

Artículo de revisión

Microbiota asociada a plantaciones agroforestales de cacao y su impacto en la tolerancia al estrés abiótico

Microbiota associated with agroforestry cocoa plantations and its impact on abiotic stress tolerance

Germán Troya Guerrero¹; Vanessa Elizabeth Pino Meléndez²

¹Ingeniero Agropecuario. Magister Agroecología. Analista de Investigación y Desarrollo UTB -Universidad Técnica Babahoyo, Ecuador. Programa de Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad del Zulia, Venezuela, correo: germantroya@hotmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1293-4866>; ²Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador; Programa de Doctorado en Ciencias Agrarias, Universidad del Zulia, Venezuela, correo electrónico: vpino@utb.edu.ec, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0986-1651>.

RESUMEN

Este estudio exploró la relación simbiótica entre la microbiota y las plantaciones agroforestales de cacao, centrándose en cómo esta interacción mejora la tolerancia al estrés abiótico, incluyendo condiciones adversas como sequías, salinidad y cambios climáticos. Se utilizó una metodología sistemática de revisión de literatura en la que se seleccionaron artículos de bases de datos académicas con criterios de inclusión específicos para garantizar la relevancia y calidad de la información analizada. La investigación destacó cómo la diversidad y presencia de microorganismos en el suelo contribuyen significativamente a la resistencia del cacao mediante la mejora en la absorción de nutrientes, fortalecimiento del sistema radicular, y activación de respuestas fisiológicas. Estos mecanismos resaltan la capacidad de las plantaciones de cacao para enfrentar el estrés abiótico y sugieren la importancia de promover tales interacciones para el desarrollo sostenible del cultivo bajo condiciones ambientales variables. Además, se discutieron las implicaciones prácticas para la gestión agrícola, enfocando en la promoción de la salud y diversidad de la microbiota del suelo a través de prácticas agronómicas sostenibles y la utilización de microorganismos benéficos. Estas estrategias son vitales no solo para la producción de cacao sino también para la seguridad alimentaria global. En conclusión, el estudio ofrece evidencia que respalda la implementación de estrategias de manejo más eficaces y sostenibles que mejoran la productividad y resiliencia de los sistemas agroforestales en respuesta al cambio climático y otras presiones ambientales, contribuyendo así al mantenimiento de la sostenibilidad agrícola y ecológica.

Palabras clave: diversidad de microorganismos, simbiosis, sostenibilidad, resiliencia, productividad.

ABSTRACT

This study investigated the symbiotic relationship between microbiota and cocoa agroforestry plantations, focusing on how this interaction enhances abiotic stress tolerance under adverse conditions such as droughts, salinity, and climate changes. A systematic literature review methodology was employed, wherein articles were selected from academic databases using specific inclusion criteria to ensure the relevance and quality of the analyzed information. The research highlighted how the diversity and presence of soil microorganisms significantly contribute to the resilience of cocoa through improved nutrient uptake, root system strengthening, and the activation of physiological responses. These mechanisms underscore the ability of cocoa plantations to cope with abiotic stress and emphasize the importance of promoting such interactions for the sustainable development of the crop under varying environmental conditions. Furthermore, practical implications for agricultural management were discussed, focusing on enhancing soil microbiota health and diversity through sustainable agronomic practices and the use of beneficial microorganisms. These strategies are vital not only for cocoa production but also for global food security. In conclusion, the study provides evidence supporting the implementation of more effective and sustainable management strategies that enhance the productivity and resilience of agroforestry systems in response to climate change and other environmental pressures, thereby contributing to the maintenance of agricultural and ecological sustainability.

Keywords: microbial diversity, symbiosis, sustainability, resilience, productivity.

Recibido: 28-03-2023

Aceptado: 05-06-2023

Publicado: 05-06-2023

Autor de correspondencia: Germán Troya Guerrero

Correo electrónico: germantroya@hotmail.com

plantas, mejorando su capacidad para resistir condiciones adversas (Berendsen et al., 2012).

Tolerancia al estrés abiótico

El estrés abiótico en plantas se refiere a condiciones adversas del entorno que no tienen origen biológico. Estas condiciones incluyen factores como sequía, salinidad, altas temperaturas y otros eventos ambientales que afectan negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas, como es el caso del cacao (Zargar et al., 2019).

