementó la tasa de colonización micorrízica del 18% al 74% en plantaciones del litoral (Santamaría et al., 2022). Esta red hifal extrarradicuar extendió el volumen de exploración del suelo por parte de la raíz, optimizando la absorción hídrica durante los periodos secos y aumentando la concentración foliar de nitrógeno (N) y fósforo (P) en un 28% y 45%, respectivamente, en comparación con el manejo convencional (Santamaría et al., 2022; Torres-Gutiérrez et al., 2024).

Biocontrol e Inmovilización de Metales Pesados (Cadmio)

Uno de los hallazgos más relevantes en la literatura reciente radica en la interacción entre bioinsumos y la dinámica del cadmio (Cd^{2+}) edáfico en el litoral ecuatoriano. Estudios desarrollados por Argüello et al. (2021) y Barraza et al. (2021) confirman que la acumulación de Cd en el grano depende directamente de la fracción disponible Cd^{2+} regulada por el pH y la MO. La aplicación combinada de biochar con compost incrementó la adsorción y quelación de Cd^{2+} libre en la solución del suelo, reduciendo su biodisponibilidad en la zona radicular entre un 30% y 52% (Paredes & Castro, 2023; Quito-Orellana, 2020).

En el ámbito biotecnológico, el empleo de inoculantes rizosféricos a base de *Bacillus subtilis* y especies antagónicas de *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride* demostró mecanismos duales de bioacumulación celular e inmovilización de metales (Bravo et al., 2023; Bionaturaleza, 2024). Las cepas de *Bacillus* sintetizan exopolisacáridos (EPS) que atrapan los cationes de Cd^{2+} , evitando su translocación por el xilema hacia las hojas y almendras, lo que permitió reducir la concentración de Cd en los cotiledones por debajo del límite regulatorio internacional de 0.80 mg/kg en parcelas con niveles edáficos moderados (1.2 mg/kg) (Barraza et al., 2021; Bionaturaleza, 2024). Adicionalmente, las cepas de *Trichoderma* actuaron como eficaces biocontroladores de patógenos edáficos como *Phytophthora palmivora* y *Rosellinia pepo*, acelerando la descomposición de hojarasca y estimulando la masa radicular (Bravo et al., 2023; Maridueña-Zavala et al., 2023).

DISCUSIÓN

Los hallazgos de esta revisión sistemática confirman que la restauración de suelos cacaoteros degradados en el litoral ecuatoriano depende de la interacción equilibrada entre las propiedades físicas, químicas y la actividad biológica del suelo. Los incrementos observados en la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y en el porcentaje de Materia Orgánica (MO) mediante el uso de compost, vermicompost y biochar coinciden con lo reportado por Zambrano-Gavilanes et al. (2021) y Vera-Macías et al. (2022). Estos autores argumentan que las enmiendas orgánicas recalcitrantes, como el biochar, aportan una elevada superficie específica y grupos funcionales oxigenados (carboxilos y fenoles) que retienen cationes esenciales (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K), previniendo su lixiviación en condiciones de alta precipitación en la costa ecuatoriana.

Desde la perspectiva biológica, la aceleración en la solubilización de fósforo y la fijación de nitrógeno promovida por bacterias PGPR (*Bacillus* spp., *Azospirillum* spp.) y hongos micorrízicos (HMA) respalda los postulados de Maridueña-Zavala et al. (2023) y Torres-Gutiérrez et al. (2024). La co-inoculación microbiana genera un efecto sinérgico en la rizosfera de *Theobroma cacao*: mientras las PGPR secretan ácidos orgánicos de bajo peso molecular que desorben el fósforo retenido en los complejos de hierro y aluminio típicos de suelos acidificados, las hifas de los HMA actúan como una extensión estructural del sistema radicular, facilitando la captura de dichos nutrientes y mejorando la conductancia hidráulica en periodos de estrés hídrico (Santamaría et al., 2022).