Ejemplos de estrés abiótico relevante para el cacao

- a. Sequía: la sequía es una de las principales amenazas para el cultivo de cacao. La falta de agua afecta la disponibilidad de nutrientes y reduce la fotosíntesis, resultando en una disminución en la producción y calidad del grano (Schroth et al., 2016).
- b. Altas temperaturas: las altas temperaturas pueden causar estrés térmico en el cacao, afectando su desarrollo y la calidad del fruto, lo que tiene un impacto directo en la producción de cacao (Bunn et al., 2015).

Importancia de la tolerancia al estrés en la agricultura sostenible

- a. Seguridad alimentaria: la tolerancia al estrés abiótico en el cacao juega un papel crítico en la seguridad alimentaria al garantizar una producción constante del cultivo, incluso en condiciones desafiantes (Farooq et al., 2009).
- b. Sostenibilidad económica: la resistencia al estrés abiótico contribuye a la sostenibilidad económica de las comunidades agrícolas dependientes del cacao al mantener la productividad y calidad del grano, asegurando los medios de vida de los agricultores (Schroth et al., 2016).

Mecanismos de tolerancia al estrés en el cacao

La tolerancia al estrés abiótico en el cacao involucra una serie de complejos mecanismos moleculares y fisiológicos. Estos incluyen la acumulación de osmolitos como prolina y glicina betaína, la activación de enzimas antioxidantes y la regulación positiva de genes responsables de la respuesta al estrés (Ashraf y Foolad, 2007; Hasanuzzaman et al., 2017).

Adaptación al cambio climático y mejora genética

La variabilidad climática global presenta nuevos desafíos para la producción de cacao. Investigaciones recientes destacan la importancia de programas de mejora genética para desarrollar cultivares de cacao más resistentes al estrés abiótico, lo que contribuiría a la adaptación del cultivo a las condiciones cambiantes del clima (Schroth et al., 2016; Meinhardt et al., 2008).

Importancia de la agricultura sostenible en la producción de cacao

La integración de prácticas agrícolas sostenibles es esencial para enfrentar los desafíos del cambio climático y la presión ambiental. La tolerancia al estrés abiótico se alinea con los

principios de la agricultura sostenible, promoviendo la resiliencia de los sistemas agrícolas y garantizando la viabilidad a largo plazo de la producción de cacao (Pretty et al., 2006; Giller et al., 2011).

Microbiota en plantaciones agroforestales de cacao

Numerosos estudios han identificado la presencia predominante de bacterias fijadoras de nitrógeno, hongos micorrízicos arbusculares y bacterias promotoras del crecimiento vegetal en suelos de plantaciones agroforestales de cacao (García-Salamanca et al., 2013; Berruti et al., 2016). Estos microorganismos beneficiosos no solo mejoran la disponibilidad de nutrientes para las plantas, sino que también establecen relaciones sinérgicas que pueden influir en la tolerancia de las plantas al estrés abiótico.

Factores que influyen en la formación y estructura de la microbiota

Composición del suelo: la composición del suelo es un factor determinante en la formación de la microbiota en plantaciones agroforestales de cacao. Estudios han demostrado que la presencia de minerales, materia orgánica y otros componentes del suelo influye directamente en la diversidad y abundancia de microorganismos (Rascovan et al., 2016). La riqueza de nutrientes y la textura del suelo también desempeñan un papel clave en la selección de especies microbianas (González et al., 2021).

Tipo de vegetación y cobertura del suelo: la presencia de árboles de sombra y la diversidad vegetal en las plantaciones agroforestales de cacao impacta significativamente en la microbiota del suelo. La variabilidad en la composición y estructura de la vegetación crea microhábitats específicos que favorecen el establecimiento de comunidades microbianas diversas (Cruz-Martínez et al., 2012; González-García et al., 2021).

Prácticas agronómicas y uso de insumos: la aplicación de fertilizantes, pesticidas y otras prácticas agronómicas puede alterar la composición de la microbiota del suelo en plantaciones de cacao. La exposición a insumos químicos puede influir en la abundancia relativa de ciertos grupos microbianos, lo que a su vez afecta la dinámica de la comunidad (Köberl et al., 2011; González-Pedraza et al., 2014).