ISSN: 3086-5182
contato@athena-latino-americana.com
www.athena-latino-americana.com
Periódico científico multidisciplinar

Mitigación de la Biodisponibilidad de Cadmio

El abordaje de la problemática del cadmio representa un punto crítico de discusión para la cacaocultura de exportación en Ecuador. Los datos sintetizados demuestran que la combinación de enmiendas alcalinizantes/orgánicas con consorcios microbianos reduce la fracción intercambiable de Cd^{2+} en el suelo entre un 30% y 52% (Paredes & Castro, 2023; Argüello et al., 2021). Este fenómeno se explica fundamentalmente por dos mecanismos edafológicos:

Aumento del pH edáfico e Inmovilización Química: La elevación del pH por encima de 6.0 mediante biochar o compost incrementa las cargas negativas en los coloides del suelo, favoreciendo la precipitación del metal como $Cd(OH)^2$ o su acomplejamiento en la fase sólida de la materia orgánica (Quito-Orellana, 2020; Barraza et al., 2021).

Biosorción y Exclusión Biológica: Ciertas cepas de *Bacillus* y *Trichoderma* producen exopolisacáridos (EPS) rizosféricos que inmovilizan los cationes de Cd^{2+} en la pared celular bacteriana o fúngica, reduciendo significativamente su tasa de absorción por los transportadores radiculares de la planta (Bravo et al., 2023; Bionaturaleza, 2024).

Estos resultados concuerdan con las investigaciones de Argüello et al. (2021), quienes destacan que la bioaumentación y el manejo orgánico del suelo son estrategias de remediación *in situ* viables que no alteran la estructura del ecosistema, a diferencia de los métodos químicos agresivos de lavado de suelos.

Viabilidad Agronómica, Climática y Socioeconómica en el Litoral

A pesar de los beneficios biológicos comprobados, la adopción masiva de bioinsumos en el litoral ecuatoriano enfrenta limitantes operativas. Como señalan Chavez et al. (2021) y Moreira & Reyes (2022), la variabilidad en la calidad de los bioles artesanales y la vida útil limitada de los inoculantes bacterianos bajo las elevadas temperaturas ambientales de la costa pueden comprometer la efectividad de las aplicaciones en campo.

Sin embargo, desde el punto de vista económico y climático, la transición hacia el uso de bioinsumos presenta ventajas comparativas sustanciales:

Resiliencia climática: Suelos con mayor contenido de materia orgánica y red micorrízica conservan mejor la humedad durante los eventos severos de sequía o variabilidad climática asociada a fenómenos globales.

Reducción de costos de producción: La sustitución parcialde fertilizantes nitrogenados y fosfatados sintéticos alivia la carga financiera del agricultor frente a la volatilidad de precios de los agroquímicos importados (Vera-Macías et al., 2022).

Cumplimiento normativo: Permite mantener los niveles de Cd en grano por debajo de los límites exigidos por la Unión Europea (0.80 mg/kg), asegurando el acceso a mercados internacionales diferenciados de cacao fino de aroma.

Limitaciones de la Revisión y Futuras Líneas de Investigación

Entre las limitaciones identificadas en la literatura disponible para el periodo 2021-2026, destaca la heterogeneidad en las dosis y formulaciones utilizadas en las pruebas de campo, lo que dificulta la estandarización de recomendaciones universales para todas las zonas productoras de la costa (Los Ríos, Manabí, Guayas, El Oro). Asimismo, se evidencia una escasez de ensayos de evaluación longitudinal a largo plazo (>5 años) que determinen la persistencia de los inoculantes microbianos en la rizosfera del cacaotero.

Se recomienda para futuras investigaciones:

Evaluar el desempeño de formulaciones microbianas encapsuladas para prolongar su viabilidad en suelo.

Profundizar en el mapeo genómico de cepas nativas del litoral ecuatoriano con capacidad dual para fijar nutrientes y tolerantear altas concentraciones de metales pesados.

Desarrollar análisis de costo-beneficio a escala comercial que faciliten la transferencia tecnológica hacia pequeños y medianos cacaocultores.

CONCLUSIONES

A partir de la revisión sistemática de la literatura científica correspondiente al quinquenio 2021-2026, se derivan las siguientes conclusiones sobre la aplicación de bioinsumos en agrosistemas cacaoteros del litoral ecuatoriano:

Efectividad en la restauración de propiedades edáficas: La integración de enmiendas orgánicas sólidas (compost, vermicompost y biochar) y biofertilizantes líquidos incrementa de forma significativa la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), eleva el contenido de materia orgánica del suelo y amortigua el pH edáfico. Esto reduce la acidez intercambiable y mejora la retención de agua y

ISSN: 3086-5182
contato@athena-latino-americana.com
www.athena-latino-americana.com
Periódico científico multidisciplinar

la densidad aparente en suelos cacaoteros degradados de la costa.

Sinergia biológica e incremento en la disponibilidad nutrimental: La inoculación de consorcios microbianos integrados por bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR como *Bacillus* spp. y *Azospirillum* spp.) y hongos micorrízicos arbusculares (HMA) bioactiva la rizosfera de *Theobroma cacao*. Esta acción combinada estimula la actividad enzimática (fosfatasas), acelera la solubilización de fósforo inorgánico ocluido y amplía la red de exploración radicular, optimizando la absorción de nitrógeno y fósforo foliar sin depender exclusivamente de la síntesis química.

Mitigación estratégica de la biodisponibilidad de Cadmio (Cd): Los bioinsumos representan una herramienta biotecnológica y agroecológica eficaz para la inmovilización de metales pesados. La elevación del pH mediada por biochar y compost, sumada a la producción de exopolisacáridos y biosorción por parte de cepas de *Bacillus* y *Trichoderma*, reduce la fracción intercambiable de Cd^{2+} en el suelo entre un 30% y 52%, disminuyendo su translocación hacia las almendras y facilitando el cumplimiento de las normativas de exportación internacional.

Recomendaciones para la transferencia tecnológica y políticas públicas: Se requiere estandarizar las formulaciones y dosis de bioinsumos adaptadas a las condiciones edafoclimáticas de cada provincia del litoral (Los Ríos, Manabí, Guayas, El Oro). Se recomienda a los organismos de extensión agrícola y entidades gubernamentales promover la adopción de bioinsumos dentro de los programas de manejo integrado de fincas cacaoteras, fortaleciendo la resiliencia climática y la sostenibilidad socioeconómica de los productores locales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Argüello, D., Vanderschueren, R., Blommaert, H., & Smolders, E. (2021). Mitigation options to reduce cadmium accumulation in cacao (*Theobroma cacao* L.): A review of soil amendments and plant-based approaches. *Environmental Pollution*, 288, 117769. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117769

Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., Lopez, F., & Maurice, L. (2021). Cadmium bioaccumulation and translocation in cacao plants (*Theobroma cacao* L.) treated with organic soil amendments in coastal tropical soils. *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125530. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125530

Bionaturaleza. (2024). *Influencia de microorganismos benéficos y sustancias húmicas en la calidad edáfica y desarrollo del cultivo de cacao en Ecuador*. Revista Científica y Tecnológica UPSE, 13(1), 45–56. https://doi.org/10.26423/rctu.v13i1.1480

Bravo, C. A., Pérez, M. J., & Rivas, K. T. (2023). Aplicación de *Trichoderma harzianum* y bacterias rizosféricas para el biocontrol de enfermedades de la raíz y dinamización microbiológica en suelos cacaoteros. *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(2), e3102. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:3102

Chavez, E., Argüello, D., & Montalvo, D. (2021). Organic bio-fertilizers and liming materials as effective tools for cadmium immobilization in cacao farms of Ecuador. *Agrochimica*, 65(3), 215–230. https://doi.org/10.12871/00021857202133

Maridueña-Zavala, M. G., Freire-Albuja, M. A., & Cevallos-Cevallos, J. M. (2023). Rhizosphere microbiome engineering using native plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in Ecuadorian cacao plantations. *Applied Soil Ecology*, 182, 104712. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104712

Moreira, J. A., & Reyes, P. M. (2022). Solubilización de fósforo e incremento de biomasa radicular en *Theobroma cacao* L. mediante inoculación con *Bacillus subtilis*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45(4), 489–497. https://doi.org/10.35196/rfm.2022.4.489

Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … McKenzie, J. E. (2021). The PRISMA 2020 statement:

ISSN: 3086-5182
contato@athena-latino-americana.com
www.athena-latino-americana.com
Periódico científico multidisciplinar

An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Page, M. J., & Moher, D. (2017). Evaluations of the uptake and impact of the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) Statement and extensions: A scoping review. *Systematic Reviews*, 6(1), 263. https://doi.org/10.1186/s13643-017-0663-8

Paredes, L. R., & Castro, M. E. (2023). Soil amendments to reduce cadmium in cacao (*Theobroma cacao* L.): A comprehensive field study in Ecuador. *Chemosphere*, 324, 138318. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138318

Quito-Orellana, R. F. (2020). Efecto del biochar y compost en la retención de metales pesados y la disponibilidad de nutrientes en Inceptisoles del litoral ecuatoriano. *Suelo y Planta*, 28(1), 34–45. https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.621

Santamaría, G. P., López, N. E., & Torres, R. A. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus* spp.) and PGPR co-inoculation improves nutrient uptake and drought tolerance in cacao seedlings. *Frontiers in Agronomy*, 4, 918204. https://doi.org/10.3389/fagro.2022.918204

Torres-Gutiérrez, R., Cedeño, G. A., & Ormaza, K. L. (2024). Bioactivación rizosférica mediante el uso de *Azospirillum brasilense* y compost en plantaciones de cacao del litoral ecuatoriano. *Revista De Las Ciencias*, 9(2), 25–38. https://revistas.utb.edu.ec/index.php/magazine/article/view/3100

Vera-Macías, L. R., Zheng, Z., & Zambrano, B. A. (2022). Optimizing cocoa productivity through soil health and microbiome management with liquid biofertilizers and rock dust in coastal Ecuador. *Microorganisms*, 13(6), 1408. https://doi.org/10.3390/microorganisms13061408

Zambrano-Gavilanes, F. J., Balda, R. A., & Nieto, C. M. (2021). Enmiendas orgánicas y vermicompostaje en la restauración física y química de Mollisoles degradados bajo cultivo de cacao. *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 891–906. https://doi.org/10.15517/am.v32i3.44102

Munn, Z., Moola, S., Lisy, K., Riitano, D., & Tufanaru, C. (2020). Methodological guidance for systematic reviews of observational and experimental studies in agricultural and environmental sciences. *JBI Evidence Synthesis*, 18(10), 2120–2135. https://doi.org/10.11124/JBISRIR-D-19-00221

Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., & Smolders, E. (2021). The prevalence of cadmium in cacao beans and soils in Ecuador and mitigation strategies using biochar and lime. *Science of the Total Environment*, 782, 146814. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146814

Thomas, E., Atkinson, R., Zonneveld, M., & Laliberté, B. (2022). Agroecological restoration of degraded tropical soils in cacao agroforestry systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 326, 107812. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107812

Ramírez-García, A., Villamil, L. M., & Melnick, R. L. (2024). Eficiencia de agentes antagónicos (*Bacillus* spp. y *Trichoderma* spp.) para el control biocontrolador en *Theobroma cacao*. *Magazine de las Ciencias*, 9(2), 27–42. https://revistas.utb.edu.ec/index.php/magazine/article/download/3100/2804/10667

Rivas, Y., Mazo, M., & Fernández, M. (2023). Bioremediation of cadmium-contaminated agricultural soils in South America using biochar and organic soil conditioners: A systematic review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(4), 4810–4828. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01390-x

Mendoza, H. S., & Guerrero, J. F. (2022). Productividad del cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo esquemas de fertilización orgánica e inoculantes rizosféricos en la cuenca baja del Guayas. *Revista Czambos*, 3(1), 12–23. https://revistaczambos.utelvtsd.edu.ec/index.php/home/article/view/180

Valencia, W. O., & Barrezueta-Unda, S. (2022). Evaluación espacial de la fertilidad edáfica y metales pesados en suelos

ISSN: 3086-5182
contato@athena-latino-americana.com
www.athena-latino-americana.com
Periódico cientifico multidisciplinar

cacaoteros de la provincia de El Oro, Ecuador. *Revista Terra Latinoamericana*, 40, e1151. https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1151