Clima y condiciones ambientales: las condiciones climáticas, como la temperatura y la humedad, también desempeñan un papel crítico en la estructura de la microbiota del suelo en plantaciones agroforestales de cacao. La variabilidad climática puede modular la actividad microbiana y afectar la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Lauber et al., 2008; González et al., 2021).

Interacciones planta-microorganismo: las interacciones específicas entre las raíces de las plantas de cacao y los microorganismos del suelo también desempeñan un papel crucial en la estructuración de la microbiota. La liberación de compuestos orgánicos por parte de las raíces puede atraer a microorganismos específicos, influyendo así en la

composición y diversidad microbiana en la rizosfera (Badri et al., 2009).

Dinámica temporal: la dinámica temporal es un factor adicional que afecta la composición y diversidad de la microbiota en plantaciones agroforestales de cacao. Estudios a largo plazo han revelado cambios estacionales en la estructura de la comunidad microbiana, destacando la importancia de considerar el factor temporal en las evaluaciones de la microbiota (Fierer et al., 2007).

Impacto del cultivar de cacao: La variabilidad genética entre diferentes cultivares de cacao también puede influir en la composición de la microbiota. Estudios han sugerido que las características específicas de las raíces y la exudación de compuestos orgánicos pueden variar entre cultivares, lo que afecta la comunidad microbiana asociada (Pieterse et al., 2014).

Interacciones microbiota-planta: la coevolución de plantas y microorganismos es una característica fundamental de la interacción microbiota-planta (Hartmann et al., 2008). La diversidad microbiana en el suelo y en los tejidos vegetales es crucial para el desarrollo saludable de las plantas" (Bulgarelli et al., 2013).

La microbiota del suelo puede inducir resistencia sistémica en las plantas, mejorando su capacidad para defenderse contra patógenos (Pieterse et al., 2014). Algunos microorganismos asociados a las plantas producen compuestos bioactivos que pueden inhibir el crecimiento de patógenos" (Mendes et al., 2011).

La asociación entre plantas y bacterias fijadoras de nitrógeno es crucial para mantener la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas (Glick, 2014). La microbiota del suelo puede mejorar la resistencia de las plantas a condiciones adversas como sequía, salinidad y altas temperaturas (Berendsen et al., 2012).

La comunicación entre plantas y microorganismos del suelo desempeña un papel crucial en la activación de respuestas de defensa contra patógenos (Vlot et al., 2009).

Comunicación química en las interacciones microbiota-planta: las plantas secretan compuestos orgánicos a través de las raíces, conocidos como exudados de raíces, que sirven como señales químicas para atraer y modular la actividad de la microbiota circundante. Este diálogo químico facilita la colonización beneficiosa de la rizosfera y la promoción del crecimiento de las plantas (Badri et al., 2009).

Micorrizas: simbiosis beneficiosa para las plantas

Las micorrizas, asociaciones simbióticas entre las raíces de las plantas y hongos del suelo, son esenciales para el intercambio eficiente de nutrientes. La presencia de micorrizas mejora la absorción de nutrientes, especialmente fósforo, y proporciona protección contra patógenos (Smith y Read, 2008).

Bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV)

Las BPCV, como ciertas cepas de *Rhizobium* y *Bacillus*, establecen relaciones mutualistas con las plantas al fijar

nitrógeno atmosférico, solubilizar fosfato y producir compuestos de señalización que estimulan el crecimiento vegetal y mejoran la resistencia al estrés (Glick, 2012).

Resistencia a patógenos y estimulación del sistema inmunológico de las plantas

La microbiota del suelo también desempeña un papel crucial en la protección de las plantas contra patógenos. La presencia de microorganismos benéficos puede activar el sistema inmunológico de las plantas, mejorando su capacidad para resistir infecciones y enfermedades (Berendsen et al., 2012).

Regulación del estrés abiótico

La microbiota del suelo contribuye significativamente a la tolerancia de las plantas al estrés abiótico. La presencia de ciertos microorganismos puede inducir respuestas de defensa en las plantas, mejorando su capacidad para enfrentar condiciones adversas como la sequía o salinidad (Vurukonda et al., 2016).

Mecanismos de interacción microbiota-planta en la tolerancia al estrés abiótico

a. Mejora de la absorción de nutrientes: la microbiota puede promover la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, mejorando la absorción de elementos como fósforo y hierro, lo que fortalece la resistencia de las plantas al estrés nutricional (Berendsen et al., 2012).

b. Estímulo de la respuesta inmunológica: la presencia de ciertos microorganismos en la microbiota activa la respuesta inmunológica de las plantas, mejorando su capacidad para resistir el estrés abiótico y reduciendo el impacto negativo de patógenos (Vurukonda et al., 2016).

c. Producción de metabolitos beneficiosos: algunos microorganismos en la microbiota generan metabolitos secundarios que actúan como inductores de tolerancia, mejorando la capacidad de las plantas para resistir condiciones estresantes (Santos-Medellín et al., 2017).

Ejemplos de estudios que demuestran estas interacciones en plantas de cacao

a. Estudio sobre micorrizas arbusculares: investigaciones han demostrado que las micorrizas arbusculares, un componente importante de la microbiota del suelo, mejoran la absorción de nutrientes en las plantas de cacao, contribuyendo así a su tolerancia al estrés nutricional (Alori et al., 2017).

b. Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento: Estudios han revelado que la inoculación de plantas de cacao con bacterias promotoras de crecimiento, como ciertas cepas de *Bacillus*, mejora la absorción de nutrientes y aumenta la resistencia al estrés abiótico, especialmente en condiciones de sequía (Melo et al., 2014).

Técnicas de estudio de la microbiota en plantaciones de cacao

La comprensión de la microbiota en plantaciones de cacao es esencial para optimizar la salud del suelo, mejorar la productividad y fomentar prácticas agrícolas sostenibles. Diversas técnicas y tecnologías se utilizan para estudiar la diversidad y función de la microbiota en contextos agroforestales (Tabla 1) (Castellanos et al., 2019).

Técnicas comunes de estudio de la microbiota

- a. Secuenciación de Próxima Generación (NGS): la secuenciación de nueva generación permite analizar comunidades microbianas a nivel de ADN o ARN, proporcionando información detallada sobre la diversidad y abundancia de microorganismos presentes en el suelo (Muyzer et al., 1993).
- b. PCR-DGGE (Electroforesis en Gel de Gradiente Desnaturalizante): la DGGE permite analizar la diversidad de la microbiota mediante la separación de fragmentos de ADN basada en la movilidad en un gel, revelando patrones únicos para diferentes especies (Muyzer et al., 1993).

Tabla 1. Técnicas de estudio de la microbiota en plantaciones de cacao

Técnica	Aplicación	Referencia
Secuenciación de Próxima Generación	Análisis detallado de diversidad microbiana	Caporaso et al. (2012)
PCR-DGGE	Separación de fragmentos de ADN para análisis de diversidad	Muyzer et al. (1993)
Aislamiento y Caracterización de Bacterias	Identificación de cepas beneficiosas asociadas al cacao	Baldani et al. (2014)
Metagenómica Funcional	Estudio de genes y funciones específicas de la microbiota	Melo et al. (2019)

Fuente: Autor

Técnicas específicas aplicadas al cacao

A continuación se presentan algunas de las diferentes técnicas específicas que existen para la detección de microorganismos tolerantes al estrés abiótico (Tabla 2).

Entre las principales técnicas se tiene:

- a. Aislamiento y caracterización de bacterias promotoras del crecimiento: la técnica clásica de aislamiento de bacterias del suelo seguida de pruebas de promoción del crecimiento vegetal se aplica para identificar cepas beneficiosas asociadas al cacao (Baldani et al., 2014).
- b. Metagenómica funcional: la metagenómica funcional permite estudiar genes y funciones específicas de la microbiota. En el cacao, se ha aplicado para entender la capacidad de la microbiota del suelo para promover el crecimiento de las plantas y tolerar el estrés (Melo et al., 2019).

Estudios sobre la influencia de la microbiota en la tolerancia al estrés abiótico en el cacao

- a. Efectos de la micorrización en la resistencia al estrés hídrico: investigaciones indican que la presencia de micorrizas arbusculares mejora la absorción de agua y nutrientes en las plantas de cacao, aumentando así su resistencia a condiciones de sequía (Mulema et al., 2017).
- b. Rol de bacterias promotoras del crecimiento en la tolerancia al estrés salino: estudios demuestran que ciertas bacterias promotoras del crecimiento, como *Bacillus*, mejoran la tolerancia al estrés salino en plantas de cacao al modular la absorción de sodio y promover la acumulación de compuestos osmoprotectores (Lima et al., 2020).

Tabla 2. Estudios relacionados con el impacto práctico de la microbiota en la tolerancia al estrés abiótico en plantaciones de cacao

Referencia	Enfoque	Resultados clave
Mulema et al. (2017)	Variaciones climáticas que amenazan la sostenibilidad de la producción de cacao.	Desarrollo de variedades de cacao resistentes.
Lima et al. (2020)	Colonización de la rizosfera y promoción del crecimiento del cacao por bacterias endofíticas tolerantes a la sal	Mayor tolerancia al estrés salino, modulación de absorción de sodio.
Hanumantharao et al. (2020)	Colonización de hongos endofíticos tolerantes al calor confiere termotolerancia a <i>Theobroma</i>	Los hongos endofíticos incrementan la termotolerancia del cacao, lo que permite a las plantas mantener su crecimiento y desarrollo incluso bajo condiciones de estrés térmico severo
Belayneh et al., (2018)	Bacterias endofíticas de los árboles de cacao pueden reducir la severidad de la enfermedad de la mazorca helada causada por <i>Moniliophthora roreri</i>	Las bacterias endofíticas en los árboles de cacao pueden fortalecer la resistencia de las plantas contra la podredumbre helada de la mazorca, causada por <i>Moniliophthora roreri</i> .

Fuente: Autor

- c. Contribución de hongos endófitos a la tolerancia a altas temperaturas: la presencia de hongos endófitos en el cacao

transferencia efectiva de tecnologías y conocimientos a nivel local (Altieri y Nicholls, 2017; FAO, 2017).

Conclusiones

A partir del análisis realizado se puede concluir que la microbiota del suelo es esencial para la salud y la resiliencia de las plantaciones de cacao frente a condiciones adversas, al mejorar la tolerancia al estrés abiótico y promover una mayor funcionalidad ecosistémica. La diversidad microbiana es crucial no solo para la fijación de nitrógeno, la solubilización de nutrientes y la producción de metabolitos beneficiosos, sino también para la sustentabilidad agronómica y la reducción de la dependencia de insumos químicos. Aunque se han logrado avances significativos en la comprensión de estas interacciones, aún es necesario profundizar en la investigación sobre la variabilidad genética y ambiental y las prácticas de manejo a largo plazo.

Recomendaciones

Se recomienda la aplicación de enfoques omics, como la metagenómica, metatranscriptómica y metabolómica, para obtener una comprensión más completa de la composición y función de la microbiota del suelo en las plantaciones de cacao.

Es necesario llevar a cabo estudios a largo plazo para investigar cómo cambia la microbiota del suelo y su impacto en la tolerancia al estrés abiótico a lo largo de las diferentes etapas de crecimiento del cacao y en respuesta a las variaciones climáticas y de manejo agronómico.

La adopción de un enfoque multidisciplinario que integre conocimientos de microbiología, ecología, agronomía y genética es necesario para comprender mejor las complejas interacciones entre la microbiota del suelo, las plantas de cacao y el ambiente circundante.

Se deben realizar estudios comparativos entre diferentes sistemas de manejo agronómico (por ejemplo, sistemas convencionales versus sistemas agroecológicos) para evaluar el impacto del manejo del suelo en la composición y función de la microbiota y su relación con la tolerancia al estrés abiótico.

Se recomienda evaluación de prácticas de manejo para evaluar el efecto de diversas prácticas de manejo agronómico, como la aplicación de fertilizantes orgánicos, la rotación de cultivos y la utilización de coberturas vegetales, en la promoción de una microbiota beneficiosa y la mejora de la tolerancia al estrés abiótico en las plantaciones de cacao.

Referencias

Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for

use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8, 971.

Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). *Agroecología: bases científicas para una agricultura sustentable*. Nordan Comunidad.

Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 206-216.

Badri, D. V., Weir, T. L., van der Lelie, D., & Vivanco, J. M. (2009). Rhizosphere chemical dialogues: plant-microbe interactions. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(6), 642-650.

Baldani, J. I., Rouws, L., Cruz, L. M., et al. (2014). *The Family Rhizobiaceae*. In Rosenberg, E., DeLong, E. F., Lory, S., Stackebrandt, E., & Thompson, F. (Eds.), *The Prokaryotes: Alphaproteobacteria and Betaproteobacteria*. Springer.

Baltruschat, H., Fodor, J., Harrach, B. D., Niemczyk, E., Barna, B., Gullner, G., Janeczko, A., & Kogel, K. H. (2008). Salt tolerance of barley induced by the root endophyte *Piriformospora indica* is associated with a strong increase in antioxidants. *New Phytologist*, 180(2), 501-510.

Barrios, E., González-Espinosa, M., & Williams-Linera, G. (2021). *Agroforestry and restoration of cloud forest landscapes in tropical mountain regions*. In *Agroforestry Landscapes for Mountain Communities* (pp. 173-188). Springer, Cham.

Barea, J. M., Toro, M., Orozco, M. O., Campos, E., & Azcón, R. (2005). The application of isotopic (^{32}P and ^{15}N) dilution techniques to evaluate the interactive effect of phosphate-solubilizing rhizobacteria, mycorrhizal fungi and *Rhizobium* to improve the agronomic efficiency of rock phosphate for legume crops. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73(2-3), 41-52.

Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8), 478-486.

Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2018). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 23(6), 478-486.

Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., & Bianciotto, V. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: let's benefit from past successes. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1559.

Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications*, 1(1), 48.

Bulgarelli, D., Schlaeppi, K., Spaepen, S., van Themaat, E. V. L., & Schulze-Lefert, P. (2013). Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 64, 807-838.

Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O., Kirschke, D. (2018). A bitter cup: climate change profile of global

- production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, 129(1–2), 89–101.
- Bunn, C., Läderach, P., Rivera, O. O., et al. (2015). Predicting the impact of climate change on the cocoa-growing regions in Ghana and Côte d'Ivoire. *Climatic Change*, 119(3-4), 841-854.
- Castellanos González, L., González Pedraza, A. F., & Capacho Mogollón, A. (2019). Influencia de los sistemas agroforestales del Proyecto Plantar sobre la macrofauna del suelo [Influence of agroforestry systems of the Plantar Project on soil macrofauna]. *Revista Bistua*, 17(3), 105-116. <file:///C:/Users/ANA%20GONZALEZ/Downloads/admin.+12.+Influencia+de+los+sistemas+agroforestales-1.pdf>
- Caporaso, J. G., Lauber, C. L., Walters, W. A., et al. (2012). Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms. *ISME Journal*, 6(8), 1621-1624.
- Cruz-Martínez, K., Rosling, A., Zhang, Y., et al. (2012). Effect of rainfall-induced soil heterogeneity on the diversity of soil bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(20), 7687–7695.
- Dimkpa, C. O., Singh, U., Adisa, I. O., Bindraban, P. S., & Elmer, W. H. (2019). Garí, a fermented cassava product, increases plant growth promotion abilities of native endophytic bacteria and decreases aluminum phytotoxicity. *Applied Soil Ecology*, 144, 110–118.
- Durán, P., Thiergart, T., Garrido-Oter, R., Agler, M., Kemen, E., Schulze-Lefert, P., & Hacquard, S. (2018). Microbial interkingdom interactions in roots promote *Arabidopsis* survival. *Cell*, 175(4), 973-983.
- FAO. (2017). Agroecología: Principios y estrategias para el diseño y la gestión de sistemas agrícolas sostenibles. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i7463s.pdf>
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212.
- Fierer, N., Bradford, M. A., & Jackson, R. B. (2007). Toward an ecological classification of soil bacteria. *Ecology*, 88(6), 1354-1364.
- Fotopoulos, V., Gilbert, M. J., Pittman, J. K., et al. (2013). The monoterpene limonene in orange peels attracts pests and microorganisms. *Plant Signaling & Behavior*, 8(9), e30530.
- García-Oliva, F., Masera, O. R., & Moreno, J. M. (2020). El cambio de uso de suelo y las emisiones de CO₂: desafíos y oportunidades para la mitigación. *Investigación Ambiental*, 12(1), 13-25.
- García-Salamanca A, Molina-Henares MA, van Dillewijn P, et al. (2013) Bacterial diversity in the rhizosphere of maize and the surrounding carbonate-rich bulk soil. *Microbial Biotechnology*, 6(1), 36-44.
- Giller, K. E., Witter, E., Corbeels, M., et al. (2011). Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 124(3), 229-245.
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 963401.
- Glick, B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1), 30-39.
- Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P. L., & Montes, C. (2013). The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, 120, 289-297.
- González García, H., González-Pedraza, A. F., Pineda, M., Escalante, H., Rodríguez Yzquierdo, G. A., & Soto Bracho, A. (2021). Microbiota edáfica en lotes de plátano con vigor contrastante y su relación con propiedades del suelo. *Bioagro*, 33(2), 143-148. <https://doi.org/10.51372/bioagro332.8>
- González-García, H., González-Pedraza, A. F., Rodríguez-Yzquierdo, G., León-Pacheco, R., & Betancourt-Vásquez, M. (2021). Vigor en plantas de plátano (*Musa AAB* cv. Hartón) y su relación con características físicas, químicas y biológicas del suelo. *Agronomía Costarricense*, 45(2), 115-134. <https://dx.doi.org/10.15517/rac.v45i2.47772>
- González García, H., González-Pedraza, A. F., Atencio, J., & Soto, A. (2021). Evaluación de calidad de suelos plataneros a través de la actividad microbiana en el sur del lago de Maracaibo, estado de Zulia, Venezuela [Evaluation of quality of banana soils through microbial activity in the south the lake of Maracaibo, Zulia state, Venezuela]. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 38(2), 216-240. [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v38.n2.01](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n2.01)
- González-Pedraza, A., Atencio, J., Cubillán, K., Almendrales, R., Ramírez, L., & Barrios, O. (2014). Actividad microbiana en suelos cultivados con plátano (*Musa AAB* subgrupo plátano cv. Hartón) con diferente vigor de plantas. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 31(Supl.), 526-538.
- González-Pedraza Ana Francisca; Castellanos González L; Capacho Mogollón A.E. (2023). *Influencia de tres modelos agroecológicos sobre la calidad del suelo en el municipio de Ocaña, Norte de Santander*. Primera edición, Colección Ciencias Pecuarias y Agronomía© Sello Editorial Unipamplona. Pamplona. Universidad de Pamplona.189 p. <https://books.unipamplona.edu.co/index.php/editorial/catalog/book/56>
- Hanumantharao, B., Natarajan, S., & Babu, S. (2020). Colonization of heat-tolerant endophytic fungi confers thermotolerance to *Theobroma cacao*. *Journal of Applied Microbiology*, 129(3), 624-634.
- Hartmann, A., Schmid, M., van Tuinen, D., & Berg, G. (2008). Plant-driven selection of microbes. *Plant and Soil*, 321(1–2), 235-257.

- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Gill, S. S., Alharby, H. F., Razafindrabe, B. H. N., & Fujita, M. (2017). Hydrogen peroxide pretreatment mitigates cadmium-induced oxidative stress in *Brassica napus* L.: An intrinsic study on antioxidant defense and glyoxalase systems. *Frontiers in Plant Science*, 8, 115.
- Jiménez-Jiménez, R. A., Rendón-Rendón, M. C., Chávez-Pérez, L. M. & Soler Fonseca, D. M. (2019). La polarización de los sistemas de producción pecuaria en México. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 4(1), 31-39.
<https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcyta/article/view/981/1118>
- Köberl, M., Müller, H., Ramadan, E. M., et al. (2011). *Bacillus* and *Streptomyces* were selected as broad-spectrum antagonists against soilborne pathogens from arid areas in Egypt. *FEMS Microbiology Letters*, 320(1), 9-16.
- Lauber, C. L., Hamady, M., Knight, R., & Fierer, N. (2008). Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(15), 5111-5120.
- Lima Júnior, N. R., Do Carmo, J. B., Poloni, S., et al. (2020). Rhizosphere colonization and growth promotion of cacao (*Theobroma cacao* L.) by salt-tolerant endophytic bacteria. *Biological Control*, 151, 104384.
- Mendes, R., Garbeva, P., & Raaijmakers, J. M. (2011). The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, 37(5), 634-663.
- Meinhardt, L. W., Rincones, J., Bailey, B. A., et al. (2008). *Moniliophthora perniciosa*, the causal agent of witches' broom disease of cacao, is a hemibiotrophic fungus. *Mycologia*, 100(6), 147-155.
- Melo Pereira, G. V., Magalhães, K. T., Lorenzetti, E. R., et al. (2014). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning of *Arabidopsis thaliana* under drought stress. *Plant and Soil*, 392(1-2), 57-68.
- Mulema, J. M. K., Kiremire, B. T., Mpairwe, D. R., et al. (2019). Impact of climate change on cocoa production: An assessment of vulnerability and adaptation strategies for smallholder farmers in Uganda. *Agriculture & Food Security*, 8(1), 16.
- Muyzer, G., de Waal, E. C., & Uitterlinden, A. G. (1993). Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(3), 695-700.
- Ofek-Lalzar, M., Sela, N., Goldman-Voronov, M., Green, S. J., Hadar, Y., & Minz, D. (2014). Niche and host-associated functional signatures of the root surface microbiome. *Nature Communications*, 5, 4950.
- 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.
- Pretty, J., Toulmin, C., & Williams, S. (2006). Sustainable intensification in African agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 4(2), 105-118.
- Rice, R., & Greenberg, R. (2000). Cacao cultivation and the conservation of biological diversity. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(3), 167-173.
- Rascovan, N., Carbonetto, B., Perrig, D., et al. (2016). Integrated analysis of root microbiomes of soybean and wheat from agricultural fields. *Scientific Reports*, 6, 28084.
- Ruf, F. (2018). Cocoa agroforestry: A climate-smart approach for sustainable cocoa production. *Agroforestry Systems*, 92(4), 927-938.
- Santos-Medellín, C., Edwards, J., Liechty, Z., et al. (2017). Root-associated fungi shared between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal conifers in a temperate forest. *Frontiers in Microbiology*, 8, 433.
- Schroth, G., Läderach, P., Martínez-Valle, A. I., et al. (2016). Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation. *Science of the Total Environment*, 556, 231-241.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press.
- Steinmann, P., Keiser, J., Bos, R., Tanner, M., & Utzinger, J. (2018). Schistosomiasis and water resources development: systematic review, meta-analysis, and estimates of people at risk. *The Lancet Infectious Diseases*, 6(7), 411-425.
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Hölscher, D., Jührbandt, J., Kessler, M., Perfecto, I., & Scherber, C. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes—a review. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 619-629.
- Vandenkoornhuyse, P., Quaiser, A., Duhamel, M., Le Van, A., & Dufresne, A. (2015). The importance of the microbiome of the plant holobiont. *New Phytologist*, 206(4), 1196-1206.
- Vega, H., Castellanos Gonzalez, L., Céspedes, N., & Sequeda Serrano, Y. A. (2019). Control alternativo de las enfermedades fúngicas foliares en el cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en el municipio de Pamplona, Norte de Santander. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 4(1), 10-21.
<https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcyta/article/view/910>
- Vlot, A. C., Dempsey, D. A., & Klessig, D. F. (2009). Salicylic acid, a multifaceted hormone to combat disease. *Annual Review of Phytopathology*, 47, 177-206.
- Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress

- tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184, 13-24.
- Wei, Z., Hu, J., Gu, Y., et al. (2018). *Ralstonia solanacearum* pathogen disrupts bacterial rhizosphere microbiome during an invasion. *Soil Biology and Biochemistry*, 118, 8-17.
- Wickramasinghe, W. A. R. T., & Pushpakumara, D. K. N. G. (2018). *Agroecological approaches for sustainable agriculture*. In W. A. R. T. Wickramasinghe & D. K. N. G. Pushpakumara (Eds.), *Agroecological Approaches for Sustainable Agriculture* (pp. 1–16). Springer.
- Zargar, S. M., Nagar, P., Deshmukh, R., et al. (2019). Abiotic stress responses in plants: roles of calmodulin-regulated proteins. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1338.
- Zomer, R. J., Neufeldt, H., Xu, J., Ahrends, A., Bossio, D., Trabucco, A., ... & Wang, M. (2017). Global tree cover and biomass carbon on agricultural land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Scientific Reports*, 7(1), 1-12.

Ciencia y Tecnología Agropecuaria es una revista publicada por la Universidad de Pamplona bajo la licencia: [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) (CC BY-NC-SA 4.0)

